

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE
CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU
RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL**

SAMUEL PÉREZ NIETO

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO


2013

La presente tesis titulada: EROSIÓN HÍDRICA EN LAS CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL, realizada por el alumno SAMUEL PÉREZ NIETO bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTOR EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO


DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA

ASESOR


DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO

ASESOR


DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS

ASESOR


DR. DEMETRIO SALVADOR FERNÁNDEZ REYNOSO

ASESOR


DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

Montecillo, Texcoco, Estado de México, agosto de 2013

A mí amada esposa, Ma. Dolores Reyes Vásquez
Como fruto del trabajo compartido, símbolo de nuestro amor y unidad permanentes y escalón para
nuestro porvenir más prometedor

A mis adorables hijas Elna Selina y Diana Ixchel
Como testimonio de que lo que se quiere se puede, si se trabaja para lograrlo y por ser la fuente
inagotable de fortaleza y razón de mi vida, cual manantial que alimenta permanentemente un
embalse, contribuyendo al incremento de su capacidad de almacenamiento

A mi madre: Eufelia Nieto Angel
Como tributo a su inagotable fortaleza y su inquebrantable esfuerzo por la vida

A mi padre: Miguel Pérez López (†)
Como una ofrenda a su memoria y a su sabiduría

A mis hermanos: Joel, Martín Miguel, Gloria, Nínfa, Edith y Heladio
Porque aunque cada quien es cauce de su propia subcuena, todos somos tributarios del mismo
cauce principal

Me ha resultado más fácil entender las leyes que gobiernan el movimiento de los astros que están a millones de kilómetros de distancia, que las leyes que rigen el movimiento del agua, que circula frente a mis ojos

Galileo Galilei

A MANERA DE PRÓLOGO

No cabe duda que nunca se deja de aprender. En mi caso, ello no sólo ha sido y es cierto, sino también necesario, e incluso inevitable, dada la amplia, plena y diversa actividad y actuación profesional que me ha tocado la fortuna de vivir, desde los orígenes de mi formación y quehacer profesional hasta estos días. En efecto, mi formación en el Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, en la carrera de Ingeniero Agrónomo Especialista en Irrigación me ubicó, de origen, en ese amplio, interesantísimo e importante campo de estudio, de trabajo y desarrollo profesional que es la Irrigación; profesión y actividad que tienen que ver con el uso y manejo del agua de riego; casi nada, ello significa actuar completamente y directamente con el líquido vital e inmediatamente con la producción de alimentos a través de la agricultura de riego, amén de la necesidad y urgencia de hacer lo necesario para hacer un uso más eficiente y sustentable del mismo, dado su inminente agotamiento y contaminación.

Luego, mi trabajo fundamental de Profesor-Investigador, ahí mismo donde me formé y prácticamente en todo el tiempo de ejercicio profesional (que ya suma un poco más de un cuarto de siglo), en mi entrañable *alma mater*, me ha posibilitado, en el cumplimiento de mi responsabilidad, a incursionar en sus cuatro tareas académicas fundamentales que son la enseñanza (impartiendo varias materias de ingeniería, pero de la que he aprendido mucho y, en ocasiones más de lo que se estoy dispuesto a aceptar), la investigación (desarrollando algunos trabajos que al menos me han mantenido vigente en ese quehacer), el servicio (mediante la ejecución de un amplio número de estudios y proyectos, en casi todos los campos de la irrigación) y la difusión de la cultura (a través de la generación de algunas publicaciones técnicas y científicas para divulgar los resultados de las otras actividades), que de manera conjunta han ido conformando y fortaleciendo mi formación y conduciéndome a procurar mantenerme permanentemente en capacitación. De ahí que le deba y le profese a la UACH (como reza un párrafo de su acta inaugural) “..una severa y callada devoción, como la que se le deben a todas las grandes cosas...”, y que le exprese en esta oportunidad mi profundo agradecimiento, por albergarme en su seno, no sólo en la gestación, sino en el crecimiento y desarrollo posterior, y en lo futuro hasta que la muerte (profesional al menos), nos separe.

Esta formación y actividad, me condujo a realizar estudios de maestría entre 1994 y 1997 en el programa de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados. El tema de tesis desarrollado, se fundó en la intención de profundizar (más para mí que para los demás)

en el estudio de la hidráulica de los sistemas de riego presurizado, analizando el efecto de los elementos y fenómenos térmicos en las líneas regantes de sistemas de riego localizado, en los emisores, en el fluido y en el flujo. Ello, en efecto, fortaleció mi conocimiento y mejoró (fue mi intención y es mi deseo al menos) la impartición de la materia de Hidráulica en la Universidad, y para mi contribución en la formación técnica en temas de irrigación a profesores, técnicos y usuarios de riego de diversas áreas y regiones del país.

Siguiendo esta lógica y apuntando a la meta que ahora llega a su fin, (de la formación permanente), en el año 2000, inicié mis estudios doctorales, también en el Colegio de Postgraduados, con lo que esta noble y magnífica Institución se constituye en mi segunda *alma mater* (si es que se puede tener dos), orientando mi formación (con las materias y cursos que tomé) y mi tema de investigación inicial, a la aplicación de las tecnologías y técnicas asociadas con los sensores remotos que encontraban su máxima expresión en las imágenes de satélite, (y que estaban de moda en ese tiempo y se preveían y planteaban por muchos, casi como la panacea para estudiar y contribuir a la solución de casi cualquier problema que tuviera relación o un componente geográfico) para estudiar también (igual que otros colegas, compañeros del CP o ajenos a él), la asociación del desarrollo y producción de los cultivos bajo riego con la reflectancia que se adquiere en dichas imágenes; aunque completé el planteamiento, desarrollé prácticamente por completo los trabajos de campo propuestos y avancé de manera importante en la redacción del informe, diversas razones técnicas (como la avería que sufrió el sistema LANDSAT en ese año, cuyas imágenes eran insumo fundamental para el trabajo), de tiempo y, sobre todo de decisión, no concluí la tesis en los tiempos originalmente previstos.

De ese tiempo hasta este año, en que decidí volver a retomar el pendiente, a través de la Unidad de Servicios Profesionales y Transferencia de Tecnología en Ingeniería Agrícola (USPROTTIA) del Departamento de Irrigación de la UACH que me honro en coordinar, me involucré en el desarrollo de un amplio número y diversidad técnica y espacial de estudios y proyectos ligadas con la ingeniería agrícola y relacionados con el manejo, conservación y uso eficiente y sustentable del agua (destinada al riego fundamentalmente) y de los demás recursos asociados (suelo y bióticos), que contribuyeron a ampliar y profundizar, quizá de manera más contundente, a mi formación técnica.

En 2006, después de la ocurrencia del Ciclón Tropical Stán en la Costa de Chiapas, que ocasionó grandes destrozos y pérdidas, tanto de los recursos naturales, como a la infraestructura y a la población; me tocó, por invitación de mi hoy gran amigo, el Dr. José Luis Arellano Monterrosas, con la conducción de la Dra. Laura Alicia Ibáñez Castillo, quien también me ha brindado su confianza y amistad, y bajo el auspicio de la Comisión Nacional del Agua, mi involucré en la generación de un esquema metodológico para el estudio, diagnóstico y planteamiento de las acciones para la restauración hidrológico-

ambiental de las cuencas hidrológicas dañadas por este ciclón a través de su aplicación a las Cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, en la Costa de Chiapas donde tuvo sus mayores impactos, adecuando los métodos, técnicas, tecnologías y conceptos generados en otros países y condiciones, lo que constituyó no sólo para mí (según creo y espero) sino para los expertos y estudiosos de estos temas en México y, en particular en las zonas costeras como las de Chiapas, cuando menos, una interesante experiencia.

Para mí este proyecto profesional me interesó profundamente en el estudio de las cuencas hidrológicas y en la conservación del suelo, el agua y el bosque, con todos sus elementos, aspectos y temas asociados y me llevó a desarrollar trabajos similares en diversas cuencas de los estados de México y Michoacán y tributarias del Sistema Cutzamala, que suministra agua potable a las Ciudades de México y Toluca; otras del estado de Hidalgo, en las que se originan los escurrimientos que luego forman parte del Río Pánuco; y de la cuenca del Río Sabinas en el estado de Coahuila; entre otras varias, con los que amplié mi conocimiento e interés en este campo y acumulé experiencia y material técnico y documental de gran valía.

A partir de toda esta experiencia y conocimientos y estimulado de manera persistente por mis amigos, colegas y ya compañeros de tantos estudios y proyectos desarrollados en conjunto, José Luis Arellano y Laura Alicia Ibáñez, para concluir mis estudios de doctorado, planteamos desarrollar mi investigación doctoral con el tema realizado; así que, como parte fundamental de mi involucramiento en el área de estudio, en la definición y desarrollo del tema particular y en la decisión de concluir con este pendiente en mi formación profesional, además de por su amistad desinteresada e invaluable, quiero dejar constancia de mi más amplio agradecimiento para ambos.

Durante tantos años de estudio, no tuve la fortuna de ser su alumno; la vida, sin embargo me permitió coincidir con él en el desarrollo de muchos de los proyectos, trabajos y estudios referidos y relacionados con la Conservación de Agua y del Suelo. Me refiero a mi paisano, colega y amigo el Dr. José Luis Oropeza Mota, autoridad indiscutible y experto nacional y reconocido internacional en el tema; por lo que me considero muy afortunado y agradezco en todo lo que vale, contar con su amistad y haber tenido su apoyo completo y desinteresado al Presidir el Consejo Particular que me condujo en la parte final de mis estudios y dirigir la presente Tesis Doctoral.

En mi actuación profesional y cotidiana, he tenido el privilegio de conocer y compartir trabajo y momentos relevantes de vida, con los Dres. Demetrio Salvador Fernández Reynoso y Jesús Chávez Morales, hasta convertirse en grandes amigos personales y familiares. Por ello y por aceptar integrarse a mi Consejo Particular y por su apoyo fundamental en la revisión del trabajo de tesis, mi gratitud amplia y sincera.

La normatividad del Colegio de Postgraduados, aplicable a mi caso, hizo posible que a pesar de haber abandonado casi por completo y por más de una década la conclusión de

mis estudios doctorales, que haya podido volver y completarlos con todos los honores para salir por la puerta grande, lo cual es sólo comparable con el amor y compromiso que una madre le tiene a sus hijos. Ello aunado, a la oportunidad que me brindó durante todos mis estudios de maestría y doctorado, me conducen a expresarle, precisamente, el agradecimiento que un hijo debe a su madre.

Durante todos mis estudios profesionales, de licenciatura, maestría y doctorado, tuve la fortuna y el privilegio de estar becado o ser becario; por lo que viviré eternamente agradecido al pueblo de México, que a través de la Universidad Autónoma Chapingo, el Colegio de Posgraduados y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, me dio sustento y condiciones para mi formación y para estar permanentemente comprometido a contribuir a la solución de sus problemas, en los temas que he estudiado, aprendido y tomado experiencia.

Por supuesto, mi mayor y eterno agradecimiento para mis tres mujeres, que son mi esposa y mi hijas, por brindarme todo y permanente apoyo, no sólo para concluir mis estudios doctorales con la realización de la tesis, sino durante todo mi ejercicio profesional y por nuestro conjunto y unido transitar por la vida.

Y todo esto empezó con el Abuelo Tuburcio, mixteco y prácticamente analfabeta, pero que supo ver y sobreponerse con gran filosofía a sus enormes carencias materiales, con su visión de sacar a sus hijos y descendencia del círculo vicioso que conjugaba pobreza, marginación y desesperanza, sintetizada en su definición heredada en su testamento de vida y que mi padre Miguel Pérez López y sus hermanos asumieron con completa convicción casi transmitida por la sangre: *en estas condiciones, la mejor herencia para un hijo es una profesión*; y que para ponerla en práctica nos condujeron a hijos y nietos a estudiar lejos de nuestros orígenes y raíces, aprovechando los internados hechos escuela o de las escuelas con internado y servicios asistencias y luego, los más aventajados (en edad, tiempo y condiciones) apoyando a los que vienen detrás. Esta filosofía, practicada ya por dos o tres generaciones, ha llevado a la familia a ser hoy día mayormente, gente de bien y de provecho. Lo único lamentable, es que muchos de ellos ya no estén con nosotros para cosechar un poco de lo mucho y que con tanto esfuerzo sembraron.

Con todo este andar para haber llegado al este momento culminante de mi vida, (y haciendo completamente a un lado la modestia, pero también cualquier afán de presunción y de grandeza), me siento más orgulloso e incluso más merecedor del grado que, con la conclusión de este trabajo se me otorga; por lo menos la elaboración de la tesis y la realización de los trámites y acciones necesarias para mi graduación ha resultado más fácil y más llana y me ha introducido al estudio y en el trabajo de un campo tan apasionante, relevante y trascendental para el desarrollo de la humanidad y la conservación del planeta y sus recursos.

Espero y deseo portar con honor este grado y mi compromiso de emplearlo con toda honestidad, firme decisión y completa disposición, para contribuir en lo que me toque y esté a mi alcance, en la solución de la enorme problemática nacional relacionada con el aprovechamiento, manejo y conservación del agua y los demás recursos asociados, empezando por apoyar a los más necesitados, como los son mis paisanos mixtecos.

Tulancingo, Oax., verano de 2013

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

CONTENIDO

ÍNDICE DE TEMAS

	TEMA	PÁG.
1.-	INTRODUCCIÓN	1.1
1.1.	LOS RECURSOS NATURALES, EN EMINENTE AGOTAMIENTO	1.1
1.2.	LOS PROCESOS HÍDRICOS EROSIVOS	1.3
1.3.	LA COSTA DE CHIAPAS, EN CONDICIONES EXTREMAS	1.5
1.4.	PLANTEAMIENTO GENERAL DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN	1.6
2.-	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	2.1
2.1.	LA CUENCA COMO ENTIDAD DE ESTUDIO DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS	2.1
2.1.1.	LA CUENCA HIDROLÓGICA Y SUS COMPONENTES	2.1
2.1.2.	IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA CUENCA	2.3
2.1.3.	LA CUENCA COMO ENTIDAD DE ESTUDIO Y PLANEACIÓN	2.4
2.2.	CARACTERIZACIÓN PARAMÉTRICA DE UNA CUENCA	2.5
2.2.1.	FUNDAMENTACIÓN, IMPORTANCIA Y CLASIFICACIÓN	2.5
2.2.2.	PARÁMETROS DE FORMA	2.7
2.2.2.1.	Área (A_c)	2.7
2.2.2.2.	Índice de forma (I_f)	2.8
2.2.2.3.	Coeficiente de sinuosidad (K_s)	2.8
2.2.2.4.	Parámetro de forma (P_f)	2.8
2.2.2.5.	Longitud de la cuenca (L_c)	2.9
2.2.3.	PARÁMETROS FISIOGRÁFICOS Y DE RELIEVE MÁS UTILIZADOS	2.9
2.2.3.1.	Índice de compacidad (I_c)	2.9
2.2.3.2.	Densidad de drenaje (D_d) y densidad hidrográfica (D_h)	2.9
2.2.3.3.	Pendiente del Cauce Principal (S_{cp})	2.11
2.2.3.4.	Pendiente media de la cuenca (S_c)	2.12
2.2.4.	PARÁMETROS DE DRENAJE	2.12
2.2.4.1.	Orden de corrientes (O_c) y Número de orden de corrientes (N_o)	2.12

2.2.4.2. Relación de bifurcación	2.13
2.3. RELACIÓN LLUVIA-ESCURRIMIENTO EN CUENCAS	2.13
2.3.1. COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO	2.13
2.3.2. DISPONIBILIDAD Y MANEJO DE DATOS	2.16
2.3.2.1. Hietogramas	2.16
2.3.2.2. Hidrogramas	2.17
2.3.2.3. Hidrograma Unitario	2.19
2.3.2.4. Tiempo de retraso	2.20
2.3.2.5. Tiempo de concentración	2.20
2.3.3. MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS	2.21
2.3.3.1. Medición con molinete	2.22
2.3.3.2. Estimación en el cauce con limnímetros o limnígrafos	2.22
2.3.3.3. Estimación en el cauce	2.25
2.3.3.4. Coeficiente de escurrimiento	2.26
2.4. ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO POR EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA	2.31
2.4.1. EL CONCEPTO DE NÚMERO DE CURVA	2.31
2.4.1.1. Grupos hidrológicos de suelos	2.31
2.4.1.2. Clases de uso del terreno y tratamientos	2.32
2.4.1.3. Clases en los terrenos cultivados	2.32
2.4.1.4. Clases de pradera natural	2.33
2.4.1.5. Clases de bosques	2.33
2.4.1.6. Significado y determinación	2.37
2.4.2. CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE DEL SUELO	2.40
2.4.3. AJUSTES POR PENDIENTE	2.42
2.4.4. MÉTODOS PARA SU DETERMINACIÓN	2.43
2.4.5. RELACIONES ENTRE EL NÚMERO DE CURVA, EL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO Y LA LÁMINA ESCURRIDA	2.45
2.4.6. APLICACIONES DEL MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA EN CUENCAS	2.46
2.5. EL PROCESO DE EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS	2.47
2.5.1. GÉNESIS Y OCURRENCIA DE LA EROSIÓN HÍDRICA	2.47
2.5.2. FACTORES QUE DETERMINAN LA TASA DE EROSIÓN	2.49
2.5.3. ESTIMACIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN	2.52
2.5.3.1. La Ecuación Universal de Pérdida de suelo	2.53
2.5.3.2. La erosividad de la lluvia R	2.54
2.5.3.3. La erosionabilidad del suelo K	2.55
2.5.3.4. El factor topográfico LS	2.57
2.5.3.5. El factor de manejo de la vegetación C	2.60
2.5.3.6. El factor de prácticas de manejo del suelo P	2.63

2.5.4.	MAGNITUD Y CLASIFICACIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN	2.66
2.6	USO DE IMÁGENES DE SATÉLITE PARA ESTUDIOS DE COBERTURA	2.67
2.6.1.	CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SENSORES REMOTOS	2.67
2.6.1.1.	Descripción y aplicabilidad general	2.67
2.6.1.2.	Características de las imágenes adquiridas remotamente	2.71
2.6.2.	IMÁGENES DEL SATÉLITE LANDSAT	2.72
2.6.2.1.	Características del sistema	2.72
2.6.2.2.	Descripción y aplicabilidad de las bandas del sensor ETM+	2.74
2.6.3.	IMÁGENES DEL SATÉLITE SPOT	2.76
2.6.4.	ÍNDICES DE VEGETACIÓN	2.77
2.6.5.	CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LAS IMÁGENES	2.80
2.7	LA TÉCNICA DEL ÁLGEBRA DE MAPAS	2.82
2.7.1.	CONCEPTUALIZACIÓN	2.82
2.7.2.	APLICABILIDAD	2.83
2.8.	EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS EN LAS CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS	2.86
2.8.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS EVENTOS	2.86
2.8.2.	IMPACTO Y AFECTACIONES DE LOS EVENTOS EXTREMOS	2.86
2.8.3.	ESTUDIOS DE EROSIÓN EN CHIAPAS Y ZONAS AFINES	2.91
2.8.3.1.	Determinación de tasas de erosión	2.91
2.8.3.2.	Determinación del número de curva y coeficiente de escurrimiento	2.93
3.-	OBJETIVOS E HIPÓTESIS	3.1
3.1.	OBJETIVO PRINCIPAL	3.1
3.2.	OBJETIVOS PARTICULARES	3.1
3.3.	HIPÓTESIS	3.2
4.-	MATERIALES Y MÉTODOS	4.1
4.1.	LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	4.1
4.1.1.	DEFINICIÓN Y LOCALIZACIÓN	4.1
4.1.2.	CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN	4.2
4.1.2.1.	Caracterización general de la Región Soconusco	4.2
4.1.2.2.	Delimitación de las cuencas de estudio	4.4
4.1.2.3.	Clima	4.6

4.1.2.4.	Hidrología	4.7
4.1.2.5.	Fisiografía	4.12
4.1.2.6.	Caracterización de los suelos	4.14
4.2.	CARACTERIZACIÓN DE LAS NANOCUENCAS	4.16
4.2.1.	DEFINICIÓN Y LOCALIZACIÓN	4.16
4.2.1.1.	Nanocuenca Rosita	4.18
4.2.1.2.	Nanocuenca Finca Brasil	4.18
4.2.1.3.	Nanocuenca Hannover	4.20
4.2.1.4.	Nanocuenca Berriozábal	4.20
4.2.2.	CARACTERIZACIÓN GENERAL	4.22
4.2.2.1.	Topografía y fisiografía	4.22
4.2.2.2.	Uso del suelo	4.23
4.2.2.3.	Caracterización del suelo y condición hidrológica	4.27
4.2.3.	INSTRUMENTACIÓN E INFORMACIÓN GENERADA	4.29
4.3.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	4.34
4.3.1.	PARA LOS ESTUDIOS DE EROSIÓN	4.34
4.3.1.1.	Procedimiento general	4.34
4.3.1.2.	Precipitación y factor R	4.34
4.3.1.3.	Caracterización para la determinación del factor K	4.36
4.3.1.4.	Determinación del factor topográfico	4.38
4.3.1.5.	Vegetación y uso del suelo	4.41
4.3.1.6.	Definición del factor P	4.42
4.3.1.7.	Estimación de la Tasas de Erosión	4.43
4.3.2.	CALIBRACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA	4.46
4.3.2.1.	Análisis de la precipitación en la Cuenca Huixtla	4.46
4.3.2.2.	Información de las estaciones de monitoreo	4.50
4.3.2.3.	Determinación del número de curva de los datos de campo	4.55
4.3.2.4.	Determinación y ajuste del número de curva de las tablas del SCS	4.57
4.3.2.5.	Determinación y ajuste del número de curva de las tablas del SCS	4.63
4.3.3.	ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	4.68
4.3.3.1.	Análisis de las disposiciones normativas	4.68
4.3.3.2.	Valores reales a partir de datos de campo	4.70
4.3.3.3.	Valores con base en la NOM-011-CNA-2000	4.70
4.3.4.	VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO CON EL MÉTODO DE N_c Y USANDO SIG, TAM Y NÚMEROS DE BASE 10	4.74
4.3.4.1.	Planteamiento del modelo	4.74
4.3.4.2.	El algoritmo de número de base 10	4.76
4.3.4.3.	Generación de la capa de Uso del Suelo	4.76
4.3.4.4.	Generación de la capa de Condición Hidrológica	4.77

4.3.4.5.	Generación de la capa del Grupo Hidrológico	4.77
4.3.4.6.	Relación entre el número de base 10 y el N_c	4.79
4.3.4.7.	El mapa de precipitación de la Tormenta Tropical Stán de tipo ráster	4.81
4.3.4.8.	Determinación del volumen de escurrimiento V_e , por el Método Distribuido	4.81
4.3.4.9.	Determinación del volumen de escurrimiento V_e , por el Método Agregado	4.84
4.3.5.	PROPUESTA PARA CONSIDERAR LA PENDIENTE DE LA CUENCA EN LA DETERMINACIÓN DISTRIBUIDA DEL N_c	4.87
5.-	RESULTADOS: ARTÍCULOS GENERADOS	5.1
5.1.	ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA PROVOCADA POR EL HURACÁN STÁN EN LAS CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS, MÉXICO	5.1
5.1.1.	RESUMEN	5.1
5.1.2.	SUMMARY	5.1
5.1.3.	INTRODUCCIÓN	5.2
5.1.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	5.4
5.1.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	5.6
5.1.6.	CONCLUSIONES	5.8
5.1.7.	LITERATURA CITADA	5.9
5.2.	AJUSTE DEL NÚMERO DE CURVA PARA TRES NANOCUENCAS INSTRUMENTADAS EN LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA, CHIAPAS, MÉXICO	5.12
5.2.1.	RESUMEN	5.12
5.2.2.	INTRODUCCIÓN	5.12
5.2.3.	MATERIALES Y MÉTODOS	5.17
5.2.4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	5.20
5.2.5.	CONCLUSIONES	5.21
5.2.6.	AGRADECIMIENTOS	5.22
5.2.7.	LITERATURA CITADA	5.22
5.3.	DETERMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO EN LA CUENCA HUIXTLA, CHIAPAS, POR EL MÉTODO DE N_c Y USANDO SIG, TAM Y NB_{10}	5.24
5.3.1.	RESUMEN	5.24
5.3.2.	SUMMARY	5.24
5.3.3.	INTRODUCCIÓN	5.25
5.3.4.	MATERIALES Y MÉTODOS	5.29
5.3.5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	5.35
5.3.6.	CONCLUSIONES	5.38
5.3.7.	LITERATURA CITADA	5.38

6.- ANÁLISIS CONJUNTO DE RESULTADOS	6.1
6.1. CONSIDERACIONES GENERALES	6.1
6.2. SOBRE LOS PROCESOS EROSIVOS	6.2
6.3. SOBRE LA APLICABILIDAD DEL NÚMERO DE CURVA	6.4
6.4. SOBRE LA APLICABILIDAD DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO	6.7
6.5. SOBRE EL CÁLCULO DEL ESCURRIMIENTO CON LA METODOLOGÍA PROPUESTA	6.8
7.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	7.1
7.1. CONCLUSIONES	7.1
7.1.1. GENERALES	7.1
7.1.2. SOBRE LOS PROCESOS EROSIVOS	7.1
7.1.3. SOBRE EL USO DEL MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA DEL SCS	7.2
7.1.4. SOBRE EL CÁLCULO DE ESCURRIMIENTOS	7.2
7.2. RECOMENDACIONES	7.3
7.2.1. DE CARÁCTER GENERAL	7.3
7.2.2. SOBRE LOS PROCESOS EROSIVOS	7.3
7.2.3. SOBRE EL USO DEL NÚMERO DE CURVA Y ESTIMACIÓN DE ESCURRIMIENTO	7.4
7.2.4. SOBRE LA APLICABILIDAD DE LOS MÉTODOS, MODELOS Y METODOLOGÍAS DE ESTUDIO	7.4
8.- CITAS BIBLIOGRÁFICAS	8.1

ÍNDICE DE FIGURAS

NÚM.	TÍTULO	PÁG.
Figura 2.1.	Esquema que ilustra la definición de concepto de cuenca hidrológica (Basado de Arellano, 2012)	2.2
Figura 2.2.	Delimitación de una pequeña cuenca sobre una carta topográfica del INEGI en escala 1:50,000	2.5
Figura 2.3.	Esquematzación de diversas formas de cuencas definidas por su relación de bifurcación R_b , y sus correspondientes hidrogramas de respuesta	2.6
Figura 2.4.	Determinación de la longitud L_c de una cuenca regular (a) y de una irregular (b), según Galicia (2010)	2.9
Figura 2.5.	Relaciones entre la forma, la densidad de drenaje (D_d) y la frecuencia o densidad de corrientes en cuencas hidrográficas (Arellano, 2012)	2.11
Figura 2.6.	Esquematzación de la determinación del orden de las corrientes de la red de drenaje de una cuenca de acuerdo con la propuesta de Horton	2.14
Figura 2.7.	Esquematzación del proceso y de los componentes de ciclo hidrológico	2.15
Figura 2.8.	Generación del escurrimiento a partir de la precipitación en una cuenca (Springall, 1970 y Campos, 2012)	2.15
Figura 2.9.	Ejemplo de hietograma	2.16
Figura 2.10.	Hidrograma aislado y sus principales componentes (Redibujado de Aparicio, 2012)	2.18
Figura 2.11.	Hidrograma unitario sintético y acumulad (a) y unitario triangular (b)	2.19
Figura 2.12.	Molinete para medir la velocidad del flujo en un cauce y estimar el escurrimiento aplicando la ecuación de continuidad (2.21)	2.23
Figura 2.13.	Seccionamiento de un canal en tierra para la medición de la velocidad del flujo a 60 % del tirante	2.23
Figura 2.14.	Empleo de limnímetros para la medición del escurrimiento de un río (a) y para el volumen almacenado en una presa (b)	2.24
Figura 2.15.	Empleo de limnígrafos para la medición del escurrimiento de un río	2.25
Figura 2.16.	Ejemplos de un limnigrama en el que se puede determinar el valor de la lámina de escurrimiento	2.25
Figura 2.17.	Relaciones entre la lluvia y el escurrimiento en el Método del Número de Curva del SCS	2.40
Figura 2.18.	Esquematzación del proceso de erosión hídrica de los suelos en los procesos de desprendimiento (a), transporte (b) y depositación (c) (Brady y Weil, 1999)	2.48
Figura 2.19.	Desarrollo del proceso erosivo por efecto del agua y la degradación de las propiedades y productividad del suelo	2.50
Figura 2.20.	Nomograma para evaluar el factor K de erosionabilidad del suelo	2.57
Figura 2.21.	Ilustración de un sensor remoto (SPOT 5 VEGETATION) adquiriendo imágenes estereoscópicas de la superficie terrestre	2.68

	mediante el registro de la radiación electromagnética emitida por el sol y reflejada por ella	
Figura 2.22.	Fuentes de energía empleados por los sensores remotos	2.69
Figura 2.23.	Esquematzación del proceso de adquisición de datos con sensores remotos y su interpretación y análisis	2.70
Figura 2.24.	Disposición del sensor Enhanced Thematic Mapper Plus en el satélite LANDSAT 7. (Fuente: http://landsat.gsfc.nasa.gov/ y Aronoff, 2005)	2.73
Figura 2.25.	Systeme Pour l'Observation de la Terre 5 (SPOT 5)	2.76
Figura 2.26.	Ejemplo de aplicación de un operador aritmético ($B=100 \times A$) que ilustra el principio fundamental de la técnica de álgebra de mapas	2.82
Figura 2.27.	Esquematzación del uso de la técnica de álgebra de mapas para la evaluación de la EUPS mediante la generación y multiplicación de un mapa para cada factor que la compone	2.84
Figura 2.28.	Generación de erosión por deslizamientos en laderas en las faldas de la Sierra Madre de Chiapas donde las pendientes son mayores al 100 % y la cobertura vegetal se ha reducido al mínimo	2.87
Figura 2.29.	Erosión hídrica ocasionada por el ciclón tropical Stán en las cuencas costeras de Chiapas	2.88
Figura 2.30.	Acarreo y depositación de sedimentos generados por la erosión hídrica y transportados por los escurrimientos en las cuencas costeras de Chiapas	2.89
Figura 4.1.	Localización de las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán en el estado de Chiapas	4.2
Figura 4.2.	Localización de las cuencas de trabajo en la división administrativa del estado de Chiapas	4.3
Figura 4.3.	Definición de las cuencas completas Huixtla, Huehuetán y Coatán completas sobre un recorte de imagen satelital SPOT	4.4
Figura 4.4.	Punto de definición de la Cuenca Huixtla en el cruce del Río Huixtla y la carretera Costera	4.5
Figura 4.5.	Punto de definición de la Cuenca Huehuetán en el cruce del Río Huehuetán y la carretera Costera	4.5
Figura 4.6.	Punto de definición de la Cuenca Coatán en el puente de cruce del Río Coatán y la carretera costera a la entrada de la Ciudad de Tapachula	4.6
Figura 4.7.	Localización de la región hidrológica 23 Costa de Chiapas donde se ubican las cuencas de estudio	4.8
Figura 4.8.	Condiciones prevalecientes en las partes altas de los cauces de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán que implican flujos torrenciales y grandes velocidades	4.9
Figura 4.9.	Condiciones prevalecientes en las partes bajas de los cauces de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán que implican flujos tranquilos y sedimentación	4.11
Figura 4.10.	Características fisiográficas de las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán que muestran su condicionamiento y vulnerabilidad a los procesos erosivos debidos al agua	4.14
Figura 4.11.	Perfiles de suelo representativos de las cuencas costeras de	4.17

	Chiapas, que muestran su textura arenosa y colores rojizos y verduzcos	
Figura 4.12.	Localización de la nanocuenca Rosita sobre la imagen google	4.18
Figura 4.13.	Croquis de localización de la nanocuenca Rosita	4.19
Figura 4.14.	Localización de la nanocuenca Finca Brasil sobre la imagen google	4.19
Figura 4.15.	Croquis de localización de la nanocuenca Finca Brasil	4.20
Figura 4.16.	Croquis de localización de la Nanocuenca Hannover	4.21
Figura 4.17.	Ubicación del sitio de medición de las Nanocuenclas Berriozábal, Rosita y Finca Brasil en la Cuenca del Río Huixtla (CONAGUA/UAQ, 2008)	4.21
Figura 4.18.	Levantamiento topográfico de las nanocuenclas para conocer su delimitación y área y determinar sus parámetros fisiográficos	4.22
Figura 4.19.	Vista aérea que muestra la cobertura vegetal completa con pastizales (acahual) y menores áreas de bosque en la Nanocuenca Rosita	4.24
Figura 4.20.	Uso del suelo de pastizales con bosque (acahual) en la Nanocuenca Rosita	4.25
Figura 4.21.	Uso del suelo de bosque en la nanocuenca Rosita	4.25
Figura 4.22.	Vista aérea del uso del suelo de bosque de cedro con más de 75 % de cobertura en la nanocuenca Finca Brasil	4.26
Figura 4.23.	Uso del suelo de bosque en la nanocuenca Finca Brasil	4.26
Figura 4.24.	Uso del suelo de café con sombra prevaeciente en la nanocuenca Hannover	4.27
Figura 4.25.	Uso del suelo de maíz (en el 56 % de la superficie) y de acahual (44 %) en la Nanocuenca Berriozábal	4.27
Figura 4.26.	Muestreo del suelo en las nanocuenclas Rosita y Finca Brasil	4.28
Figura 4.27.	Instrumentación de la Nanocuenca Rosita con pluviógrafo y aforador tipo H con limnógrafo integrado	4.30
Figura 4.28.	Instrumentación de la Nanocuenca Finca Brasil con pluviógrafo y aforador tipo H con limnógrafo integrado	4.31
Figura 4.29.	Instrumentación de la Nanocuenca Finca Hannover con pluviógrafo y aforador tipo H con limnógrafo integrado	4.31
Figura 4.30.	Instrumentación de la Nanocuenca Berriozábal con pluviógrafo y aforador tipo H con limnógrafo integrado	4.32
Figura 4.31.	Esquematación del pluviómetro y pluviógrafo tipo Hellmann, como los instalados en las nanocuenclas de estudio	4.33
Figura 4.32.	Dimensiones del aforador tipo H definidas por Holtan <i>et al.</i> , (1962), citados por Ortíz (1982)	4.33
Figura 4.33.	Muestreo de los suelos de las cuencas para su caracterización y determinación del factor K de la EUPS	4.37
Figura 4.34.	Empleo del modelo digital de elevaciones para la determinación de la longitud L y la pendiente S de la ladera para el cálculo del factor LS	4.39
Figura 4.35.	Cálculo y almacenamiento del factor LS como mapa con las herramientas de ArcView para su empleo en el cálculo del Ps con la TAM	4.39

Figura 4.36.	Mapa del factor L para la cuenca Coatán empleado en el álgebra de mapas para el cálculo de la P_s	4.40
Figura 4.37.	Visualización de las imágenes del satélite Landsat 4 de la NASA de noviembre de 1990 empleada para la determinación del parámetro C de la EUPS	4.42
Figura 4.38.	Denominación y ubicación de las imágenes del satélite francés Spot empleadas para determinar el uso del suelo de las cuencas	4.43
Figura 4.39.	Visualización del mosaico de imágenes del satélite francés Spot de noviembre de 2005 empleadas para determinar el factor C de la EUPS y delimitación de las áreas de estudio de las tres cuencas	4.44
Figura 4.40.	Muestra de pluviograma (del evento de 20 de agosto) para la nanocuenca Rosita que se procesaron para obtener las láminas precipitadas	4.53
Figura 4.41.	Muestra de un limnigrama en la nanocuenca Finca Brasil que se procesó para obtener las láminas escurridas	4.53
Figura 4.42.	Comportamiento simultáneo de la lámina precipitada (L_p) y de la lámina escurrida (L_e) para las cuatro nanocuenas estudiadas	4.54
Figura 4.43.	Correlación de la lámina escurrida (L_e) y la lámina precipitada (L_p) para las cuatro nanocuenas estudiadas	4.55
Figura 4.44.	Correlación entre el número de curva (N_c) y la lámina precipitada (L_p) para las cuatro nanocuenas estudiadas	4.59
Figura 4.45.	Comportamiento de los N_c calculados con datos de campo y los de tablas, corregidos por humedad antecedente por las fórmulas del SCS, Chow y Dal-Ré y por pendiente para las cuatro Nanocuenas	4.66
Figura 5.1.	Uso de suelo en febrero de 1990 (A), febrero (B) y noviembre (C) de 2005 en la cuenca del Río Huehuetán, Chiapas.	5.7
Figura 5.2.	Mapa de erosión para el escenario 3 en la cuenca del Río Huixtla	5.9
Figura 5.3.	Distribución de las tasas de pérdida de suelo para las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán.	5.10
Figura 5.4.	Localización de las nanocuenas en la Cuenca Huixtla en el estado mexicano de Chiapas	5.18
Figura 5.5.	Localización de la Cuenca del Río Huixtla en el estado mexicano de Chiapas	5.30
Figura 5.6.	Mapas codificados para Uso del Suelo, Condición Hidrológica y Grupo Hidrológico	5.32
Figura 5.7.	Esquematación de la aplicación de la TAM para generar la capa NÚMERO DE CURVA	5.34
Figura 5.8.	Plano de L_e calculado por el Modelo Distribuido para las Subcuencas de la Cuenca Huixtla	5.36

ÍNDICE DE CUADROS

NÚM.	TÍTULO	PÁG.
Cuadro 2.1.	Clasificación y denominación de los parámetros físicos y fisiográficos de una cuenca de acuerdo con Galicia (2010)	2.7
Cuadro 2.2.	Principales factores que condicionan y determinan los procesos erosivos debidos al agua y sus efectos (Porta, <i>et al.</i> 1999)	2.51
Cuadro 2.3.	Clasificación de los sistemas de sensores remotos con base en la tecnología aplicada	2.71
Cuadro 2.4.	Principales características de los satélites LANDSAT	2.73
Cuadro 2.5.	Características de las bandas del espectro electromagnético empleadas por el ETM+ del LANDSAT 7	2.74
Cuadro 2.6.	Características de los sensores del satélite SPOT 5 y su comparación con las del LANDSAT 7	2.77
Cuadro 2.7.	Precipitaciones registradas en estaciones de la zona costera de Chiapas los días de la ocurrencia del huracán Stán en octubre de 2005	2.90
Cuadro 2.8.	Afectaciones ocasionadas por los eventos extraordinarios de septiembre de 1998 y octubre de 2005 (Fuente: CENAPRED)	2.90
Cuadro 2.9.	Usos de suelos definidos por CONAGUA/UACH (2006), para las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán para su condición en 2005	2.93
Cuadro 2.10.	Valores promedio de número de curva definidos por CONAGUA/UACH (2006), para las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán	2.94
Cuadro 2.11.	Valores promedio de número de curva obtenidos por Arellano (2012) para tres nanocuenas de la Cuenca Alta del Río Huehuetán Chiapas	2.95
Cuadro 4.1.	Gastos máximos estimados para los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán para los periodos de retorno (<i>PR</i>) analizados	4.10
Cuadro 4.2.	Parámetros fisiográficos principales de las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán	4.15
Cuadro 4.3.	Parámetros fisiográficos determinados o consultados para las nanocuenas estudiadas	4.23
Cuadro 4.4.	Resultados del análisis de suelos de la Nanocuenca Rosita	4.28
Cuadro 4.5.	Resultados del análisis de suelos de la Nanocuenca Finca Brasil	4.29
Cuadro 4.6.	Nombres, localización y periodos de datos de las estaciones meteorológicas del SMN empleadas para la información pluviométrica para el cálculo del factor <i>R</i>	4.35
Cuadro 4.7.	Localización de estaciones meteorológicas de las Fincas cafetaleras cuyos datos de precipitación se emplearon también para el cálculo del factor <i>R</i>	4.35

Cuadro 4.8.	Valores precipitación empleados y del factor R de la EUPS calculados con la ecuación de Baumann (2007)	4.36
Cuadro 4.9.	Datos promedio de contenido de materia orgánica (MO) y clasificación textural presentes en la Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán (CONAGUA/UACH, 2006)	4.37
Cuadro 4.10.	Valores del factor K de la EUPS para las tres cuencas de estudio	4.38
Cuadro 4.11.	Valores estadísticos de los factores L , S y LS determinados para las tres cuencas de estudio	4.40
Cuadro 4.12.	Clases de uso del suelo presentes en la Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, en noviembre de 2005	4.44
Cuadro 4.13.	Valores del factor C de la EUPS aplicables a las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán con base en los tipos de uso del suelo determinados para cada una	4.45
Cuadro 4.14.	Tasa de erosión para los cuatro escenarios analizados en la Cuenca Huixtla	4.45
Cuadro 4.15.	Tasa de erosión para los cuatro escenarios analizados en la Cuenca Huehuetán	4.46
Cuadro 4.16.	Tasa de erosión para los cuatro escenarios analizados en la Cuenca Coatán	4.46
Cuadro 4.17.	Ubicación del sitio de medición de las Nanocuencas Rosita, Finca Brasil y Berriozábal en la Cuenca del Río Huixtla (CONAGUA y UAQ, 2008)	4.47
Cuadro 4.18.	Denominación y principales características de las sitios de medición pluviográfica e hidrométrica de las nanocuencas de estudio	4.50
Cuadro 4.19.	Valores calculados del gasto, volumen, lámina escurrida y lámina precipitada para la Nanocuenca Rosita	4.52
Cuadro 4.20.	Denominación, símbolo y unidad de las variables empleadas en el cuadro 4.19 y en el análisis de los datos reportados en él	4.54
Cuadro 4.21.	Expresiones del tipo polinomial y grado de correlación entre la lámina escurrida (Le) y la lámina precipitada (Lp) para las cuatro nanocuencas estudiadas	4.55
Cuadro 4.22.	Valores calculados del número de curva Nc a partir de datos de campo para la Nanocuenca Rosita	4.57
Cuadro 4.23.	Valores estadísticos de los calculados del número de curva Nc a partir de datos de campo para las cuatro nanocuencas estudiadas	4.58
Cuadro 4.24.	Expresiones del tipo polinomial y grado de correlación entre el Número de Curva Nc y la lámina precipitada Lp , para las 4 nanocuencas estudiadas	4.58
Cuadro 4.25.	Tipo de cubierta vegetal definida para las nanocuencas para definir sus correspondientes números de curva a partir de la tabla 2.6 o 2.7	4.60
Cuadro 4.26.	Determinación del número de curva de tablas (Nc_2) para las nanocuencas a partir de sus características y de las tablas del SCS y Arellano (2012)	4.60

Cuadro 4.27.	Cálculo de la corrección del N_c por la condición de humedad antecedente para la Nanocuenca Rosita	4.61
Cuadro 4.28.	Valores extremos y medios de la corrección del N_c por la condición de humedad antecedente para las cuatro Nanocuenclas estudiadas	4.62
Cuadro 4.29.	Valores de N_c corregidos por pendiente ($Sc = 23.87 \%$) y por humedad antecedente para la Nanocuenca Rosita	4.64
Cuadro 4.30.	Valores promedios de los N_c corregidos por pendiente y por humedad antecedente para las cuatro Nanocuenclas estudiadas	4.65
Cuadro 4.31.	Valores promedios de los N_c corregidos por pendiente y por humedad antecedente para las cuatro Nanocuenclas estudiadas y su comparativo con los valores obtenidos con datos de campo	4.67
Cuadro 4.32.	Coeficiente de escurrimiento medido Cem , calculado con los datos de campo de lámina escurrida Le y lámina precipitada Lp para la Nanocuenca Rosita	4.71
Cuadro 4.33.	Cálculo del Coeficiente de Escurrimiento Ce con las definiciones de la NOM CNA 011 para las cuatro Nanocuenclas estudiadas	4.72
Cuadro 4.34.	Cálculo del Coeficiente de Escurrimiento Ce con las definiciones de la NOM CNA 011 con correcciones propuestas de Ke para la obtención de los valores esperados	4.73
Cuadro 4.35.	Subcuenclas en que se dividió la Cuenca Huixtla y para las que se determinó el volumen de escurrimiento por los Modelos Distribuido y Agregado	4.75
Cuadro 4.36.	Definición del número de base 10, con múltiplos de 1000 al elemento de Uso de Suelo para la determinación del N_c para la Cuenca Huixtla	4.77
Cuadro 4.37.	Definición del número de base 10, con múltiplos de 100 a los elementos de la Condición Hidrológica para la determinación del N_c para la Cuenca Huixtla	4.78
Cuadro 4.38.	Definición del número de base 10, con múltiplos de 10 para el elemento de los Grupos Hidrológicos del suelo para la Cuenca Huixtla	4.79
Cuadro 4.39.	Definición de los números de base 10 y sus correspondientes números de curva considerando uso del suelo, condición hidrológica y grupo hidrológico	4.80
Cuadro 4.40.	Magnitud de la precipitación del ciclón tropical Stán tomados para el cálculo de la lámina escurrida y el volumen escurrido	4.82
Cuadro 4.41.	Magnitud de la precipitación de los cinco días previos al ciclón tropical Stán considerados como humedad antecedente (HA_5) para corregir el N_{c2}	4.82
Cuadro 4.42.	Cálculo de la lámina escurrida Le y del volumen escurrido en las subcuenclas (Ves) de la Cuenca Huixtla por el Modelo Distribuido	4.83
Cuadro 4.43.	Cálculo de la lámina escurrida Ley del volumen escurrido en las subcuenclas (Ves) de la Cuenca Huixtla por el Método Agregado	4.85

Cuadro 4.44.	Discretización de la pendiente de la cuenca (Sc), y valores propuestos del NB_{10} para el empleo de este parámetro en el cálculo de la Nc por la TAM	4.88
Cuadro 5.1.	Tasa de erosión por superficie afectada para los cuatro escenarios y para las tres cuencas	5.8
Cuadro 5.2.	Valores del número de curva (Nc) definidos por el SCS y reportados por McCuen (2005) y campos (2002)	5.14
Cuadro 5.3.	Localización y características de las nanocuenas Rosita, Hannover y Berriozábal	5.18
Cuadro 5.4.	Valores estadísticos de Sr y Nc a partir de datos de campo de Lp y Le para las tres nanocuenas	5.19
Cuadro 5.5.	Definición del Nc_2 a partir de sus características de las nanocuenas estudiadas	5.19
Cuadro 5.6.	Valores de Nc corregidos por HA y por pendiente para las nanocuenas y expresiones estudiadas	5.20
Cuadro 5.7.	Valores corregidos por HA y por Nc y las diferencias con las que deben corregirse los valores de tablas	5.21
Cuadro 5.8.	Valores del número de curva (Nc) para uso forestal del suelo (McCuen, 2005)	5.27
Cuadro 5.9.	Definición del NB_{10} , al elemento de Uso de Suelo para la determinación del Nc	5.32
Cuadro 5.10.	Definición de los NB_{10} y sus correspondientes Nc considerando Uso del Suelo, la Condición Hidrológica y el Grupo Hidrológico	5.33
Cuadro 5.11.	Humedad antecedente (HA) y magnitud de la precipitación del ciclón tropical Stán (Pr)	5.35
Cuadro 5.12.	Números de base 10 (NB_{10}), y volúmenes de escurrimiento (Ve), para las subcuencas de la Cuenca Huixtla, calculados por los Modelos Distribuido y Agregado	5.36
Cuadro 6.1.	Resumen de valores de Nc , con las correcciones por HA y por pendiente obtenidos por las expresiones del SCS, Chow y Dal-Ré	6.4
Cuadro 6.2.	Correcciones a aplicar a los valores obtenidos de tablas para las Nanocuenas estudiadas y con correcciones calculadas por las expresiones del SCS, Chow y Dal-Ré	6.7

ÍNDICE DE TABLAS

NÚM.	TÍTULO	PÁG.
Tabla 2.1.	Valores del coeficiente n en la ecuación de Manning para cauces naturales (Fuente: Sotelo, 2002)	2.27
Tabla 2.2.	Valores de C_e para las cuencas mexicanas, según su cubierta vegetal, su superficie y la precipitación media anual (SRH, 1970)	2.28
Tabla 2.3.	Características del tipo de suelo para la determinación del coeficiente K para el cálculo del coeficiente de escurrimiento, DOF (2002)	2.30
Tabla 2.4.	Valores de K_e , según el tipo y uso de suelo para el cálculo del C_e con base en la norma NOM-011-CNA-2000 DOF, (2002)	2.30
Tabla 2.5.	Valores de porosidad (P_r) y de Conductividad hidráulica a saturación (K_s) para los grupos hidrológicos de suelos	2.32
Tabla 2.6.	Valores del número de curva (N_c) para uso forestal del suelo	2.35
Tabla 2.7.	Valores del número de curva de escurrimiento (N_c) para uso agrícola del suelo	2.36
Tabla 2.8.	Valores del número de curva (N_c) para diferentes condiciones de bosque (Campos, 2010)	2.37
Tabla 2.9.	Códigos para la estructura del suelo para determinar el valor de K a partir del nomograma de la figura 2.20	2.57
Tabla 2.10.	Códigos para la permeabilidad del suelo dada por su conductividad hidráulica (K_h) para determinar el factor valor de K con el nomograma de la figura 2.20	2.58
Tabla 2.11.	Valores del factor de erodabilidad K de la EUPS a partir de la textura del suelo y su contenido de materia orgánica (MO)	2.58
Tabla 2.12.	Determinación del factor C , a partir de la cubierta vegetal y de la cobertura a nivel superficial	2.61
Tabla 2.13.	Valores medios anuales de C utilizados para la estimación de la erosión hídrica actual en el estado de Chiapas, Arellano (1994)	2.63
Tabla 2.14.	Valores medios anuales de C utilizados para la estimación de la erosión hídrica actual en el estado de Chiapas, Arellano (2005)	2.64
Tabla 2.15.	Valores del factor P para prácticas de surcado en contorno y terrazas en distintas pendientes y para diferentes separaciones	2.65
Tabla 2.16.	Valores del factor P , ancho máximo de fajas y límites de longitud de pendiente para fajas en contorno	2.65
Tabla 2.17.	Valores del factor P para campos con terrazas a nivel	2.66
Tabla 2.18.	Clasificación de la magnitud de la tasa de erosión definida por la FAO	2.67
Tabla 2.19.	Clasificación de la magnitud de la tasa de erosión propuesta por CONAGUA/UACH (2006) y por el autor para valores mayores a $200 \text{ t x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$	2.67

Tabla 4.1.	Clases texturales, su relación con el grupo hidrológico y su equivalencia con la clasificación del INEGI para las cuencas de estudio	4.37
------------	--	------

ÍNDICE DE GRÁFICAS

NÚM.	TÍTULO	PÁG.
Gráfica 4.1.	Comportamiento de la precipitación media mensual a lo largo del año en la Cuenca Huixtla	4.48
Gráfica 4.2.	Comportamiento histórico de la precipitación total anual en la Cuenca Huixtla	4.49
Gráfica 4.3.	Comportamiento gráfico de la expresión 2.28 para el cálculo de C_e atendiendo la NOM CNA 011 para diversos valores de K_e menores e igual a 0.15	4.69
Gráfica 4.4.	Comportamiento gráfico de la expresión 2.28 para el cálculo de C_e atendiendo la NOM CNA 011 para diversos valores de K_e mayores a 0.15	4.69
Gráfica 4.5.	Comportamiento de la expresión 2.45, desarrollada por Williams (1995) y citada por Neitsch, <i>et al.</i> (2001) para calcular el efecto de la pendiente de la cuenca en el N_c	4.88

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1. DATOS DE CAMPO Y RESULTANTES DEL ANÁLISIS PARA LAS NANOCUENCAS DE ESTUDIO

Cuadro A.1.	Valores calculados del gasto, volumen, lámina escurrida y lámina precipitada para la Nanocuenca Finca Brasil	A.2
Cuadro A.2.	Valores calculados del gasto, volumen, lámina escurrida y lámina precipitada para la Nanocuenca Finca Hannover	A.3
Cuadro A.3.	Valores calculados del gasto, volumen, lámina escurrida y lámina precipitada para la Nanocuenca Berriozábal	A.6
Cuadro A.4.	Valores calculados del número de curva a partir de datos de campo para la Nanocuenca Finca Brasil	A.7
Cuadro A.5.	Valores calculados del número de curva a partir de datos de campo para la Nanocuenca Hannover	A.8
Cuadro A.6.	Valores calculados del número de curva a partir de datos de campo para la Nanocuenca Berriozábal	A.11
Cuadro A.7.	Cálculo de la corrección del N_c por la condición de humedad antecedente para la Nanocuenca Finca Brasil	A.12
Cuadro A.8.	Cálculo de la corrección del N_c por la condición de humedad antecedente para la Nanocuenca Hannover	A.13
Cuadro A.9.	Cálculo de la corrección del N_c por la condición de humedad antecedente para la Nanocuenca Berriozábal	A.16
Cuadro A.10.	Valores de N_c corregidos por pendiente ($Sc = 41.24 \%$) y por humedad antecedente para la Nanocuenca Finca Brasil	A.17
Cuadro A.11.	Valores de N_c corregidos por pendiente ($Sc = 23.76 \%$) y por humedad antecedente para la Nanocuenca Hannover	A.17
Cuadro A.12.	Valores de N_c corregidos por pendiente ($Sc = 23.0 \%$) y por humedad antecedente para la Nanocuenca Berriozábal	A.21
Cuadro A.13.	Diferencias (o error ΔN_c) entre los valores de N_c de tablas corregidos por humedad antecedente y pendiente y los obtenidos con datos de campo para la Nanocuenca Rosita	A.22
Cuadro A.14.	Diferencias (o error ΔN_c) entre los valores de N_c de tablas corregidos por humedad antecedente y pendiente y los obtenidos con datos de campo para la Nanocuenca Finca Brasil	A.23
Cuadro A.15.	Diferencias (o error ΔN_c) entre los valores de N_c de tablas corregidos por humedad antecedente y pendiente y los obtenidos con datos de campo para la Nanocuenca Hannover	A.24
Cuadro A.16.	Diferencias (o error ΔN_c) entre los valores de N_c de tablas corregidos por humedad antecedente y pendiente y los obtenidos con datos de campo para la Nanocuenca Berriozábal	A.27
Cuadro A.17.	Cálculo de valores reales del Coeficiente de Escurrimiento medido Cem , con los datos de campo de lámina escurrida Le y lámina precipitada Lp para la Nanocuenca Finca Brasil	A.28

Cuadro A.18.	Cálculo de valores reales del Coeficiente de Escurrimiento medido Cem, con los datos de campo de lámina escurrida L_e y lámina precipitada L_p para la Nanocuenca Hannover	A.29
Cuadro A.19.	Cálculo de valores reales del Coeficiente de Escurrimiento medido Cem, con los datos de campo de lámina escurrida L_e y lámina precipitada L_p para la Nanocuenca Berriozábal	A.32

ANEXO 2 PLANOS GENERADOS

NÚM.	TÍTULO
1 DE 28	LOCALIZACIÓN DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN, DE LA COSTA DE CHIAPAS
2 DE 28	DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO
3 DE 28	HIDROLOGÍA DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN, DE LA COSTA DE CHIAPAS
4 DE 28	PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENTA ROSITA
5 DE 28	PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENTA FINCA BRASIL
6 DE 28	PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENCA HANNOVER
7 DE 28	PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENCA BARRIOZÁBAL (CONAGUA UAQ, 2008)
8 DE 28	PLANO DE USO DE SUELO DE LA NANOCUENCA ROSITA
9 DE 28	PLANO DE USO DE SUELO DE LA NANOCUENCA FINCA BRASIL
10 DE 28	PLANO DE USO DEL SUELO DE LA NANOCUENCA BERRIOZÁBAL (CONAGUA UAQ, 2008)
11 DE 28	USO DE SUELO DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 1990
12 DE 28	USO DE SUELO DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA FEBRERO DE 2005
13 DE 28	USO DE SUELO DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 2005
14 DE 28	TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 1990
15 DE 28	TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA FEBRERO DE 2005
16 DE 28	TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 2005
17 DE 28	PLANO DE ISOYETAS PARA LA CUENCA HUIXTLA
18 DE 28	PLANO DE CONDICIÓN HIDROLÓGICA DE LA NANOCUENCA ROSITA
19 DE 28	PLANO DE CONDICIÓN HIDROLÓGICA DE LA NANOCUENCA FINCA DE BRASIL
20 DE 28	SUBCUENCAS DE LA CUENCA HUIXTLA Y SUS SUPERFICIES
21 DE 28	PLANO CODIFICADO DE USO DEL SUELO DE LA CUENCA HUIXTLA
22 DE 28	PLANO CODIFICADO DE CONDICIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA HUIXTLA

- 23 DE 28 PLANO CODIFICADO PARA EL GRUPO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA HUIXTLA
- 24 DE 28 NÚMEROS DE CURVA NC_2 PARA LA CUENCA HUIXTLA DETERMINADOS POR SIG, NB10 Y TAM
- 25 DE 28 PLANO DE PRECIPITACIÓN DEL HURACÁN STÁN DE LA CUENCA HUIXTLA
- 26 DE 28 NÚMEROS DE CURVA CORREGIDOS POR HUMEDAD ANTECEDENTE NC_3 PARA LA CUENCA HUIXTLA
- 27 DE 28 PARÁMETRO DE RETENCIÓN PARA LA CUENCA HUIXTLA
- 28 DE 28 VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO DETERMINADO POR EL MÉTODO DISTRIBUIDO EMPLEANDO SIG, TAM Y Nc

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

SIGLA	SIGNIFICADO
APAR	Cantidad Absorbida de Radiación Fotosintéticamente Activa
ARS	Agriculture Research Service del USDA
ASPRS	American Society for Photogrammetry and Remote Sensing
ATLAS	Airborne Terrestrial Applications Sensor
CASI-2	Canadian Compact Airborne Spectrographic Imager-2
CENAPRED	Centro Nacional de Prevención de Desastres
CONAGUA	Comisión Nacional del Agua
DOF	Diario Oficial de la Federación
ERIC	Extractor Rápido de Información Climatológica
ERTS	Earth Resources Technology Satellites
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ETM	Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus
EUPS	Ecuación Universal de Pérdida de Suelo
FAO	Food and Agriculture Organization
GDDT	Gerencia de Distritos de Temporal Tecnificado
GIRH	Gestión Integral de Recursos Hídricos
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
GVI	Índice de Vegetación Verde
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System
HRV	High Resolution Visible sensors
HRVIR	High Resolution Visible Infrared Vegetation Sensor
IAF	Índice de Área Foliar
ICR	Banda del infrarrojo cercano (Near Infrared NIR) del sistema satelital LANDSAT
IFOV	Instantaneous Field of View
IMTA	Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (actualmente Instituto Nacional de Estadística y Geografía)
IRL	Banda infrarroja lejana del sistema satelital LANDSAT

IRM	Banda Infrarroja media del sistema satelital LANDSAT
IV	Índice de Vegetación (VI por sus siglas en el idioma inglés)
LAN	Ley de Aguas Nacionales de México
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
MIC	Manejo Integral (o Integrado) de Cuencas
MODIS	Terra Moderate Resolution Imaging Spectrometer
MSS	Landsat Multispectral Scanner
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OCFS	Organismo de Cuenca Frontera Sur de la CONAGUA
PR	Precepción Remota
RAFA	Radiación Absorbida Fotosintéticamente Activa
RDI	Índice de Relación de Vegetación
SCS	Soil Conservation Service del USDA
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales
SIG	Sistema de Información Geográfica
SIGSA	Sistemas de Información Geográfica S. A.
SMN	Servicio Meteorológico Nacional
SPLCA	Sistema de Puntos y Líneas de Control y Apoyo
SPOT	Système Pour l'Observation de la Terre
SR	Sensores Remotos
SRH	Secretaría de Recursos Hidráulicos
SWAT	Soil and Water Assessment Tools
TAM	Técnica de Álgebra de Mapas
TM	Landsat Thematic Mapper
TSAVI	Índice de Vegetación Ajustado por Suelo Transformado
UACH	Universidad Autónoma Chapingo
UAQ	Universidad Autónoma de Querétaro
UNACH	Universidad Autónoma de Chiapas
USACE	United States Army of Corps Engineers
USDA	United States Department Agriculture
USLE	Universal Soil Loss Equation
WDVI	Índice de Vegetación de Diferencias de Peso
WEPP	Water Erosion Prediction Project

LISTA DE VARIABLES

SÍMBOLO	SIGNIFICADO	UNIDAD
a	Contenido de materia orgánica para determinar la erosionabilidad del suelo	%
α_h	Ángulo de la pendiente de la ladera	grad
Δh	Desnivel entre el inicio y el final del cauce principal	km, m
Ac	Área de la cuenca	km ² , ha, m ²
Asc	Área de la subcuenca	km ² , ha, m ²
As	Almacenamiento superficial	mm, m
b	Clave para la estructura del suelo para determinar la erosionabilidad del suelo	adim
c	Tipo de permeabilidad o conductividad hidráulica del perfil para determinar la erosionabilidad del suelo	adim
C	Factor de cobertura y manejo de la EUPS	adim
CC	Contenido de humedad gravimétrico del suelo a Capacidad de Campo	%
C_1	Coefficiente para corregir el efecto del aerosol de la banda roja en el EVI	adim
C_2	Coefficiente para corregir el efecto del aerosol de la banda azul en el EVI	adim
Ce	Coefficiente de escurrimiento	%, adim
Cem	Coefficiente de escurrimiento calculado a partir de la expresión de la NOM-CNA-011	%, adim
Cem	Coefficiente de escurrimiento calculado con datos medidos en campo con la expresión de la definición	%, adim
Cep	Coefficiente de escurrimiento promedio	%, adim
C_{min}	Es el mínimo valor del factor de cobertura y manejo del suelo cubierto	adim
C_{pa}	Es el promedio anual del factor C para la cubierta del suelo	
D	Profundidad de la estructura aforadora tipo H	m
Dd	Densidad de drenaje de la cuenca	adim
DH	Distancia horizontal entre el inicio y el final del cauce principal	km, m
Dh	Densidad hidrográfica	adim
e	Equidistancia vertical entre curvas de nivel	km, m
E	Energía cinética total de la lluvia	m t m ⁻²
Eb	Escurrecimiento base	mm
EI_{30}	Índice de erosividad la lluvia con intensidad de 30 mmxh ⁻¹	MJxha ⁻¹ xmmxh ⁻¹
$ElevC$	Elevación media de la cuenca	msnm

<i>Es</i>	Escurrimiento superficial	mm
<i>ET</i>	Escurrimiento total	mm
<i>Et</i>	Evapotranspiración	mm
<i>Eu</i>	Escurrimiento subsuperficial	mm
<i>EVI</i>	Índice de Vegetación Realzada	adim
<i>FG</i>	Factor grueso de la EUPS	adim
<i>HA</i>	Humedad antecedente	mm
<i>HA₅</i>	Humedad antecedente de los últimos 5 días	mm
<i>ha</i>	Carga hidráulica en la salida de la estructura aforadora tipo H3	m
<i>Hf</i>	Carga hidráulica en el frente de humedecimiento	cm
<i>Hi</i>	Hora de inicio de la tormenta	h:min
<i>Ht</i>	Hora de término de la tormenta	h:min
<i>Hs</i>	Carga hidráulica de las superficie del suelo	cm
<i>I</i>	Velocidad de infiltración	cmxh ⁻¹
<i>I₃₀</i>	Intensidad máxima de lluvia en 30 minutos	
<i>Ic</i>	Intercepción	mm, m
<i>In</i>	Lámina infiltrada	mm, m
<i>If</i>	Índice de forma	adim
<i>IPVI</i>	Índice de Vegetación para el Porcentaje Infrarrojo	adim
<i>K</i>	Factor de erosionabilidad del suelo de la EUPS	txh×MJ ⁻¹ ×mm ⁻¹
<i>Ke</i>	Parámetro del suelo para escurrimiento	adim
<i>Kh</i>	Conductividad hidráulica del suelo	cm/h
<i>Ks</i>	Coefficiente de sinuosidad	adim
<i>Ksat</i>	Conductividad hidráulica a saturación	cm/h
<i>L</i>	Factor del grado de longitud en la EUPS	adim
<i>Lc</i>	Longitud de la cuenca	km, pie
<i>Lcp</i>	Longitud del cauce principal	km o m
<i>Le</i>	Lámina escurrida	mm o m
<i>Lf</i>	Corrección del efecto del fondo del follaje	adim
<i>LI</i>	Longitud de la pendiente de la ladera	m
<i>Ln</i>	Longitud total de las curvas de nivel	km, m
<i>Lp</i>	Lámina precipitada	mm o m
<i>Lr</i>	Longitud del cauce en línea recta	adim
<i>LS</i>	Factor topográfico de la EUPS	
<i>Lx</i>	Longitud total de las líneas de la malla en la dirección x, comprendidas dentro de la cuenca	m
<i>Ly</i>	Longitud total de las líneas de la malla en la dirección y, comprendidas dentro de la cuenca	m
<i>m</i>	Número de eventos cuya intensidad es mayor que 30 mmxh ⁻¹	
<i>M</i>	Parámetro de tamaño de la partícula para definir la erosionabilidad del suelo	

m_A	Contenido porcentual de arcillas (cuyos diámetros son de menos de 0.002 mm)	%
m_C	Contenido porcentual de arenas muy finas (cuyos diámetros son de 0.05 a 0.10 mm)	%
m_L	Contenido porcentual de limos (partículas cuyos diámetros son de 0.002 a 0.05 mm)	%
ml	Término exponencial del factor L de la EUPS	
MO	Contenido de materia orgánica del suelo	%
$MSAVI$	Índice de Vegetación Ajustado por el Suelo Modificado	adim
n	Coefficiente de rugosidad de Manning	adim
NB_{10}	Número de base 10	adim
N_c	Número de curva de escurrimiento del SCS	adim
N_{c_1}	Número de curva de escurrimiento corregido por HA_5 menor de 50 mm	adim
N_{c_2}	Número de curva de escurrimiento tomado de tablas del SCS o similares	adim
N_{c_3}	Número de curva de escurrimiento corregido por HA_5 mayor de 50 mm	adim
$N_{c_{3S}}, N_{c_{3S}}$	Número de curva de escurrimiento corregido por humedad antecedente y por pendiente	adim
ND	Número digital	
$NDVI$	Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas	adim
N_o	Número de orden de las corrientes	
N_x	Número total de intersecciones x tangencias de las líneas de la malla en dirección x, con las curvas de nivel	
N_y	Número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en dirección y, con las curvas de nivel	
O_c	Índice de orden de la corriente	
θ_s	Contenido volumétrico de humedad del suelo a saturación	m^3/m^3
θ_0	Contenido volumétrico inicial de humedad del suelo	m^3/m^3
P	Factor de prácticas de manejo del suelo en la EUPS	adim
P_e	Precipitación efectiva	mm
P_{ea}	Peso específico aparente	g/cm^3
P_f	Parámetro de forma de una cuenca	m^{-1}
P_m	Perímetro mojado	m
P_{ma}	Precipitación media anual	mm, m
PMP	Contenido de humedad gravimétrico del suelo a Capacidad de Campo	%
P_p	Percolación profunda o escurrimiento subterráneo	mm
P_r	Precipitación	mm, m

<i>Ps</i>	Tasa de erosión o de pérdida de suelo	$\text{txha}^{-1}\text{xaño}^{-1}$
<i>Pt</i>	Perímetro total de la cuenca	km, m
<i>PVI</i>	Índice Perpendicular de Vegetación	adim
<i>Pz</i>	Profundidad de raíz de los cultivos	m
<i>q</i>	Gasto unitario de escurrimiento	m^3xs^{-1} , Lxs^{-1}
<i>Q</i>	Gasto de escurrimiento total en un cauce o corriente	m^3xs^{-1} , Lxs^{-1}
<i>Qmáx</i>	Gasto máximo de una corriente o cauce	m^3xs^{-1} , Lxs^{-1}
<i>qp</i>	Gasto unitario escurrido	m^3xs^{-1} , Lxs^{-1}
<i>Qp</i>	Gasto pico en un hidrograma o limnigrama	m^3xs^{-1} , Lxs^{-1}
<i>qs</i>	Gasto de escurrimiento pico	m^3xs^{-1}
<i>Qs</i>	Magnitud del escurrimiento superficial en la EUPS	mm/ha
<i>qs</i>	Gasto de escurrimiento pico	m^3xs^{-1}
<i>R</i>	Factor de erosividad de la lluvia en la EUPS	$\text{MJxmmxha}^{-1}\text{xh}^{-1}\text{xaño}^{-1}$
<i>r</i>	Relación (o radio) hidráulica	m
<i>R²</i>	Coefficiente de correlación de variables	adim
<i>Re</i>	Recarga	mm
<i>Rb</i>	Relación de bifurcación	
<i>Rs</i>	Cantidad de residuo en la superficie del suelo	kgxha^{-1}
<i>RVI</i>	Índice de Vegetación Relacionado	adim
<i>S</i>	Factor del grado de pendiente en la EUPS	adim
<i>SAVI</i>	Índice de Vegetación Ajustado por el Suelo	
<i>Sc</i>	Pendiente media de la cuenca	mxm^{-1}
<i>SC</i>	Superficie de cobertura	ha o %
<i>Scp</i>	Pendiente del cauce principal	%, adim
<i>Sf</i>	Factor de fricción del frente de humedecimiento o succión efectiva capilar	cm
<i>Sl</i>	Magnitud de la pendiente de la ladera	%
<i>Sp</i>	Pérdida de suelo en un día dado	t
<i>Sr</i>	Parámetro de retención	
<i>Sx</i>	Pendiente de la cuenca en la dirección x	%, adim
<i>Sy</i>	Pendiente de la cuenca en la dirección y	%, adim
<i>S₀</i>	Pendiente longitudinal del cauce	mxm^{-1}
<i>t</i>	Tiempo en general de ocurrencia de un evento	h, s
<i>Ta</i>	Tiempo para el que se mide la humedad antecedente	día
<i>Tb</i>	Tiempo base	h, s
<i>Ti</i>	Tiempo en el que se da el proceso de infiltración	h, s
<i>Tp</i>	Tiempo pico	h, s
<i>Tr</i>	Tiempo de recesión	h, s
<i>TSAVI</i>	Índice de Vegetación Ajustado por Suelo Transformado	adim
<i>Tt</i>	Tiempo total	h, s
<i>Uc</i>	Uso consuntivo	mm

<i>v</i>	Velocidad del flujo en un conducto o cauce	$\text{m}\times\text{s}^{-1}$
<i>vc</i>	Velocidad de la creciente	$\text{m}\times\text{s}^{-1}$
<i>Ve</i>	Volumen de escurrimiento	m^3
<i>Vema</i>	Volumen de escurrimiento medio anual	m^3
<i>Ves</i>	Volumen de escurrimiento de la subcuenca	m^3
<i>Vp</i>	Volumen precipitado	m^3
<i>y</i>	Tirante en el canal o cauce	m

1. INTRODUCCIÓN

1.1. LOS RECURSOS NATURALES, EN EMINENTE AGOTAMIENTO

Tanto el origen como el manejo y, por lo tanto, el agotamiento y la preservación de los recursos agua, suelo y bosque están amplia y estrechamente relacionados; y la problemática de su deterioro en todos los órdenes, niveles y espacios por la influencia del hombre al usarlos de manera irracional, desordenada y no sustentable y por el impacto de los fenómenos meteorológicos extremos, se ha acentuado ampliamente en los últimos años, al grado que su degradación es irreversible en muchos casos y en diversas áreas y regiones del mundo, y que conducen a un agotamiento inminente si no se implementan acciones tanto estructurales como no estructurales para revertir los procesos que han conducido a estas circunstancias.

El ámbito geográfico en el que los fenómenos que ocurren sobre los recursos agua, suelo y vegetación, se da es la cuenca, entendida como la entidad geográficamente delimitada por un parteaguas que consiste de un complejo ecosistema en el que se presentan todos los componentes del ciclo hidrológico, con base en sus características de relieve y conformación geológica y en estrecha asociación con los demás recursos naturales que en ella se suceden, incluyendo al hombre, en la mayoría de los casos, como causante directo y principal de su deterioro y/o agotamiento.

La cuenca se puede definir como un ecosistema complejo con una dinámica ambiental propia, determinada por las interacciones sistémicas de los recursos hídricos; es decir, del agua como elemento integrador del sistema y los recursos naturales asociados a ella. Integrando el componente social a la definición y a su estudio, se puede referir que la cuenca, es también un territorio común, formado por los cauces y corrientes y las formaciones geológicas que los pueblos comparten junto con las formas de apropiación de los recursos hídricos, de modo que la cuenca es parte del legado e identidad territorial de los pueblos; es decir, la cuenca es también un territorio común socialmente apropiado (Arellano, 2012).

En efecto, el hombre con sus requerimientos y uso descontrolado e indiscriminado de los recursos, agua, suelo y bióticos en general que se suceden en una cuenca, la ha deforestado y erosionado sus suelos, y contaminado y agotado el agua, afectando incluso el ciclo hidrológico y disminuyendo su disponibilidad y calidad. Toca por lo tanto a

él, hacer lo necesario para su restauración y rehabilitación. Lamentablemente la formación, crecimiento o abundancia de todos estos recursos se dio en tiempos grandes e, incluso, geológicos, y su deterioro y agotamiento o destrucción se ha dado en tiempos muy cortos que representan décadas o cuando mucho, siglos.

A lo largo y ancho de una cuenca, los actores sociales tienen diferentes percepciones, representaciones y formas de apropiación de los recursos hídricos; sin embargo a través de su gestión, se establecen diferentes interrelaciones. Bajo esta perspectiva, la cuenca es la unidad territorial de gestión, donde los grupos sociales tienen diferentes usos, reglas de acceso y control sobre los recursos hídricos a través de instituciones formales y no formales. De esta forma, en la cuenca ocurren procesos naturales y sociales a diferentes escalas: local, comunitaria, microrregional, regional, estatal, nacional, global (Arellano, 2012).

Ante este panorama, todos estos actores sociales, así como las instituciones gubernamentales y no gubernamentales deben desarrollar e implementar una estrategia que se enfoque a estudiar y combatir la problemática de deterioro de estos recursos naturales, en la que se consideren los aspectos ambientales, sociales y económicos.

Para este fin, una primera acción de carácter no estructural, tiene que ser el diagnóstico y caracterización de la situación y problemática referida, lo cual implica la aplicación de los procesos científicos y los desarrollos tecnológicos existentes y la generación de otros nuevos, llámense, esquemas metodológicos, herramientas de análisis, algoritmos de cálculo, dispositivos o herramientas que faciliten y agilicen los procesos de cuantificación, etc., todos ellos que posibiliten su estudio amplio, completo, detallado y suficiente que conduzca al planteamiento de las acciones más apropiadas y pertinentes. Una segunda acción, también no estructural y que muy bien puede ser la primera, es la concientización de esta problemática, por los actores directos y los beneficiarios indirectos del uso de los recursos, lo cual pudiendo antojarse simple y ágil, es quizá, la más complicada y lenta, dado que tiene que ver con procesos educativos y culturales que afectan y tardan, por lo tanto, generaciones de individuos.

Las siguientes etapas, la del planteamiento de las acciones estructurales y la construcción de las obras propuestas en su caso, son relativamente simples y fáciles desde el punto de vista técnico, pero tienen que ver, lamentablemente, con la otra limitante, que es la disponibilidad de los recursos financieros.

Es de relevancia referir que, en los años recientes, sin embargo, que acaso suman un poco más de una década, se ha trabajado en las dos primeras acciones en diversas partes de mundo y por diferentes individuos, instituciones u organizaciones, generando y aplicando técnicas, tecnologías y metodologías, para el estudio de los fenómenos y

procesos de degradación de los recursos y en la generación de conciencia sobre la problemática e incluso sobre el planteamiento e implementación de acciones para revertirlos, incluyendo la construcción de obras y la implementación de prácticas diversas; lamentablemente todo ello parece muy incipiente e insignificante ante la enorme y añeja problemática.

1.2. LOS PROCESOS HÍDRICOS EROSIVOS

La erosión del suelo consiste en una pérdida gradual de los materiales que lo constituyen, al ir siendo disgregadas, arrastradas y transportadas sus partículas a medida que van quedando en su superficie (Porta, *et al.*, 1999) a merced de los agentes erosivos, de los que el viento y, sobretodo el agua, son los más agresivos y, por ello, importantes.

Por su parte Arellano (1994), define a la erosión hídrica como el proceso de degradación del suelo inducido por las actividades del hombre en los agroecosistemas, que se manifiesta con la pérdida del suelo y el abatimiento de sus niveles de productividad, y que de manera indirecta modifica las condiciones hidrológicas del ecosistema mediante la contaminación de las aguas superficiales, el azolvamiento de las áreas agrícolas y urbanas y la destrucción de la infraestructura localizada aguas abajo.

Desde que la tierra se cultivó por primera vez, la erosión del suelo por el agua y el viento ha sido un problema constante y sus consecuencias se manifiestan tanto en el lugar que se producen como fuera de él. Los efectos inmediatos son particularmente importantes en las tierras de uso agrícola, donde la redistribución y pérdida de suelo, la degradación de su estructura y el arrastre de materia orgánica y nutrientes, llevan a la pérdida de espesor del perfil y al descenso de la fertilidad (Morgan, 1997).

Los problemas relacionados con la erosión están en plena actualidad, aunque desde mucho antes ya se tenía conciencia de ello; por ejemplo en nuestro país, los mayas dañaron severamente algunos terrenos con pendientes agudas que ellos usaban para fines agrícolas y algunos arroyos se azolvaron totalmente a consecuencia de ello. Recientemente, algunos arqueólogos encontraron un complejo sistema de terrazas hechas por los mismos mayas, así como algunas presas y otras obras para derivar las aguas de los ríos, y cisternas subterráneas para su almacenamiento y posterior aprovechamiento; con estas prácticas, ellos controlaban la pérdida de suelo y podían manejar y almacenar el agua. En el valle de México también se tienen vestigios de numerosas obras no solo para controlar la erosión, sino también para manejar y almacenar el agua. Un ejemplo son las terrazas y numerosos canales que sirvieron para abastecer de agua al cerro del Tezcutzingo, en Texcoco o las diversas obras que dejaron sus vestigios en Chalco, Coyoacán, Tacubaya y en otros lugares.

Hoy día, los problemas de la erosión se consideran desde perspectivas muy amplias y, aunque se acepta sin ningún género de reservas que el mantenimiento de la productividad de las tierras agrícolas exige que esté totalmente controlada la erosión, cualquier otra actividad relacionada con el uso del suelo puede dar lugar a problemas erosivos. Por su parte, estas actividades han de ser, además, responsables de los impactos que se generen en este ámbito.

El desarrollo que han experimentado en estos últimos años la Ciencia del Suelo y otras disciplinas que puedan relacionarse con ella, como puede ser la Fitotecnia y la Producción Vegetal, la Ecología, la Hidrología, las Ingenierías Rurales, las Ciencias Agroforestales y Medioambientales y la Ingeniería Civil o Geotécnica, entre otras, que motivan que el abordar el estudio de los problemas que plantea la erosión y su posible control, solamente pueda hacerse desde conocimientos muy sólidos de estas disciplinas. Siendo así, el técnico podrá considerarlos desde una perspectiva que permita una actuación totalmente globalizadora (Morgan, 1997).

Sobre los efectos de la erosión de los suelos, Brady y Weil (1999), indican que ésta impacta reduciendo el potencial productivo y disminuye la capacidad del suelo para proveer a la población de sus beneficios, a través de la destrucción de las comunidades vegetales, de la reducción de las áreas destinadas a la agricultura y para la producción agrícola, y la simplificación de la naturaleza de los ecosistemas y, resumen el resultado final del fenómeno en pobreza, contaminación y baja productividad. Además, la erosión mueve sedimentos del suelo aguas abajo, generando problemas de contaminación de los ríos y lagos; los nutrientes impactan la calidad del agua fuertemente a través de proceso de eutricación causada por exceso de nitrógeno y fósforo, independientemente de que los nutrientes, sedimentos y escurrimientos pueden acarrear metales pesados y compuestos orgánicos tales como pesticidas.

Una forma especial de erosión hídrica que degrada de manera amplia y rápida los recursos suelos y bosque, desprotegiéndolos completamente son los llamados deslizamientos, también llamados por Suárez (2001) erosión en masa, flujo y avalanchas de tierra; éstos se presentan si se conjugan ciertas condiciones como las siguientes: fuertes pendientes, precipitaciones intensas, humedad antecedente importante, suelos con textura arenosa y/o sin estructura, y ausencia de vegetación densa y/o con raíces profundas.

Arellano (2012), define el término deslizamiento como una amplia variedad de procesos que resultan del movimiento hacia abajo de una ladera de materiales que incluyen rocas, suelo, relleno artificial, o una combinación de ellos, que se origina por fallas, desprendimiento, deslizamiento, propagación o flujo; a lo que se pueden agregar otros procesos como derribo de árboles, desplazamiento de rocas y deslizamientos de

mezclas, entre otros.

Los estudios que se han realizado en las últimas décadas por los especialistas en el área, para conocer los factores que definen y condicionan el fenómeno erosivo por el agente hídrico, han llevado a conocer que éste depende de la magnitud de la precipitación, de la vulnerabilidad del suelo a ser degradado por la lluvia, de la pendiente del terreno, de la desprotección del suelo de vegetación y de la ausencia de prácticas y acciones orientadas a reducir su manifestación e impactos; todos ellos, alcanzan su máxima expresión en áreas como las cuencas costeras del estado mexicano de Chiapas.

1.3. LA COSTA DE CHIAPAS, EN CONDICIONES EXTREMAS

Por su ubicación geográfica, el estado de Chiapas siempre ha estado sujeto a fuertes precipitaciones y a la presencia de eventos de lluvia extremos, que son base de la exuberancia de su vegetación y sus generosas reservas hídricas, pero también son causantes de afectaciones en los sistemas de producción agropecuaria y forestal al arrastrar el suelo, ocasionar daños a la infraestructura hidroagrícola, de comunicaciones y a las viviendas, y lo que es más lamentable, de pérdidas humanas, a través de los abundantes escurrimientos que se generan.

Particular relevancia en todos estos aspectos, lo constituyó en la Costa de Chiapas, la presencia de las precipitaciones extraordinarias de 1998 y del ciclón tropical Stan que se presentó en los primeros días de octubre de 2005, cuyas secuelas y daños en las condiciones de vida de la población, en el ambiente y el deterioro de los recursos naturales aun persisten. El periodo de retorno de este fenómeno meteorológico, que es, muy probablemente, el más extremo de los extremos, se estima en más de mil años; de ahí que su presencia fue inesperada, sus efectos han sido inestimables y las pérdidas causadas cuantiosas y que sea tan importante su estudio en todas sus fases, aspectos y afectaciones.

Para conocer la magnitud de las afectaciones en los recursos naturales y plantear, planear y desarrollar las acciones pertinentes para su reducción, eliminación o para revertirlas, en los años siguientes se han realizado diversos estudios, construido muchas obras e implementado multitud de acciones, orientadas a contribuir a estas metas, particularmente en las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, que resultaron de las más afectadas, en aspectos como los siguientes:

- a) La pérdida de cientos de vidas humanas.
- b) Destrucción de la infraestructura de toda índole, particularmente de vías de comunicación que dejaron incomunicada por tierra la zona por varias semanas.

- c) Reducción de la capacidad productiva de los suelos al erosionarlos
- d) Deslizamientos de grandes masas de suelo y sus coberturas, en las zonas con fuertes pendientes, que dejaron extensas áreas desprotegidas o con suelo infértil y ya inútil para el crecimiento de vegetación.
- e) Un gran deterioro ambiental de los ecosistemas y cuencas, así como la ruptura de la estructura económica y el tejido social regional (Arellano, 2006).

Para efectuar los estudios técnicos de aspectos como la determinación de pérdidas de suelo por erosión hídrica, no existen técnicas, tecnologías o metodologías adecuadas, toda vez que las existentes fueron desarrolladas en otros países con condiciones diferentes o en escenarios específicos como son parcelas de control o áreas de entrenamiento, para las que se generaron expresamente los datos requeridos, por lo que deben calibrarse o adaptarse a las condiciones imperantes donde se desean aplicar, no sólo por las características distintas, sino por la disponibilidad de información.

Por ejemplo, la estimación de la tasa de erosión en cuencas de México, se ha empleado la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) por erosión hídrica desarrollada en Estados Unidos a mediados del siglo pasado para pequeñas parcelas agrícolas con escasa pendiente y reducida precipitación; su aplicación a las condiciones extremas para el trópico húmedo mexicano, está, sin embargo, poco estudiada. Baumann (2000), refiere estudios diversos realizados por la Comisión Nacional del Agua antes de la ocurrencia del ciclón tropical Stan, en los que se reportan pérdidas de suelo de hasta $859 \text{ t x ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en las áreas sin cobertura vegetal, los cuales, si bien muestran una consistencia con el desarrollo histórico, también dejó ver una variabilidad sólo justificable por la falta de información consistente y confiable. Pero, las estimaciones realizadas para la precipitación del ciclón tropical Stan arrojaron valores que superaron las $1,000 \text{ t x ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que implicó que se pusieran en duda las metodologías aplicadas, que se plantearan nuevos esquemas para su estudio y que, incluso el sistema de clasificación de la FAO cuyo límite superior es de $200 \text{ t x ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, fuera insuficiente y haya tenido que replantearse.

1.4. PLANTEAMIENTO GENERAL DEL TEMA DE INVESTIGACIÓN

Los métodos, modelos y metodologías que existen en la actualidad para estudiar muchos aspectos y fenómenos ligados con la ocurrencia, presencia y transcurso del agua en la naturaleza mediante el ciclo hidrológico, y sobre su uso y manejo para satisfacer necesidades básicas del hombre y los requerimientos en los procesos productivos implementados por él, se han desarrollado en general en los países desarrollados como

Estados Unidos, Inglaterra, o de Europa; con ubicación –para empezar- en latitudes diferentes, pero sobretodo con condiciones y características específicas y, por lo tanto, diferentes.

Los esquemas y principios teóricos en los que se basan las relaciones lluvia-escurrimiento y los fenómenos de erosión y sedimentación, como muchos otros, tales como las que se emplean para la determinación de la evapotranspiración y que conduce al conocimiento del requerimiento de riego de los cultivos, fueron desarrollados en Institutos, Laboratorios y Campos de Investigación de las zonas áridas de los Estados Unidos. Similar origen tuvo el concepto y Método del Número de Curva que fue desarrollado por el Soil Conservation Service (SCS) del United States Agricultural Department (USDA), en 1954, como un procedimiento expedito y aproximado para estimar el volumen o la lámina de escurrimiento en pequeñas áreas de uso agropecuario del suelo, con base en las observaciones de más de 20 años de los hidrogramas de tormentas de varias cuencas experimentales de este tipo.

De esta forma, las tecnologías a menudo no son apropiadas, ni aplicables en principio a las condiciones de cualquier otra región del mundo, menos aun si las condiciones imperantes en el área de estudio son completamente diferentes, como el caso de las Cuencas Costeras de Chiapas; es, por lo tanto, necesario y obligado adecuarlas a los casos particulares, lo cual implica la aplicación de recursos, la reorientación de la investigación y el reenfoque y alineación de políticas públicas sobre investigación, innovación y desarrollo tecnológico.

En este contexto, con el presente trabajo, se planteó revisar la aplicabilidad de varios principios y esquemas metodológicos como la ecuación Universal de Pérdida de suelo (EUPS) para la estimación de la tasa de erosión en zonas con condiciones completamente diferentes a aquellas en las que fueron generadas, es decir con alta precipitación, densas coberturas vegetales y fuertes pendientes, que condicionan de inicio grandes valores de tasa de erosión al potenciar al máximo la erosionabilidad del suelo; tales como las Cuencas de los Ríos Huixtla Huehuetán y Coatán en la Costa de Chiapas y empleando como base y fuente del agente erosivo, el ciclón tropical Stan, el mayor evento hidrometeorológico del que se tenga referencia en la región.

Se consideró también el análisis de la aplicación de conceptos y parámetros asociados, como el coeficiente de escurrimiento definido por norma mexicana NOM-001-CNA-2000 y que, sin embargo, también deja fuera de su rango de aplicabilidad a condiciones como las de la Costa de Chiapas y el número de curva, cuyo uso se ha extendido, hasta llegarse a recomendar como referencia, sin estar suficientemente estudiada su aplicación para estos casos.

Se propuso valorar la aplicabilidad de algunas técnicas actuales como la de álgebra de mapas (TAM) y los sistemas de información geográfica (SIG) y de tecnologías como los software especializados como el Arc View, el Soil and Water Assessment Tool (SWAT) y las imágenes de satélite, para la generación, sistematización y manejo de las información requerida; y se propuso un algoritmo que se denominó número de base 10 (NB_{10}) para sistematizar y operar mediante la técnica de álgebra de mapas el cálculo del Nc y del volumen de escurrimiento en una cuenca, empleando los modelos agregado y distribuido.

Se planteó, asimismo generar conclusiones y recomendaciones, tanto sobre la aplicación de los esquemas metodológicos revisados o generados como para contribuir a la restauración hidrológico-ambiental de las cuencas estudiadas, a través de propuestas para el estudio más profundo, completo y suficiente de la erosión hídrica en las cuencas costeras del estado mexicano de Chiapas.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. LA CUENCA COMO ENTIDAD DE ESTUDIO DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS

2.1.1. LA CUENCA HIDROLÓGICA Y SUS COMPONENTES

Una definición simple de cuenca es la de Villanueva (2008), que la describe como el espacio geográfico que permite delimitar y una superficie de drenaje común, donde interactúan aspectos físicos, biológicos y sociales. Por su parte, Pérez y Hernández (2001) la refieren como el área geográfica, delimitada por una línea imaginaria denominada parteaguas y en la que debido a los desniveles topográficos y a la geología, se originan partes altas y bajas que forman cauces, por los que se conducen todos los escurrimientos derivados del agua de precipitación ocurrida en ella, concurriendo todos ellos a un cauce o corriente común que los drena o desaloja en una dirección determinada.

Hoy día, los estudiosos del ciclo hidrológico comparten la idea de que **la cuenca** es al ámbito geográfico en el que mejor pueden comprenderse los fenómenos y procesos con ella asociados. Más aún, si se adopta como una definición de ésta, que se trata de una **entidad geográficamente delimitada por un parteaguas que consiste de un complejo ecosistema en el que se presentan prácticamente todos los componentes del ciclo hidrológico con base en sus características de relieve y conformación geológica y en estrecha asociación con los demás recursos naturales que en ella se suceden** (Arellano, 2012 y Pérez, 2001).

Otro elemento que completa la definición de la cuenca (no sólo conceptual sino física) es el de **cauce principal**, que **conjunta todos los escurrimientos que en ella se generan y los conduce a su salida, que es el punto más bajo de ambos (cuenca y cauce) y a su vez, define el punto de inicio de la cuenca**; de modo que, en efecto, la delimitación de una cuenca, se hace a partir de un cauce y una diferente se puede definir desde cada punto distinto sobre él (Pérez y Hernández, 2001). La figura 2.1 ilustra la definición de cuenca así establecida y detallada enseguida.

En concordancia con la figura 2.1 y con Galicia (2010), se define a una subcuenca como aquella que tiene por corriente principal a los principales cauces tributarios al cauce principal de una cuenca, por lo que es el primer nivel de subdivisión de ésta;

análogamente, las microcuencas son aquellas que resultan de subdividir una subcuenca y que por lo tanto tienen como corriente principal aquellas que son tributarias de la que la origina a las subcuencas y ordinariamente corresponde con las de segundo orden. Estas definiciones corresponden incluso con La Ley de Aguas Nacionales (CONAGUA, 2007), que define la subdivisión de las subcuencas como microcuencas.

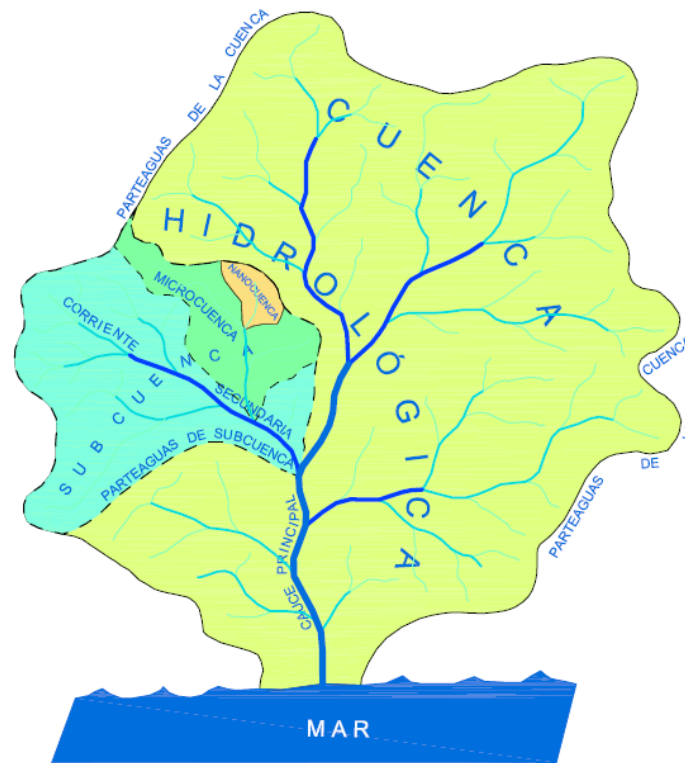


Figura 2.1. Esquema que ilustra la definición de concepto de cuenca hidrológica (Basado de Arellano, 2012)

Lo anterior también coincide con Galicia (2010), que menciona que para los fines de formulación y ejecución de las políticas públicas relacionadas con el agua y de participación en la gestión integral del recurso, interesan sólo tres niveles de cuenca: las macrocuencas que corresponden a grandes sistemas hidrológicos, las subcuencas o cuencas de segundo orden y un tercer nivel que pueden denominarse microcuencas. Por su parte, Arellano (2012), propone el concepto de nanocuenca como las subdivisiones de las microcuencas y que corresponden con los corrientes del último nivel de una cuenca y, es por lo tanto, donde debe empezarse a planear las acciones de su estudio y reordenación o rehabilitación.

Por otra parte, respecto a su localización y funcionamiento, al interior de una cuenca, siempre se pueden identificar tres partes, denominadas Cuenca Alta, Cuenca Media y Cuenca Baja, que Galicia (2010), define como sigue: la Cuenca alta, es la parte en la cual

predomina el fenómeno de la socavación; es decir que hay aportación de material terreo hacia las partes bajas de la cuenca, visiblemente se ven trazas de erosión; en la Cuenca media, hay un equilibrio entre el material sólido que llega traído por la corriente y el material que sale; visiblemente no hay erosión; y en la Cuenca baja, el material extraído de la parte alta se deposita en lo que se llama cono de deyección.

Desde el punto de vista hidrológico, se puede decir que, **la geología, el relieve, la cobertura vegetal del suelo, la magnitud de la precipitación, etc., en una cuenca definen, la conformación de la red del corrientes y la presencia de la precipitación, de la evaporación, de la infiltración y, sobretodo, del escurrimiento**, que se mide a la salida de la cuenca y constituye el elemento fundamental para la cuantificación de los volúmenes de agua que se generan en ella, y que permite programar su uso y aprovechamiento, o dimensionar las obras necesarias y/o requeridas para disminuir su impacto cuando su magnitud es extraordinaria, y que es también el principal agente que ocasiona la erosión hídrica en la cuenca, por lo que es el parámetro fundamental de estudio y análisis.

Así, en la cuenca, se hacen presentes de manera conjugada la cobertura vegetal y todos los seres vivos que ella habitan; la forma y densidad de las corrientes, la topografía, el relieve, y sus demás características físicas; y, sobretodo la presencia del hombre como ser social y como agente modificador de todas estas características, que influyen en la respuesta hidrológica de la misma. Recíprocamente, **el carácter hidrológico de una cuenca contribuye considerablemente a formar sus características físicas** (Linsley, *et al.* 1977).

Arellano (2006), por otra parte, considera que **el estudio y manejo a través cuencas se soporta en el principio de que éstas son el espacio ecogeográfico natural de ocurrencia del ciclo del agua**; en su interior, la red fluvial de ríos tributarios descargan en un cauce principal; de esta forma, la cuenca tiene límites físicos, divisorias de aguas o parteaguas, bien definidos. Bajo este enfoque, **la cuenca es un ecosistema complejo con una dinámica ambiental propia, definida por las interacciones sistémicas de los recursos hídricos, es decir, del agua como elemento integrador del sistema y los recursos naturales asociados** a ella (el suelo y la vegetación principalmente); e integrando el componente social a la definición y estudio de la cuenca, este mismo autor refiere que ésta es también un territorio común formado por los ríos y montañas que los pueblos comparten junto con las formas de apropiación de los recursos hídricos; la cuenca es parte del legado e identidad territorial de los pueblos; es decir, la cuenca es un territorio común socialmente apropiado.

2.1.2. IDENTIFICACIÓN Y DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

Pérez y Hernández (2001) refieren que, **siempre puede determinarse una cuenca a partir de cualquier punto sobre un cauce o corriente** y, por esta razón, en campo

regularmente se debe definir primero la localización de un punto sobre el cauce y a partir de este sitio, se determina la cuenca correspondiente.

La delimitación de una cuenca pequeña o mediana en nuestro país, puede hacerse sobre las cartas topográficas que publica el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), que en escala 1:50,000 presentan la topografía con curvas de nivel con equidistancia vertical a 20 m, iniciando en el sitio de la boquilla o punto de interés sobre la corriente o cauce principal, e identificando y trazando el parteaguas por una de las márgenes y continuarla hasta volver por el otro extremo, tal como se muestra en la figura 2.2.

Las cuencas grandes, se pueden localizar y delimitar sobre cartas topográficas del mismo INEGI a escala 1:250,000; sin embargo, si se cuenta con un modelo digital de elevaciones (MDE), que en México, también tiene disponible y sin costo el INEGI, la delimitación de la cuenca y su caracterización básica, se puede hacer automáticamente y con la ayuda de una computadora, empleando software especializados con el Soil and Water Assessment Tool (SWAT), que se maneja como una herramienta o extensión del software comercial Arc View o Arc Map.

2.1.3. LA CUENCA COMO ENTIDAD DE ESTUDIO Y PLANEACIÓN

Según Ruiz (2004), **la cuenca es aceptada universalmente como la unidad territorial más adecuada para la gestión integral de los recursos hídricos** (GIRH) y de ahí se deriva el término de Manejo Integral (o Gestión Integral) de Cuenca (MIC o GIC), que se refiere al manejo conjunto de los recursos físicos y bióticos, así como los sistemas socioeconómicos en ellas presentes, considerando su interrelación e interdependencia; y la GIRH, definida por el Global Water Pathnership y reportado por Dourojeanni y Jouraville (2003), como un **proceso que promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico, resultante de manera equitativa, sin comprometer la sustentabilidad de los ecosistemas vitales.**

A lo largo de una cuenca, los actores sociales tienen diferentes percepciones, representaciones y formas de apropiación de los recursos hídricos; sin embargo a través de su gestión, se establecen diferentes interrelaciones. Bajo esta perspectiva, **la cuenca es la unidad territorial de gestión, donde los grupos sociales tienen diferentes usos, reglas de acceso y control sobre los recursos hídricos a través de instituciones formales y no formales.** De esta forma, en la cuenca ocurren procesos naturales y sociales a diferentes escalas: local, comunitaria, microrregional, regional, estatal, nacional, global. (Arellano, 2006)

Al respecto, la SEMARNAT (2005), indica que la GIRH debe considerar los diversos usos del agua (doméstico, agrícola, ganadero, industrial, de servicios y recreativo), implica una

labor de planeación, organización, dirección y control, donde convergen aspectos económicos, legales, políticos, sociales y de comunicación; por ello, el espacio donde mejor se puede implementar esta actividad y quehacer es la cuenca hidrológica. También por ello, la Ley de Aguas Nacionales (LAN), (SEMARNAP, *op. cit.*) plantea herramientas para la gestión hídrica como: planificación, régimen de concesiones, cobro de derechos, prevención, conciliación, arbitraje, mitigación y solución de conflictos, apoyos sociales y un sistema nacional de información, sobre cantidad, calidad, uso y conservación, así como el desarrollo de tarifas de cuenca, entre otras.



Figura 2.2. Delimitación de una pequeña cuenca sobre una carta topográfica del INEGI en escala 1:50,000

2.2. CARACTERIZACIÓN PARAMÉTRICA DE UNA CUENCA

2.2.1. FUNDAMENTACIÓN, IMPORTANCIA Y CLASIFICACIÓN

Linsley *et al.*, (1977), refieren que dentro del análisis hidrológico, se han propuesto muchas formas numéricas para describir las diferentes características de una cuenca. **La caracterización de las cuencas hidrológicas consiste en su análisis morfométrico, fisiográfico y de relieve, de acuerdo a la estimación de parámetros de**

caracterización específica, lineales, de área y de relieve, una vez obtenido su mapa. Chávez (2006), refiere que a la fecha se ha comprobado la influencia que determinados índices tienen en las respuestas hidrológicas de una cuenca y por ello son punto de partida de los análisis y determinaciones cuantitativas; entre tales parámetros cabe citar el área o tamaño de la cuenca, su forma, pendiente y elevación media, las características de su red de drenaje y las del cauce o colector principal.

Al respecto, Campos (2007) citado por Arellano (2012), refiere que **los parámetros físicos de las cuencas son fundamentales en la respuesta hidrológica de la misma, particularmente al proceso lluvia-escorrentamiento**; y refiere, por ejemplo, que la forma de la cuenca permite estimar la velocidad con la cual el agua se transporta desde la cabecera de la cuenca hasta su descarga y está correlacionada con la geometría de los hidrogramas de escurrimiento y los caudales pico de respuesta (ver figura 2.3, reproducida de la misma fuente); de modo que cuencas de forma circular o con tendencias a ello, tendrán una respuesta más rápida al transporte del escurrimiento que una de forma más alargada; generalmente las cuencas tienden a una forma de pera, sin embargo, las condiciones del sustrato geológico provocan variaciones significativas en el régimen hidrológico de la cuenca (Linsley, *et al.*, 1977).

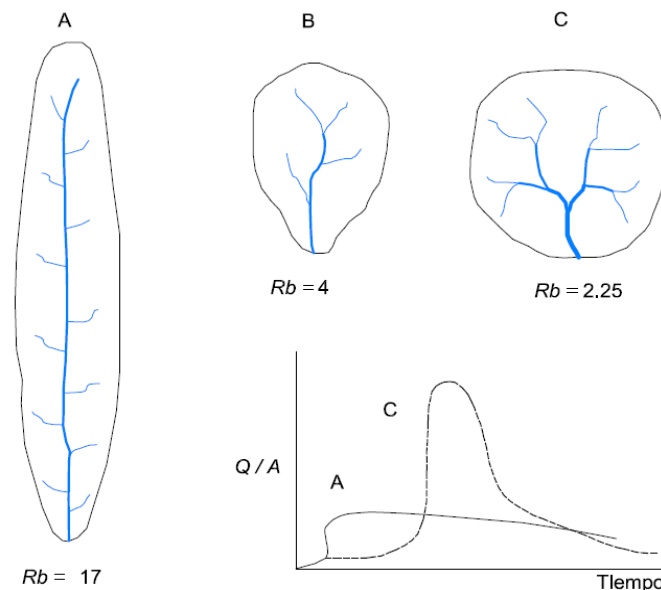


Figura 2.3. Esquemización de diversas formas de cuencas definidas por su relación de bifurcación R_b y sus correspondientes hidrogramas de respuesta (Arellano, 2012)

Para Dal-Ré (2003), **la forma es una de las características más importantes de la cuenca relacionada con el tiempo de concentración**, base fundamental en el tránsito de avenidas, los sistemas de alerta temprana y la gestión de riesgos por inundación.

Existen muchos parámetros de cuencas sobre cuya determinación, clasificación y aplicabilidad, de acuerdo con Campos (1998), se puede decir que:

- La determinación precisa de los parámetros físicos de una cuenca está gobernada por la disponibilidad cartográfica, en cuanto a sus escalas y calidad.
- Para determinados parámetros, sus definiciones son todavía arbitrarias, existiendo la posibilidad de que aún no se haya logrado las definiciones más convenientes.
- Las relaciones, entre las características físicas de la cuenca, que son prácticamente estáticas y sus respuestas hidrológicas, que son altamente aleatorias, son muy complejas.

La forma en la cual se clasifican y/o agrupan los parámetros físicos y fisiográficos de una cuenca para su caracterización, es muy variable y depende de cada autor. Galicia (2010), integró la clasificación de los parámetros físicos y fisiográficos que se expone en el cuadro 2.1, en la que se indican los autores proponentes.

Cuadro 2.1. Clasificación y denominación de los parámetros físicos y fisiográficos de una cuenca de acuerdo con Galicia (2010)

AUTOR	CLASIFICACIÓN
Chávez (2006)	<ul style="list-style-type: none"> • Parámetros fisiográficos • Parámetros de relieve
Ministerio de medio ambiente (1998)	<ul style="list-style-type: none"> • Parámetros de forma • Parámetros de relieve • Parámetros relativos a la red hidrográfica
Escalante y Reyes (2005)	<ul style="list-style-type: none"> • Características fisiográficas de la cuenca
Campos (1998)	<ul style="list-style-type: none"> • Geomorfología de la cuenca

Enseguida se refieren, describen y analizan algunos de los parámetros más útiles o utilizados para la caracterización fisiográfica e hidrológica de una cuenca.

2.2.2. PARÁMETROS DE FORMA

2.2.2.1. Área (A_c)

El área de la cuenca A_c , es la superficie delimitada por la proyección horizontal del parteaguas; se puede determinar empleando la expresión 2.1, si se conocen las coordenadas X y Y de los puntos que la definen ya sea manualmente o haciendo uso de

un software especializado como el AutoCAD. En dicha expresión, Ac se obtiene en m^2 si las coordenadas de los puntos que definen el parteaguas se proporcionan en m.

$$Ac = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Y_i (X_{i+1} - X_{i-1}) \quad (2.1)$$

2.2.2.2. Índice de forma (If)

La forma de la cuenca se define y describe según el parecido que tenga con algunas formas conocidas de otro objeto cualquiera; por ejemplo es muy común indicar que una cuenca tiene forma de pera o de riñón (Galicia, 2010).

El índice de forma de la cuenca If , es un parámetro adimensional sugerido por Horton, para una descripción cuantitativa del área de la cuenca y se calcula con la expresión 2.2, en la que Ac se debe proporcionar en km^2 y Lc , es la longitud de la cuenca, medida en línea recta desde el punto de salida del cauce hasta su límite en la cabecera del cauce más largo y se emplea en m.

$$If = \frac{Ac}{Lc^2} \quad (2.2)$$

2.2.2.3. Coeficiente de sinuosidad (Ks)

Este coeficiente mide el grado de curvatura del cauce principal, y se determina aplicando la expresión 2.3, al dividir la longitud del cauce principal Lcp en km, y la longitud de la línea recta Lr , también dado en km, que une el punto de inicio, con la salida de la cuenca; así, si la corriente es prácticamente una recta, $Ks = 1$.

$$Ks = \frac{Lcp}{Lr} \quad (2.3)$$

2.2.2.4. Parámetro de forma (Pf)

Esta característica es un buen indicador de cómo será la respuesta al escurrimiento a partir de la forma de la cuenca y se calcula con la expresión 2.4, que relaciona la longitud o extensión del perímetro (Ep) expresada en km y el área de la cuenca Ac , en km^2 ; de modo que entre mayor sea el valor de Pf mayor será el perímetro por km^2 del área que se encuentre limitando la cuenca.

$$Pf = \frac{Ep}{Ac} \quad (2.4)$$

2.2.2.5. Longitud de la cuenca (L_c)

Una cuenca se considera regular cuando se puede encerrar en un rectángulo, en cuyo caso, su longitud L_c (ordinariamente, en km) es la longitud del lado mayor del rectángulo que se define con los extremos del cauce principal, (ver figura 2.4a); en tanto que si se trata de una cuenca irregular, se trazan círculos dentro de la cuenca de modo que queden contiguas y su longitud L_c , se obtiene de la línea que resulta al unir los puntos centrales de las circunferencias contiguas y de principio a fin del cauce principal, (ver figura 2.4b); Galicia (2010).

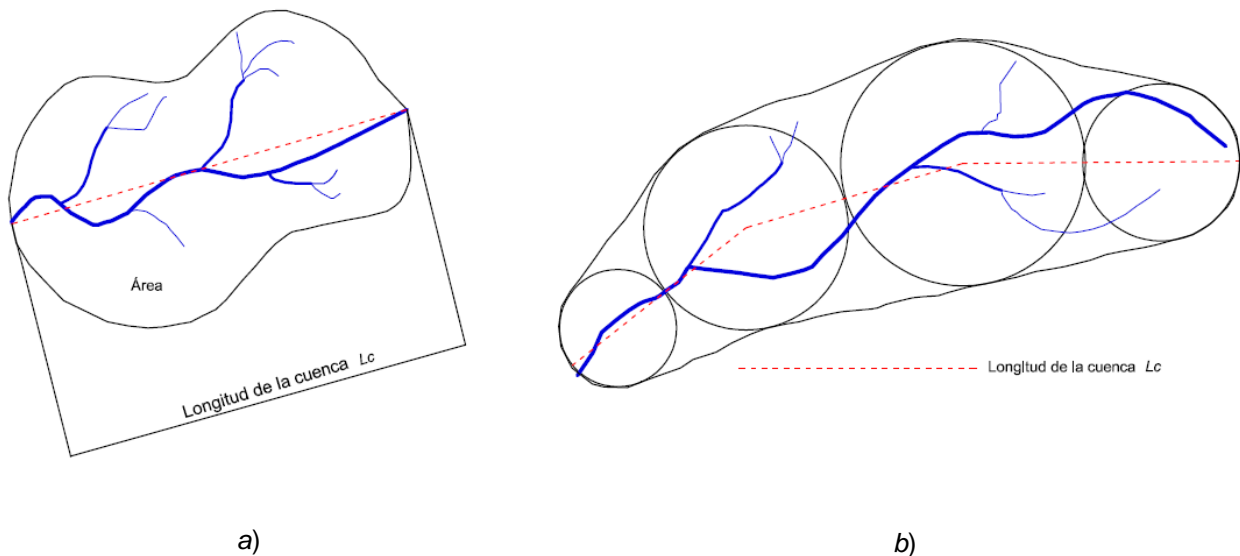


Figura 2.4. Determinación de la longitud L_c de una cuenca regular (a) y de una irregular (b), según Galicia (2010)

2.2.3. PARÁMETROS FISIAGRÁFICOS Y DE RELIEVE MÁS UTILIZADOS

2.2.3.1. Índice de compacidad (I_c)

El índice de compacidad o índice de Gravelius (I_c) relaciona el perímetro total de la cuenca (P_t , ya definido) con el perímetro del círculo (P_c) de superficie equivalente al de la cuenca. De esta forma, cuanto más se aproxima la forma de la cuenca a un círculo, la cuenca es más compacta, su tiempo de concentración (que se define más adelante) es más pequeño y, por tanto, la tendencia a generar grandes avenidas será mayor (Dal-Ré, 2003 y López, 2001).

$$I_c = \frac{P_t}{P_c} \quad (2.4)$$

2.2.3.2. Densidad hidrográfica (Dh) y Densidad de drenaje (Dd)

Otros parámetros geomorfológicos de la cuenca como la densidad hidrográfica (Dh) y densidad de drenaje (Dd), determinan también la forma del hidrograma (López, 2001; Cudennec, *et al.* 2004; citados por Arellano, 2012) y por tanto la respuesta hidrológica de la cuenca. En la figura 2.5, las cuencas hipotéticas **a** y **b** tienen la misma forma y densidad de drenaje pero diferente frecuencia de corrientes. Por otra parte, las cuencas **e** y **d** tienen la misma forma y frecuencia de corrientes pero diferente Dd (Streater, 1964, citado por Arellano, 2012).

La Dd es un primer estimador del grado de permeabilidad de los suelos de la cuenca. Suelos arcillosos poco permeables presentan redes de drenaje muy desarrolladas mientras que suelos arenosos, mucho más permeables muestran redes de drenaje poco densas (Dal-Ré, 2003). De esta forma, a mayor densidad de drenaje, el flujo del escurrimiento en laderas hacia los cauces, será más rápido.

2.2.3.3. Pendiente del Cauce Principal (Scp)

La pendiente del cauce principal Scp se puede obtener por varios métodos, de los cuales los más comunes son el método de la relación distancia-elevación y el método de compensación de áreas; **su conocimiento es muy importante ya que influye en la velocidad del flujo y juega un papel importante en la forma del hidrograma de la cuenca** (Galicia, 2010).

El método de la relación distancia-elevación consiste en la construcción de una gráfica en la que en el eje de las abscisas se grafican las distancias horizontales medidas desde el punto de descarga de la cuenca, hasta cada curva de nivel y en el eje de las ordenadas las correspondientes elevaciones de las curvas de nivel, para lo cual se tabulan dichos valores en una tabla. La Scp , expresada como decimal se obtiene aplicando la expresión 2.5, en la que Δh es el desnivel total entre el inicio y el final del cauce principal y DH la distancia horizontal entre los mismos puntos, dados en m.

$$Scp = \frac{\Delta h}{DH} \quad (2.5)$$

En el Método de Compensación de Áreas se utiliza la misma curva construida para el Método de Distancia-Elevación y sobre ella se traza una línea recta con inicio en el origen del sistema coordenado y se desplaza hacia abajo iniciando con el extremo superior de la curva hasta que la áreas comprendidas arriba y debajo de la curva y dicha línea sean iguales. La Scp , se calcula empleando la misma expresión 2.5, pero tomando como Δh , el valor medido desde la horizontal hasta el punto de intersección de la línea de compensación con la vertical que pasa por el final de la curva.

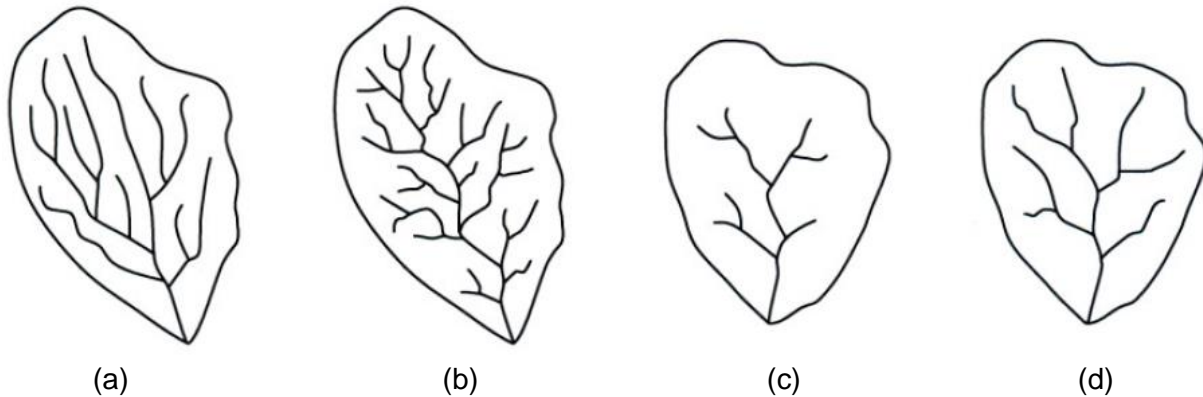


Figura 2.5. Relaciones entre la forma, la densidad de drenaje (Dd) y la frecuencia o densidad de corrientes en cuencas hidrográficas (Arellano, 2012)

2.2.3.4. Pendiente media de la cuenca (Sc)

Para López (2001) y Dal-Ré (2003), **la pendiente media de la cuenca vertiente o de recepción es más importante que la forma y la densidad de drenaje en la estimación de la respuesta de una cuenca a un evento extremo de lluvia**; a mayor pendiente de la cuenca, menor tiempo tardará el escurrimiento en fluir a lo largo de la red de drenaje para llegar a la salida de la cuenca; además, el tiempo de concentración (cuya definición y forma de cálculo se verá más adelante) y la duración total del escurrimiento producido por un evento de lluvia son función de la pendiente de la cuenca. Galicia, (2010) coincide con estas afirmaciones al referir que la pendiente media de la cuenca constituye un elemento importante en el efecto del agua al caer a la superficie por la velocidad que adquiere y la erosión que produce. Este parámetro, se calcula con la expresión del Alvord (2.6) o la de Horton (2.7).

$$Sc = \frac{e Ln}{Ac} \quad (2.6)$$

$$Sc = \frac{Sx + Sy}{2} \quad (2.7)$$

En la expresión 2.6, Ac se aplica en km^2 ; e es el desnivel constante o equidistancia vertical entre curvas de nivel, en km ; y Ln es la longitud total de las curvas de nivel dentro de la cuenca, en km . Y en la expresión 2.7, Sx es la pendiente de la cuenca en la dirección x y Sy la correspondiente para la dirección y , si la cuenca se enmarca en una malla con líneas en dirección horizontal (denominada x y sobre la que se hace corresponder la dirección del cauce principal), y otra vertical (denominada y), con igual equidistancia y perpendicular a x . El dibujo de la cuenca debe mostrarse con las curvas de nivel que muestren su topografía. Las pendientes direccionales Sx y Sy se determinan con las expresiones 2.8 y 2.9.

$$S_x = \frac{N_x e}{L_x} \quad (2.8)$$

$$S_y = \frac{N_y e}{L_y} \quad (2.9)$$

En estas expresiones:

e = Desnivel constante o equidistancia vertical entre curvas de nivel, en km;

L_x = Longitud total de las líneas de la malla en la dirección x , comprendidas dentro de la cuenca, en km;

L_y = Longitud total de las líneas de la malla en la dirección y , comprendidas dentro de la cuenca, en km;

N_x = Número total de intersecciones x tangencias de las líneas de la malla en dirección x , con las curvas de nivel; y

N_y = Número total de intersecciones y tangencias de las líneas de la malla en dirección y , con las curvas de nivel.

2.2.4. PARÁMETROS DE DRENAJE

2.2.4.1. Orden de corrientes (O_c) y Número de Orden de corrientes

El **orden de las corrientes** (O_c) es un criterio que define el grado de bifurcación de las corrientes dentro de la cuenca, e **indica el grado de desarrollo, amplitud o complejidad de su red de drenaje, y la facilidad y rapidez o complicación o lentitud con la que se generan los escurrimientos y que concurren al punto de desfogue o descarga**; el procedimiento más común para hacer la definición del **número de orden** de las corrientes (N_o), consiste en las siguientes consideraciones, definidas por Horton (Chávez, 2006 y Linsley, *et al.*, 1977) y en correspondencia con la figura 2.6.

- Un cauce de primer orden o de orden 1, es un tributario pequeño sin ramificaciones y generalmente se localiza en los extremos de la cuenca;
- Un cauce de segundo orden o de orden 2, es el que posee únicamente ramificaciones de orden 1;
- Un cauce de tercer orden o de orden 3, es el que se forma por dos o más

tributarios de orden 1 y 2;

- Y así, sucesivamente.

Lo anterior implica que el orden de la corriente principal indicará la magnitud y amplitud de la red de corrientes de la cuenca y corresponderá con el orden de la misma.

2.2.4.2. Relación de bifurcación (R_b)

La ley de bifurcación (definida por Horton) establece la relación existente entre el número de segmentos de un orden dado y los de orden inmediatamente superior. Para Strahler (1964), citado por Arellano (2012), existe una relación directa entre la relación de bifurcación (R_b) de una cuenca y la forma de su hidrograma de respuesta. Por ejemplo, en alusión a la figura 2.2, cuencas más alargadas con valores de R_b de 17 presentan hidrogramas con forma achatada, mientras que cuencas con tendencia circular con R_b de 2.25, presentan hidrogramas con pico pronunciado.

2.3. RELACIÓN LLUVIA-ESCURRIMIENTO EN CUENCAS

2.3.1. COMPONENTES DEL CICLO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico es el concepto central de la hidrología; no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. Para fines descriptivos, y en asociación con la figura 2.7, se puede decir que el ciclo hidrológico inicia cuando el agua se **Evapora** desde los océanos y desde la superficie terrestre, para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se **condensa** y **Precipita** sobre la superficie terrestre o en los cuerpos de agua (Pérez, 2001 y Linsley, *et al.*, 1977).

El total de agua que se presenta en una lluvia como **Precipitación** (Pr), se distribuye en diversos componentes; una primera parte no alcanza siquiera a llegar al suelo porque es captada por el follaje de las plantas y se denomina **Intercepción** (Ic), y en las depresiones del terreno como **almacenamiento superficial** (As) (Linsley, *et al.*, 1977), quedando disponible para su regreso a la atmósfera por evaporación; otra parte del agua que alcanza la superficie del suelo, penetra de manera vertical por sus poros dando lugar a la **Infiltración** (In), que a su vez se divide para dar lugar al **Escorrimento Superficial** (Es), **Escorrimento Subsuperficial** (Eu) y el **Escorrimento Subterráneo** o **Percolación profunda** (Pp) para **Recargar** (Re) los acuíferos, de donde emerge en manantiales o se desliza hacia los ríos para pasar a formar nuevamente del Escorrimento superficial y, finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa (Neitsch, *et al.*, 2001; Pérez, 2001 y Arellano, 2012). Parte del agua que se infiltra en los suelos que dan sustento a la vegetación, –sea natural o cultivada–, es la que se absorbe por ella a través de sus raíces, y se transporta

por sus conductos para llevar los nutrientes y finalmente sale por **Evapotranspiración** (E_t) para volver a la atmósfera; parte de esta agua pasa a formar parte constitutiva de las plantas y se denomina **Uso Consuntivo** (U_c) que por su magnitud ínfima, a menudo se deprecia en el ciclo hidrológico.

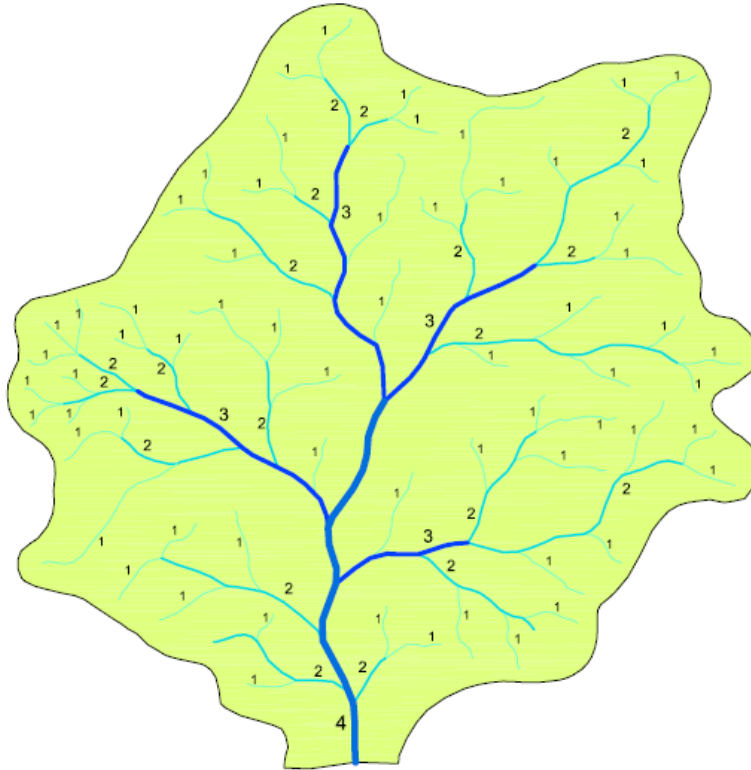


Figura 2.6. Esquemática de la determinación del orden de las corrientes de la red de drenaje de una cuenca de acuerdo con la propuesta de Horton

Arellano (2012), cita a diversos autores para referir que el **Escorrentamiento Subsuperficial** y el **Escorrentamiento Subterráneo**, al brotar en la superficie del cauce de la cuenca, constituyen el **Flujo Base** o **Escorrentamiento Base** (E_b), que causa la erosión en cárcavas, cuando coinciden con la presencia de fuertes pendientes, suelos desprotegidos y sin estructura; al agua que no se infiltra en el suelo se denomina **Precipitación en exceso** o **Precipitación efectiva** (P_e) y se constituye en el **Flujo Directo** o **Escorrentamiento Superficial** que es el que genera la erosión en la cuenca por arrastre del suelo que está suelto o sin estructurar en su superficie. Evidentemente la consideración conjunta del E_b y el E_s , dan lugar al **Escorrentamiento Total** (E_T). Esquemáticamente, esto se puede representar como se ilustra en la figura 2.8 (Springall, 1970 y Campos, 2007), y matemáticamente se puede considerar como una ecuación de balance (2.10 y 2.11), a partir de la **precipitación efectiva**; en estas expresiones todos los componentes fueron definidos y están dados en las mismas unidades, de volumen (m^3) o de lámina (mm o m), por ejemplo.

$$Pe = Pr - ET \tag{2.10}$$

$$Pe = (Ic + In) - (Eb + Es) \tag{2.11}$$

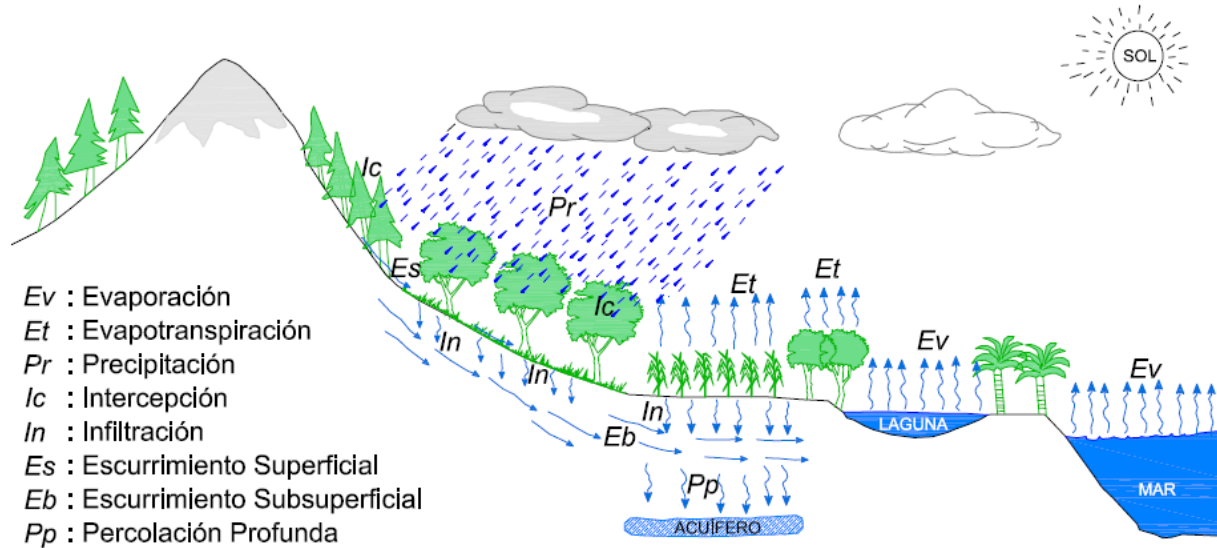


Figura 2.7. Esquemización del proceso y de los componentes de ciclo hidrológico

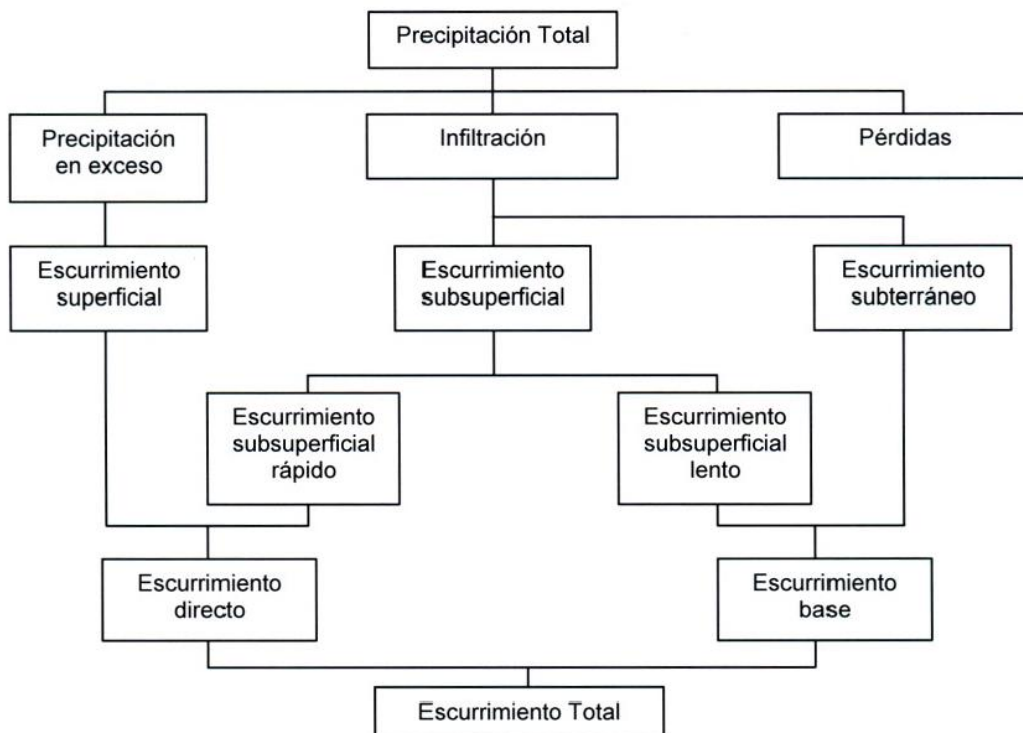


Figura 2.8. Generación del escurrimiento a partir de la precipitación en una cuenca (Springall, 1970 y Campos, 2012)

2.3.2. DISPONIBILIDAD Y MANEJO DE DATOS

De los componentes del ciclo hidrológico el que ocasiona erosión y pérdida del suelo, son los escurrimientos superficiales, ya sea en los cauces o cárcavas, en las zonas agrícolas desprovistas de cubierta vegetal o en las laderas de las cuencas, con fuertes pendientes y sin vegetación también; por lo tanto **el conocimiento de los escurrimientos es el primer requerimiento de información en un estudio de erosión**. Cuando no se dispone de esta información, que es el caso más común, por la falta de estructuras aforadoras en todos los puntos que pueden resultar de interés, se debe aplicar la metodología más adecuada y conveniente, según la información disponible con que se cuente. En cualquier caso, se debe contar al menos con datos de precipitación del mayor tiempo posible y de cualquier forma, e información sobre la superficie y la porosidad del suelo y, sobretodo, de la cobertura del área, con los que sea posible estimar los volúmenes escurridos (expresados como gasto Q , lámina L o volumen V).

2.3.2.1. Hietogramas

Los hietogramas son gráficas de intensidad o de exceso de precipitación en función del tiempo y son un componente clave para el estudio de las relaciones lluvia-escurrimiento (Chow, *et al.*, 1999), que generalmente se dibujan como diagramas de barras (ver la figura 2.9) que representen las variaciones de la altura de precipitación o de su intensidad, en intervalos de tiempo previamente seleccionados (Aparicio, 2012).

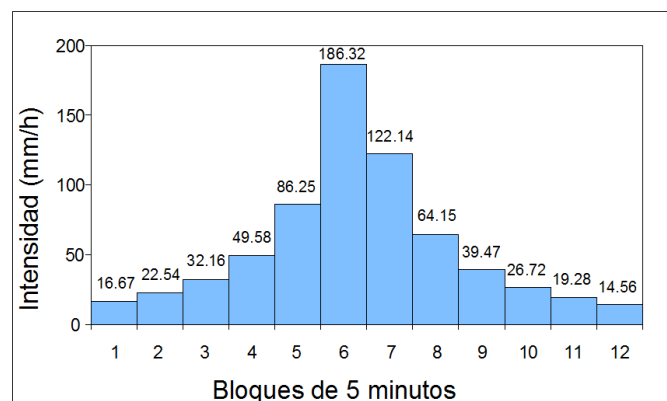


Figura 2.9. Ejemplo de un hietograma

El hietograma se construye dividiendo el tiempo que duró la tormenta en n intervalos (que pueden ser iguales o no) y midiendo la altura de precipitación que se tuvo en cada uno de ellos. El intervalo Δt seleccionado, es importante en cuanto a la información que proporciona el hietograma; un valor de Δt demasiado grande arrojaría muy poca información y uno muy pequeño la daría excesiva y difícil de manejar.

2.3.2.2. Hidrogramas

El hidrograma es la representación gráfica del escurrimiento superficial en la cuenca como respuesta al exceso de lluvia en el tiempo. El exceso de lluvia se caracteriza por su duración y el hidrograma está relacionado con el **tiempo de retraso**, el **tiempo al pico** y el **tiempo de recesión** (Aparicio, 2012), lo que se puede apreciar en la figura 2.10.

Para Negrete (1980), el escurrimiento aforado en un punto, se acostumbra representar en forma gráfica por medio de un hidrograma, el cual es una gráfica de nivel o gasto contra el tiempo; o sea que es la suma de flujo directo y flujo base, como también se muestra en la figura 2.10, en la que se aprecian las partes o etapas de un hidrograma de acuerdo con Aparicio (2012). El flujo directo es el proveniente de la tormenta que se encuentra bajo análisis, es decir el que viene directamente de la tormenta. **El flujo base es una contribución del flujo subterráneo, el cual proviene de tormentas pasadas y formaba parte de la infiltración, pero más tarde aflora a la superficie a través del cauce del río.**

Por otra parte, Aparicio (2012), menciona que aunque la forma de los hidrogramas producidos por tormentas particulares varían no sólo de una cuenca a otra, sino también de tormenta a tormenta, es posible en general, distinguir las siguientes partes en todos ellos, las cuales también se pueden visualizar en la figura 2.10.

A: Punto de levantamiento o de inicio de incremento de caudal. En este punto, el agua proveniente de la tormenta bajo análisis comienza a llegar a la salida de la cuenca y se produce inmediatamente después de iniciada la tormenta, durante la misma o incluso cuando ha transcurrido ya algún tiempo después de que cesó de llover, dependiendo de varios factores, entre los que se pueden mencionar: el tamaño de la cuenca, su sistema de drenaje y suelo, la intensidad y duración de la lluvia, etc.

B: Pico, que corresponde con el gasto máximo que se produce por la tormenta. Con frecuencia es el punto más importante de un hidrograma para fines de diseño.

C: Punto de inflexión. En este punto es aproximadamente cuando termina el flujo sobre el terreno, y, de aquí en adelante, lo que queda de agua en la cuenca escurre por los canales y como escurrimiento subterráneo.

D: Final del escurrimiento directo. De este punto en adelante el escurrimiento es sólo de origen subterráneo; normalmente se acepta como el punto de mayor curvatura de la curva de recesión, aunque pocas veces se distingue fácilmente.

T_p : Tiempo de pico. Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el pico del hidrograma.

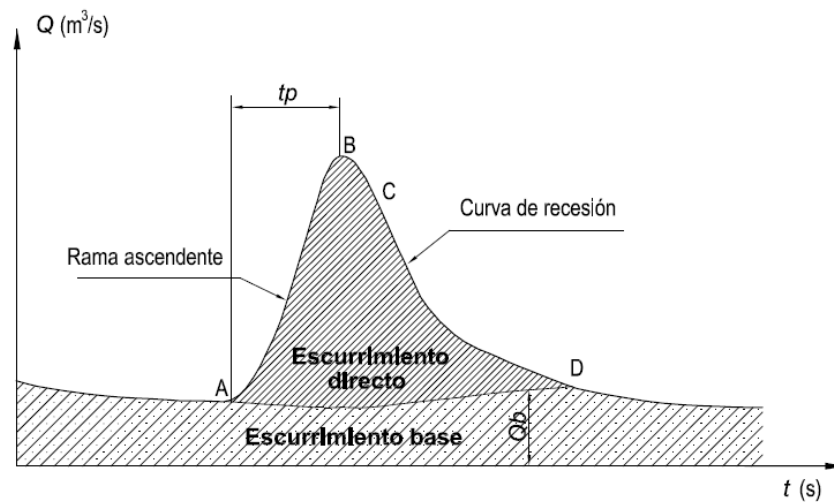


Figura 2.10. Hidrograma aislado y sus principales componentes (Redibujado de Aparicio, 2012)

T_b: Tiempo base. Es el tiempo que transcurre desde el punto de levantamiento hasta el punto final del escurrimiento directo; por lo tanto, es el tiempo que dura el escurrimiento directo.

Rama ascendente. Es la parte del hidrograma que va desde el punto de levantamiento hasta el pico.

Rama descendente o curva de recesión. Es la parte del hidrograma que va desde el pico hasta el final del escurrimiento directo. Tomada a partir del punto de inflexión, es una curva de vaciado de la cuenca.

El tiempo base de un hidrograma aislado puede variar desde algunos minutos hasta varios días, y el pico puede tener valores del orden de unos cuantos litros por segundo hasta miles de metros cúbicos por segundo (Aparicio, 2012).

Para Campos (2007), **tanto el pico como la duración, definen en gran parte la forma del hidrograma, que depende de varios factores tanto temporales como permanentes, estrechamente interrelacionados**; dentro de los temporales están las características del evento de lluvia (intensidad, duración, frecuencia) y las relacionadas con las características hidráulicas de los suelos de la cuenca (capacidad de almacenamiento, textura, porosidad, infiltración, etc.); y **los factores permanentes que determinan la forma del hidrograma están relacionados tanto con las características físicas de la cuenca, como con las características del cauce, de la red de drenaje y geomorfológicas de la cuenca** (tamaño, forma, pendiente, entre

otras); y entre los factores temporales y permanentes están las condiciones de uso y prácticas de manejo del suelo y la vegetación de la cuenca.

2.3.2.3. Hidrograma unitario

El Hidrograma Unitario es uno de los conceptos utilizados en hidrología, para la determinación del caudal producido por una precipitación en una determinada cuenca hidrográfica que produce un volumen de escurrimiento equivalente a una lámina unitaria. Si fuera posible que se produjeran dos lluvias idénticas sobre una cuenca hidrográfica cuyas condiciones antes de la precipitación también fueran idénticas, sería de esperarse que los hidrogramas correspondientes a las dos lluvias también fueran iguales. Esta es la base del concepto de hidrograma unitario. En la realidad es imposible que ocurran lluvias idénticas ya que son variables en su duración, en el volumen precipitado, en su distribución espacial y/o en su intensidad.

Ogrosky y Mockus (1964), el SCS proponen que el hidrograma unitario sintético se construye a partir de la relación del gasto de escurrimiento (q , en m^3/s) con respecto al gasto pico (q_p en m^3/s) y la relación del tiempo t (en h) con respecto al tiempo para llegar al pico (T_p , en h), lo que se puede observar gráficamente en la en la figura 2.11; asimismo, el SCS, consideró que las curvas de ascenso y descenso del hidrograma a través del tiempo se ajustan a un triángulo y que, por lo tanto, el escurrimiento total o directo (Q , en m^3/s) se calcula integrando el hidrograma ajustado a una forma triangular considerando un triángulo creciente y otro decreciente según se muestra en la figura 2.11 b y como se describe enseguida:

$$Q = \frac{q_p \times T_p}{2} + \frac{q_p \times T_r}{2} = \frac{q_p}{2} (T_p + T_r) \tag{2.12}$$

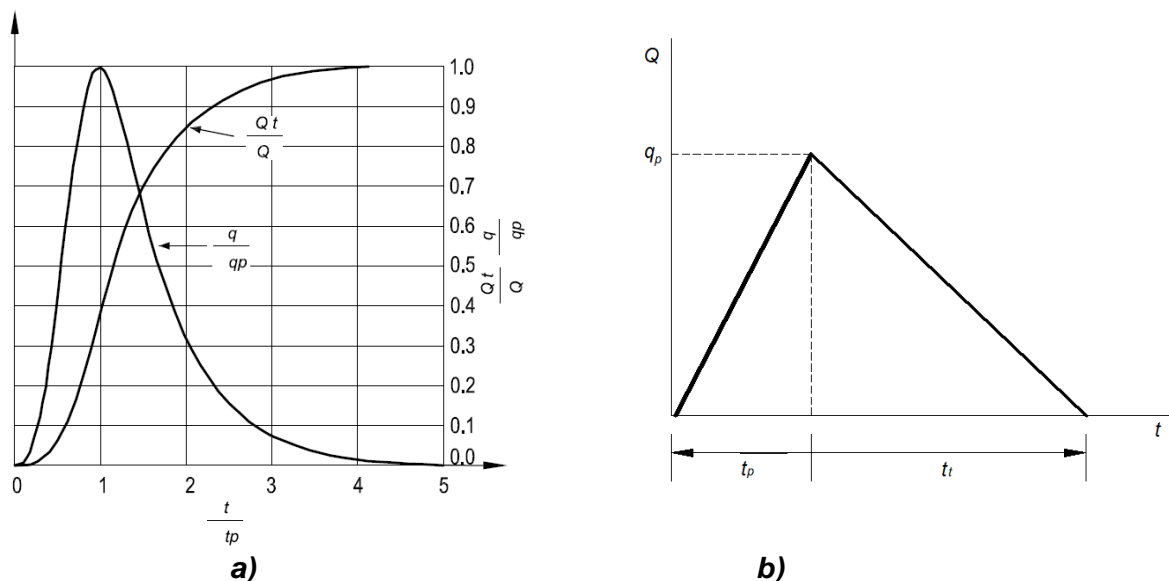


Figura 2.11. Hidrograma unitario sintético y acumulado (a) y unitario triangular (b)

2.3.2.4. Tiempo de retraso

En la expresión 2.12 T_r , es el tiempo de retraso o de recesión, en h; despejando q_p de ella y considerando la relación propuesta por el SCS entre T_p y T_r (expresión 2.13), resulta la expresión 2.14 que se emplea para su cálculo.

$$T_r = 1.67 T_p \quad (2.13)$$

$$q_p = \frac{0.749Q}{T_p} \quad (2.14)$$

Si el escurrimiento Q , se introduce como lámina (L_e , en mm) y se considera el área de la cuenca Ac (en ha), el escurrimiento máximo q_p (en m^3/s) se obtiene de la expresión 2.15.

$$q_p = \frac{0.0021 L_e \times Ac}{T_p} \quad (2.15)$$

Por otra parte, valor del tr se puede calcular con la ecuación que reporta el User's Manual del Geo-HMS:

$$T_r = \frac{L_c^{0.8} \times (S_r + 1)^{0.7}}{1900 \times S_0^{0.5}} \quad (2.16)$$

Dónde:

T_r = Tiempo de retraso o de recesión, en horas;

L_c = Longitud hidráulica de la cuenca, en pies;

S_r = Parámetro de retención de la cuenca, dado por la expresión (2.31) y que se define más adelante; y

S_0 = Pendiente de la cuenca, en %.

2.3.2.5. Tiempo de concentración

El tiempo de concentración T_c es el tiempo requerido por una gota de agua para fluir desde el punto más remoto en la cuenca hasta el punto de interés, y equivale al tiempo que tarda el agua en pasar del punto más alejado hasta la salida de la cuenca (Chow, *et al.*, 1999) o bien el tiempo desde el final de la tormenta hasta el término de su hidrograma de escurrimiento superficial (Campos, 2007).

Aparicio, (2012), por su parte, indica que el tiempo de concentración depende de la longitud máxima que debe recorrer el agua hasta la salida de la cuenca y de la velocidad que adquiere en promedio, dentro de la misma. Esta velocidad está en función de las pendientes del terreno y de los cauces y de la rugosidad de su superficie.

Si ya se conoce el tiempo de retraso, calculado como se mencionó en el inciso 2.3.2.3, el tiempo de concentración T_c se puede estimar de la expresión (2.18) que resulta de despejarlo de la relación 2.17 (Aparicio, 2012):

$$Tr = 0.6 T_c \quad (2.17)$$

$$T_c = \frac{Tr}{0.6} \quad (2.18)$$

Por otra parte, si se conoce la velocidad de la creciente (v_c , en km/h) y la longitud del cauce principal L_{cp} , T_c se puede calcular con la expresión 2.19 (Campos, 2007):

$$T_c = \frac{L_{cp}}{v_c} \quad (2.19)$$

Este mismo autor, propone varias fórmulas empíricas para el cálculo del T_c , de las que la de Kirpich (2.20), es la más conocida y empleada:

$$T_c = 0.066 \frac{L_{cp}^{1.155}}{H^{0.385}} \quad (2.20)$$

2.3.3. MEDICIÓN Y ESTIMACIÓN DE LOS ESCURRIMIENTOS

La cantidad de escurrimiento a partir de una lluvia depende de a) las condiciones de humedad de la cuenca al comienzo de la tormenta y de b) las características de las tormenta, tales como la cantidad de precipitación, la intensidad y la duración, Linsley, *et al.* (1977). Estos mismos autores consideran que, las características de la tormenta, están definidas por los datos registrados en las estaciones pluviométricas y que, sin embargo, ninguna medida singular sirve para definir las condiciones de humedad antecedente en la cuenca.

A decir de Campos (2007), la estimación del escurrimiento mensual en cuencas sin aforos, es en realidad un problema bastante frecuente, ya que la red hidrométrica además de ser escasa no ha sido planeada para cubrir las necesidades inmediatas y mucho menos las de largo plazo que plantea la estimación y el aprovechamiento de los recursos hidráulicos. Para ello, desde hace décadas se han propuesto muy diversos métodos empíricos de estimación, los cuales no son realmente aplicables en todos los

casos, y que muchas veces han conducido a errores de cuantificación, con las consecuencias negativas que esto origina.

La determinación del escurrimiento, comprende todas las opciones de métodos directos e indirectos de aforo en canales siempre que se pueda considerar el flujo como uniforme; de ellos, los que más se pueden aplicar al caso de cuencas, se describen brevemente enseguida.

2.3.3.1. Medición con molinete

La medición del escurrimiento o gasto (Q , en m^3/s) **de un cauce con molinete** (o corrientómetro como se le conoce en algunos países de Latinoamérica), **consiste en medir la velocidad del flujo** (v , en m/s) con este instrumento (ver figura 2.12); **determinar mediante un levantamiento topográfico el área de la sección hidráulica** (A , en m^2); **y aplicar la ecuación de continuidad** (2.21). Considerando flujo uniforme en el cauce, la velocidad se determina a 60 % del tirante (y , en m) contando el número de vueltas de las copas del molinete, que se asocia con la velocidad del flujo mediante una expresión lineal, del tipo 2.22, previamente determinada en laboratorio. En esta expresión α y β son parámetros de regresión lineal obtenidos con el proceso de calibración; α es además la velocidad necesaria para vencer la fricción mecánica (Linsley, *et al.*, 1977) y N es el número de revoluciones de las copas del molinete por efecto del flujo.

Esta medición se hace al centro de cada uno de los tramos en que se divide la sección hidráulica donde se hace la medición, como se ilustra en la figura 2.13. Para que el método sea aplicable con buena precisión, se debe elegir un tramo del cauce con sección lo más regular posible y uniforme, y pendientes suaves, para asegurar o acercarse al tipo de flujo al uniforme. Este método de aforo, se considera el más preciso de los indirectos y a menudo se le emplea como referencia para calibrar los demás.

$$Q = v A \quad (2.21)$$

$$v = \alpha N + \beta \quad (2.22)$$

2.3.3.2. Estimación en el cauce con limnímetros o limnógrafos

El escurrimiento superficial, medido como gasto (Q , en m^3/s) se puede medir en campo, mediante estructuras o estimarse mediante métodos de aforo (Springall, 1970); **la forma de medir los escurrimientos en un cauce es mediante un limnómetro o un limnógrafo** (Linsley, *et al.*, 1977). El primero es un instrumento que consiste básicamente y simplemente en una graduación a manera de un estadal o mira de topógrafo pintada sobre una de las paredes del conducto, que para el efecto debe habilitarse expresamente y calibrarse previamente con algún otro método que se considere igualmente o más preciso; así, los

valores graduados pueden ser directamente de escurrimiento, siempre que la sección de medición haya sido expresamente construida para el efecto y su área previamente determinada. Este mismo tipo de dispositivos, debidamente calibrados para el caso, se emplea para estimar el volumen almacenado en presas y bordos. Ambos casos de limnímetros se muestran en las imágenes de la figura 2.14.

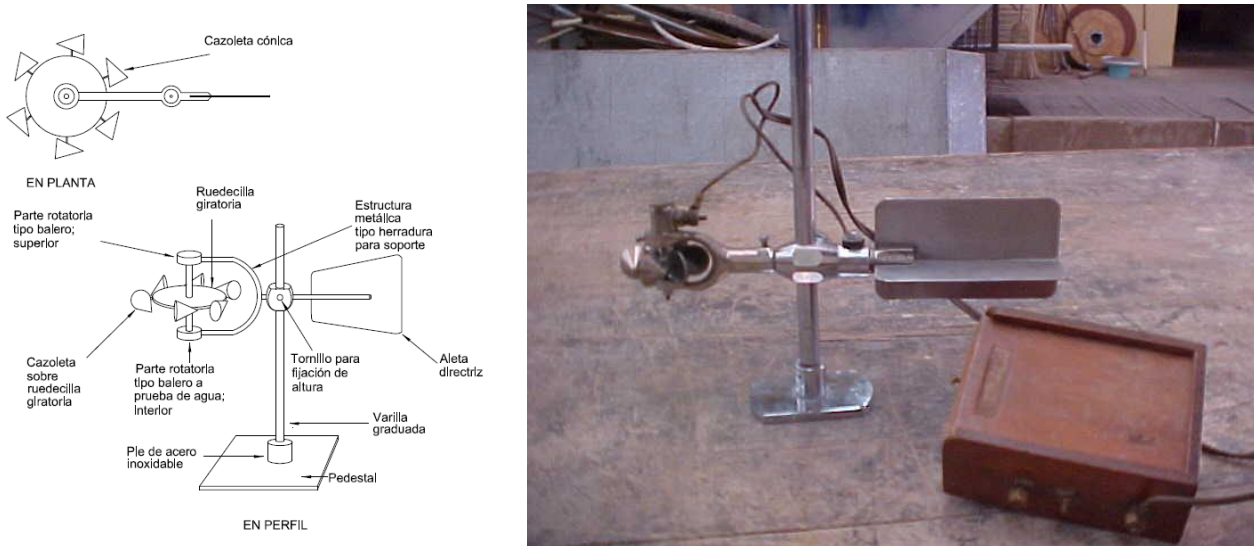


Figura 2.12. Molinete para medir la velocidad del flujo en un cauce y estimar el escurrimiento aplicando la ecuación de continuidad (2.21)

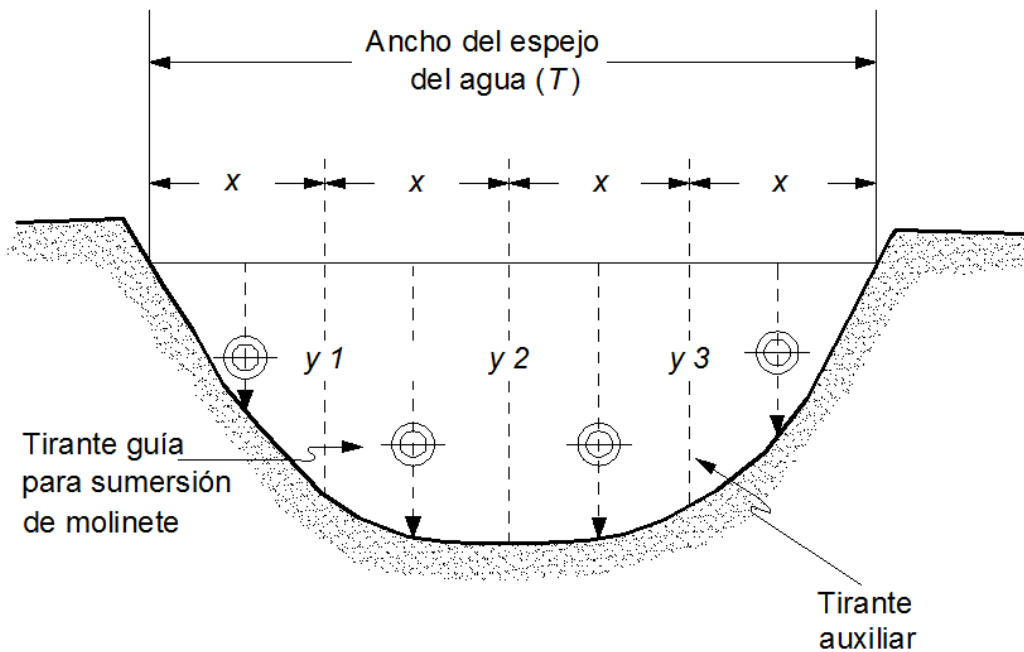


Figura 2.13. Seccionamiento de un canal en tierra para la medición de la velocidad del flujo a 60 % del tirante

Derivado de las necesidades de modernización de las redes hidrométricas y de ampliación de su cobertura, y con el fin de contribuir en algún grado en tales procesos, en los últimos años, se viene desarrollando un dispositivo electrónico de medición de niveles de flujo en ríos, que permitirá el registro y procesamiento de datos para suplir y ampliar, de una manera competitiva, las funciones de los actuales equipos de registro conocidos como limnógrafos (Franquet, 2009). El dispositivo en cuestión tiene la capacidad de comunicarse con una PC portátil con el que se programan las frecuencias de la toma de lecturas y se recoge la información almacenada, la cual puede procesarse de inmediato y enviarse vía internet a donde se defina.



a: En el cruce del Río Sabinas con la carretera 57, Coahuila, México

b: De la Presa El Teópari, Pueblo de Álamos, Sonora, México

Figura 2.14. Empleo de limnímetros para la medición del escurrimiento de un río (a) y para el volumen almacenado en una presa (b)

Franquet (2009), indica que una forma más eficiente de aforar el flujo es un limnógrafo, el cual tiene la ventaja de poder medir o registrar los niveles de agua en forma continua en un papel especialmente diseñado, que gira alrededor de un tambor movido por un mecanismo eléctrico o de relojería. Los limnógrafos están protegidos dentro de una caseta de obra de fábrica y vienen acompañados de las instrucciones precisas para su operación y cuidado, así como de un sistema de transmisión de datos *on line* por teleproceso. La figura 2.15, muestra de manera esquemática la forma de instalación de un limnógrafo y una imagen de un dispositivo comercial de éstos; como se observa en ella, en realidad un limnógrafo es un registrador continuo de valores de limnómetro.

La gráfica elevación-gasto ($H-Q$) o tiempo-elevación ($t-H$) de cada evento de escurrimiento registrada en un limnógrafo se denomina limnigrama (Arellano, 2012), como el que se muestra a manera de ejemplo en la figura 2.16, del que se puede definir de manera directa o se pueden calcular los parámetros de cada evento de escurrimiento

como el gasto máximo ($Q_{m\acute{a}x}$) o el caudal pico (Q_p), o bien los valores respectivos de tirante (y) o de carga (H).



Figura 2.15. Empleo de limnigrafos para la medición del escurrimiento de un río

2.3.3.3. Estimación en el cauce

La determinación del escurrimiento en una cuenca, de la magnitud que sea (cuenca, subcuenca, microcuenca o nanocuenca), se debe hacer en su salida, y **puede medirse o estimarse en su cauce principal después de ocurrida la avenida**, mediante el registro de las huellas que deja en sus paredes, **por el Método de Sección y Pendiente**, que aplica la ecuación de Chezy-Manning (2.23) que describe Chow (1982), Pérez (1995 y 2006), para el cálculo de la velocidad del flujo y la expresión 2.21 para el cálculo de Q .

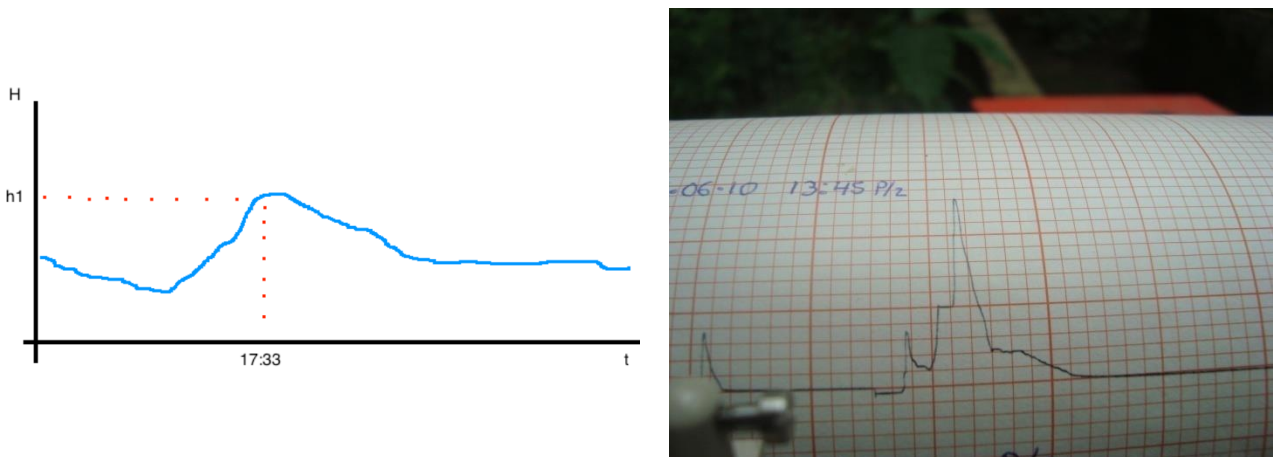


Figura 2.16. Ejemplos de un limnigrama en el que se puede determinar el valor de la lámina de escurrimiento

$$v = \frac{1}{n} r^{2/3} S_0^{1/2} \quad (2.23)$$

En esta expresión, v es la velocidad de la corriente, en m/s; n es el coeficiente de rugosidad de Manning, que se puede obtener de tablas como la que se muestra en la tabla 2.1 (Sotelo, 2002) y se incluye sin dimensiones; r es la relación hidráulica (área hidráulica dividida por el perímetro mojado P , y comúnmente llamada radio hidráulico), en m; y S_0 , es la pendiente longitudinal del cauce, sin dimensiones.

Para la determinación del área hidráulica y del perímetro mojado, es necesario hacer un levantamiento topográfico por el método de secciones transversales, de modo que se determinan ambos valores para varias de ellas y luego se obtienen los promedios.

2.3.3.4. Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento (C_e) se define como el cociente entre el volumen escurrido (V_e) y el volumen precipitado total ocurrida en ella (V_p), en el intervalo considerado para para ambos procesos (Campos, 2000 y Pérez, 2001); lo cual puede expresarse matemáticamente como decimal si se obtiene con la expresión 2.24 o como porcentaje si se multiplica por 100 (expresión 2.25). En ambas expresiones, se puede emplear la lámina escurrida Le y la lámina precipitada L_p (que equivale a la precipitación media anual, Pma), si se conocen directamente.

$$C_e = \frac{V_e}{V_p} = \frac{Le}{Pma} = \frac{Le}{L_p} \quad (2.24)$$

$$C_e = \frac{V_e}{V_p} \times 100 = \frac{Le}{Pma} \times 100 = \frac{Le}{L_p} \times 100 \quad (2.25)$$

Por lo tanto, el escurrimiento expresado como lámina Le , se puede calcular con la expresión 2.26 y el volumen de escurrimiento medio anual $Vema$ (en m^3) se puede obtener aplicando la expresión 2.27, en la que el área de la cuenca Ac , se da en m^2 y Pma en m.

$$Le = C_e \times Pma \quad (2.26)$$

$$Vema = C_e \times Ac \times Pma \quad (2.27)$$

Para determinar el C_e , en la práctica se recurre a tablas, cuyos argumentos son algunos de los factores involucrados en el escurrimiento, que se consideran los más importantes y son fáciles de evaluar o estimar.

Tabla 2.1. Valores del coeficiente n en la ecuación de Manning para cauces naturales (Sotelo, 2002)

TIPO Y DESCRIPCIÓN DEL CAUCE		MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO	
1	ARROYOS (ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA EN AVENIDAS < 30 m)				
	A. Corriente en planicie:				
	1	Limpios, rectos, sin deslaves ni estancamientos profundos, tirante alto.	0.025	0.030	0.033
	2	Igual al anterior, pero más rocoso y con hierba.	0.030	0.035	0.040
	3	Limpios, sinuosos, algunas irregularidades del fondo.	0.033	0.040	0.045
	4	Igual al anterior, algo de hierbas y rocas.	0.035	0.045	0.050
	5	Igual al anterior, pero menor profundidad y secciones poco eficaces.	0.040	0.048	0.055
	6	Igual que el 4, pero con más piedras.	0.045	0.050	0.060
	7	Tramos irregulares con hierba y estancamientos profundos.	0.050	0.070	0.080
	8	Tramos con mucha hierba, estancamientos profundos, cauces de inundación con raíces y plantas subacuáticas.	0.075	0.100	0.150
	B. Corrientes de montañas, sin vegetación en el cauce, bordos muy inclinados, árboles y arbustos a lo largo de las márgenes, que quedan sumergidos durante las inundaciones:				
	1	Fondo de grava, boleo y algunos cantos rodados.	0.030	0.040	0.050
	2	Fondo de boleo y grandes rocas.	0.040	0.050	0.070
2	PLANICIES DE INUNDACIÓN:				
	A. Pastura sin arbustos:				
	1	Pasto bajo.	0.025	0.030	0.035
	2	Pasto alto.	0.030	0.035	0.050
	B. Áreas de cultivo:				
	1	Sin cultivo.	0.020	0.030	0.040
	2	Cultivo maduro en surcos.	0.025	0.035	0.045
	3	Cultivo maduro en campo.	0.030	0.040	0.050
	C. Arbustos				
	1	Arbustos escasos y mucha hierba.	0.035	0.050	0.070
	2	Pocos arbustos y árboles, en invierno.	0.035	0.050	0.060
	3	Pocos arbustos y árboles, en verano.	0.040	0.060	0.080
	4	Media a densa población de arbustos, en invierno.	0.045	0.070	0.110
	5	Media a densa población de arbustos, en verano.	0.070	0.100	0.160
	D. Árboles				
	1	Población densa de sauces en verano, rectos.	0.110	0.150	0.200
	2	Terrenos talados con troncos muertos.	0.030	0.040	0.050
	3	Igual al anterior, pero con troncos retoñados.	0.050	0.060	0.080
	4	Gran concentración de madera, en algunos árboles caídos, pocos de escaso crecimiento, nivel de inundación abajo de las ramas.	0.080	0.100	0.120
	5	Igual al anterior, pero el nivel de inundación alcanza las ramas.	0.100	0.120	0.160
3	RÍOS (ANCHO DE LA SUPERFICIE LIBRE DEL AGUA EN AVENIDAS > 30 m). EL VALOR DE n ES MENOR QUE EN LOS ARROYOS DE IGUAL DESCRIPCIÓN, PERO DONDE LOS BORDOS OFRECEN MENOR RESISTENCIA.				
	A. Secciones regulares sin cantos rodados ni arbustos.		0.025		0.060
	B. Secciones rugosas e irregulares.		0.035		0.100

Según la extinta Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH, 1974) citada por Pérez (2001), para las cuencas del país, se puede estimar **el Ce en base a tres factores, que son: cubierta vegetal, área de la cuenca y monto de la precipitación en la misma**. Los rangos de valores sugeridos para estos factores, son los que se presentan en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Valores de Ce para las cuencas mexicanas, según su cubierta vegetal, su superficie y la precipitación media anual (SRH, 1974)

FACTOR	CONDICIÓN	Ce (%)
Cubierta vegetal	Terrenos cultivados o pastos	01 - 30
	Bosque	05 - 20
	Sin cubierta vegetal	25 - 50
Superficie de la cuenca (km ²)	Hasta 10	25
	Entre 10 y 100	15
	Entre 100 y 500	10
	Mayores de 500	5
Precipitación media anual (mm)	Hasta 800	00 - 05
	Entre 800 y 1200	05 - 15
	Entre 1200 y 1500	15 - 35
	Más de 1500	35 - 50

En la tabla referida, se ve que los rangos de valores para los tres factores, son muy amplios, lo cual dificulta tomar los valores más adecuados para una condición dada, si no se cuenta con información adicional que permita normar el criterio del proyectista; en tal caso, se recomienda tomar ambos límites del rango elegido para cada factor, sumarlos de manera correspondiente y adoptar como valor definitivo de Ce, el que resulte del promedio de las sumas (Pérez, 1995 y 2001).

A este respecto, Campos (2000), asegura que **el Método del Coeficiente de Escurrimiento** (denominado por este autor como MCE) **es la técnica más sencilla y difundida para estimar el régimen hidrológico de un río o los volúmenes escurridos en un punto específico de éste, cuando no existe información hidrométrica cercana en la corriente**; pero también considera que es un criterio o procedimiento aproximado, por la propia definición del Ce.

El procedimiento general del MCE, descrito por Campos (2007), consiste en calcular primeramente las precipitaciones medias anuales, en las áreas de cada una de las estaciones pluviométricas que previamente fueron seleccionadas para ser utilizadas, con métodos como el de los Polígonos de Thiessen o a través de mapas de isoyetas. En seguida se cuantifican los valores de Ce, a partir de la tabla 2.2 y del conocimiento de las características que se requieren. El volumen escurrido, se calcula empleando la

expresión 2.27. Por el contrario, cuando se tienen datos de precipitación y los correspondientes de escurrimiento se puede calibrar el método calculando los valores del C_e y comparándolos con los obtenidos de la tabla 2.2.

La SEMARNAT (2002), publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) la **Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua- que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales**, en cuyo APÉNDICE NORMATIVO A, establece a su vez los **métodos para determinar el volumen medio anual de escurrimiento y describe el método para calcular el C_e , en función del tipo y uso del suelo y del volumen de precipitación anual de la cuenca en estudio**, indicando expresamente: a falta de información específica, con apoyo de los servicios del INEGI y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca, según se especifican en la tabla 2.3, en tres diferentes tipos: **A** suelos permeables, **B** suelos medianamente permeables, y **C** suelos casi impermeables, y al tomar en cuenta el uso actual del suelo, se obtiene el valor del parámetro K (que aquí se denomina parámetro del suelo para escurrimiento y se denota por K_e para eliminar confusión con el factor de erosividad de la lluvia que se trata en el tema 2.5.3), de la tabla 2.4; el valor del C_e , se obtiene de las expresiones 2.28 y 2.29, de acuerdo con los rangos indicados para K_e .

Cuando $K_e \leq 0.15$:

$$C_e = \frac{K_e(P_{ma} - 250)}{2000} \quad (2.28)$$

Cuando $K_e > 0.15$:

$$C_e = \frac{K_e(P_{ma} - 250)}{2000} + \frac{(K_e - 0.15)}{1.5} \quad (2.29)$$

Asimismo, se refiere que cuando en la cuenca de estudio existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K_e se calcula como la resultante de dividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas; y que las fórmulas serán válidas para valores de precipitación media anual de entre 350 y 2,150 mm, lo cual implica que para muchos casos como los de la Sierra Madre de Chiapas, no aplicará.

Por su parte, Arellano (2012), concluye que el valor del C_e , provee de información sobre la respuesta hidrológica de la cuenca a la lluvia y permite comparar la respuesta hidrológica y mecanismos de diferentes cuencas, de cómo las condiciones del paisaje de la cuenca filtra la lluvia en escurrimiento; depende de los diferentes usos del suelo, la cobertura vegetal, las condiciones de manejo de los sistemas de producción y las características físicas del suelo; por tanto, es importante conocer la variación espacial y

temporal de la vegetación y su manejo, para determinar el régimen de humedad de la cuenca, sus condiciones de funcionamiento hidrológico y la disponibilidad de agua en su entorno; por tanto, es importante hacer referencia a qué cuenca y qué periodo de estudio (fecha del evento de lluvia, lluvia asociada a determinado periodo de retorno), corresponden los valores de C_e reportados.

Tabla 2.3. Características del tipo de suelo para la determinación del coeficiente K_e para el cálculo del coeficiente de escurrimiento C_e (DOF, 2002)

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos.
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajonosos.
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas.

Tabla 2.4. Valores de K_e , según el tipo y uso de suelo para el cálculo del C_e con base en la norma NOM-011-CNA-2000 (DOF, 2002)

USO DE SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas sin cultivar y desnudas	0.26	0.28	0.30
• Cultivos			
Legumbres o Rotación de Cultivos	0.24	0.27	0.30
Granos Pequeños	0.24	0.27	0.30
Pastizales: % de suelo cubierto			
Más de 75% (Poco)	0.14	0.20	0.28
Del 50% al 75% (Regular)	0.20	0.24	0.30
Menos del 50% (Excesivo)	0.24	0.28	0.30
• Bosque			
Cubierto más de 75%	0.07	0.16	0.24
Cubierto 50% al 75%	0.12	0.22	0.26
Cubierto 25% al 50%	0.17	0.26	0.28
Cubierto menos de 25%	0.22	0.28	0.30
• Zonas Urbanas	0.26	0.29	0.32
• Caminos	0.27	0.30	0.33
• Pradera Permanente	0.18	0.24	0.30

2.4. ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO POR EL MÉTODO DEL NÚMERO DE CURVA

2.4.1. EL CONCEPTO DE NÚMERO DE CURVA

Los hidrólogos del Soil Conservation Service (SCS) del United States Department of Agriculture (USDA), propusieron al inicio de la década de los setentas del siglo pasado (Mockus, citado por Campos, 2002), un método para estimar el escurrimiento de una cuenca a partir de la lluvia en exceso ocasionada por una tormenta, el cual se base en el parámetro N_c , que describe numéricamente una combinación específica de suelo, uso del terreno y su tratamiento (Terzoudi, *et al.*, 2007 y Ponce, 1996), el cual denominaron **complejo hidrológico suelo-cobertura** o más simplemente grupos hidrológicos de suelos que se describen en los temas siguientes.

2.4.1.1. Grupos hidrológicos de suelos

Campos (2007 y 2010), coinciden en que la clasificación de los **grupos hidrológicos de suelos**, toma en cuenta principalmente el potencial de los suelos para absorber humedad y generar precipitación en exceso al final de tormentas de larga duración, que ocurren después de que los suelos se han mojado y que han tenido oportunidad de expandirse, y que, además no cuentan con una cubierta vegetal protectora. Los grupos hidrológicos de suelos definidos por el SCS, son los que se describen enseguida, en los que la velocidad de infiltración es la rapidez con la que el agua entra al suelo por su superficie y es controlada por las condiciones de ésta, y la velocidad de transmisión, es la velocidad con la cual el agua se desplaza dentro del suelo y es controlada por los horizontes de éste.

Grupo A Bajo potencial de escurrimiento: Suelos que tienen alta velocidad de infiltración cuando están mojados; consisten principalmente de arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo; estos suelos tienen altas velocidades de transmisión, con valores mayores de 7.6 mm/h.

Grupo B Suelos con moderada velocidad de infiltración cuando están mojados; consisten principalmente de suelos con cantidades moderadas de texturas finas a gruesas, con drenaje medio y algo profundos; son básicamente suelos arenosos, que tienen moderadas velocidades de transmisión de agua (de 3.8 a 7.6 mm/h).

Grupo C Suelos que tienen baja velocidad de infiltración; consisten básicamente de arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo; estos suelos tienen bajas velocidades de transmisión del agua (de 1.3 a 3.8 mm/h).

Grupo D Alto potencial de escurrimiento. Suelos que tienen baja velocidad de infiltración cuando están mojados; consisten principalmente de suelos arcillosos con alto poder de hinchamiento, con nivel freático alto y permanente,

con estratos arcillosos cerca de la superficie, o bien, suelos someros sobre horizontes impermeables; tienen muy bajas velocidades de transmisión del agua (de 0.0 a 1.3 mm/h).

Fuentes (1997) reporta los valores de Porosidad (Pr) y de la conductividad hidráulica saturada (Ks) para los cuatro grupos hidrológicos de los suelos, mismos que se concentran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Valores de porosidad (Pr) y de Conductividad hidráulica a saturación (Ks) para los grupos hidrológicos de suelos

GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO	Pr	Ks
	(cm^3/cm^3)	(cm/h)
A	0.40 - 0.50	2.00 - 10.00
B	0.40 - 0.50	0.10 - 5.00
C	0.50 - 0.55	0.20 - 2.00
D	0.45 - 0.50	0.05 - 0.05

2.4.1.2. Clases de uso del terreno y tratamientos

El uso del suelo es la cobertura del terreno o cuenca que incluye cualquier tipo de vegetación y el barbecho (suelo desnudo), así como las superficies impermeables (caminos, techos, etc.); se aplica principalmente a los usos agrícolas del terreno e incluye las prácticas mecánicas como del contorneo o terraceo y las prácticas de manejo tales como el control del pastoreo o la rotación de cultivos; finalmente las clases son las combinaciones de uso y tratamiento que pueden encontrarse en las cuencas rurales (Campos, 2011).

2.4.1.3. Clases en los terrenos cultivados

Campos (2011), reporta las siguientes clases de los terrenos bajo cultivo:

- **Legumbres o rotación de pradera (Barbecho):** tienen alto potencial de escurrimiento debido a que el suelo se mantiene si vegetación para conservar su humedad, al evitar la transpiración.
- **Cultivo en surco:** en cualquier campo de cultivo (maíz, sorgo, tomate, etc.), plantado en surcos separados, de manera que la mayor parte del suelo está expuesto al impacto de la lluvia durante la época de desarrollo de yal cultivo.

- **Cereales finos (trigo, cebada, lino, etc.):** se plantan en surcos próximos, de manera que el suelo no está expuesto al impacto de la lluvia, excepto durante un corto tiempo en la época de siembra.
- **alfalfa, trébol, etc., y sus combinaciones):** son cultivos plantados en surcos juntos o al voleo; esta cobertura puede brindar protección al suelo por un año o más. Específicamente, las rotaciones son secuelas planteadas para mantener la fertilidad del suelo o reducir su erosión.

Respecto a los tratamientos o prácticas agrícolas, este mismo autor, reporta lo siguiente:

- **Surcos rectos:** no se toma en cuenta la pendiente del terreno; de hecho los surcos siguen la mayor inclinación del suelo; en los surcos a nivel, éstos siguen el contorno general del terreno; las terrazas son prácticas que consisten en construir bordos o combinaciones de bordo-zanja para controlar el escurrimiento en el terreno y evitar la erosión.
- **La rotación pobre contiene cultivo en surco,** como maíz o trigo únicamente o combinaciones de granos pequeños y barbecho. La rotación buena, contiene alfalfa, pasto u otras legumbres que se siembran juntas, para mejorar la textura y aumentar la infiltración del suelo.

2.4.1.4. Clases de pradera natural

- **Pobre:** tienen pastoreo excesivo y las plantas o vegetación cubren menos del 50 % del área.
- **Regular:** no tiene pastoreo excesivo y las plantas cubren del 50 % al 75 % de la superficie.
- **Buena:** tiene pastoreo ligero y las plantas cubren más del 75 % del área.

La pradera permanente es un campo con pasto en continuo desarrollo, protegido de pastoreo y generalmente segado para obtener heno.

2.4.1.5. Clases de bosques

Al igual que las rotaciones y la pradera natural, la clasificación de los bosques obedece a sus efectos hidrológicos, no a la producción de madera.

- **Bosque pobre:** Tiene excesivo pastoreo, árboles pequeños y el arroyo se destruye regularmente por incendio.

- **Bosque regular:** tiene poco pastoreo, pero no se queman; pueden tener escaso mantillo o arrope y, generalmente están protegidos del pastoreo.
- **Bosque bueno:** protegido del pastoreo de manera que el suelo siempre está cubierto de arrope y arbustos.

El N_c se puede obtener de las tablas 2.6 y 2.7, para uso forestal y para uso agrícola del suelo, respectivamente (McCuen, 2005). Un cuadro similar se puede consultar en la fuente citada para el uso urbano de suelo. En la definición de los valores reportados en estas tablas se consideran factores tales como:

- Cubierta vegetal
- Uso del suelo
- Grupo hidrológico de suelo (Tipo de suelo: A, B, C y D).
- Condición de humedad antecedente (se consideran 5 días).

Respecto al Uso del Suelo, Arellano (2012), refiere que está asociado a la cobertura vegetal y al tipo de vegetación (agrícolas, forestal, pastizal, tierras en descanso, superficiales impermeables y áreas urbanas) y que el manejo del suelo se refiere a las prácticas mecánicas como las curvas de nivel propias del uso agrícola, y prácticas de manejo como el pastoreo controlado y la rotación de cultivos. En suelos cultivados se identifican tierras de descanso, praderas, cultivos en hilera, cultivos de granos, rotaciones (pobre, regular y buena) cultivos en hileras rectas, cultivos tupidos, campo sembrados en curvas de nivel y cultivos con terrazas.

Adicionalmente McCuen (2005), hace las siguientes consideraciones:

- a. Para usos de suelo con áreas impermeables, los números de curva son calculados asumiendo que 100% de las áreas impermeables están conectadas directamente al sistema de drenaje. Las áreas permeables (césped) son consideradas como equivalente a los céspedes en buenas condiciones. Áreas impermeables tienen un N_c de 98.
- b. Incluye calles pavimentadas.
- c. Uso para el diseño de áreas no clasificadas completamente o en proceso de construcción. El porcentaje de áreas impermeables de zonas urbanas bajo varias consideraciones. El usuario podría determinar el porcentaje de impermeabilidad. Por tanto usando el N_c de áreas nuevamente clasificadas, el N_c compuesto puede ser calculado para cualquier grado de desarrollo.

- d. Los números de curva del grupo A han sido desarrollados sólo para desiertos arbustivos

Tabla 2.6. Valores del número de curva (Nc) para uso forestal del suelo

DESCRIPCIÓN DEL USO DEL SUELO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	Nc PARA LOS GRUPOS DE SUELO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
Tierras forestales, césped o huertos siempre verdes o deciduos	Pobre	55	73	82	86
	Media	44	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Matorral	Pobre	48	67	77	83
	Media	35	56	70	77
	Buena	30	48	65	73
Bosque o selva	Pobre	45	66	77	83
	Media	36	60	73	79
	Buena	25	55	70	77
Fincas	–	59	74	82	86
Áreas de bosques herbáceos	Pobre		80	87	93
	Media		71	81	89
	Buena		62	74	85
Bosque de encino y álamos	Pobre		66	74	79
	Media		48	57	63
	Buena		30	41	48
Bosque de coníferas	Pobre		75	85	89
	Media		58	73	80
	Buena		41	61	71
Selva-pastos	Pobre		67	80	85
	Media		51	63	70
	Buena		35	47	55

El método de los números de curva (Nc) o que Arellano (2012) denomina como el Método de las Curvas Numéricas (CN), se desarrolló para estimar el escurrimiento directo producido por un determinado evento de lluvia considerando las condiciones de humedad antecedente derivada de eventos de lluvias previas. El escurrimiento superficial directo se estima como una función no-lineal de la precipitación media

(P_m) y el coeficiente o parámetro de retención o retención máxima (S_r), el cual depende del contenido de humedad del suelo, el uso del suelo y el tipo de suelo (Arnold, *et al.*, citados por Krysanova *et al.*, (2002), y Dal-Ré, (2003).

Tabla 2.7. Valores del número de curva de escurrimiento (N_c) para uso agrícola del suelo

DESCRIPCIÓN DEL USO DEL SUELO	TRATAMIENTO O PRÁCTICA	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	N_c PARA LOS GRUPOS HIDROLÓGICOS			
			A	B	C	D
Suelo agrícola cultivado						
Barbecho	Surcos rectos o suelo desnudo	-	77	86	91	94
	Labranza de conservación	Pobre	76	85	90	93
Buena		74	83	88	90	
Cultivos en línea	Surcos continuos	Pobre	72	81	88	91
		Buena	67	78	85	89
	Labranza de conservación	Pobre	71	80	87	90
		Buena	64	75	82	85
	Contorneado	Pobre	70	79	84	88
		Buena	65	75	82	86
	Contorneado y cultivos de conservación	Pobre	69	78	83	87
		Buena	64	74	81	85
	Contorneado y terrazas	Pobre	66	74	80	82
		Buena	62	71	78	81
	Contorneados y terrazas con cultivos de conservación	Pobre	65	73	79	81
		Buena	61	70	77	80
Granos pequeños	Surcos continuos	Pobre	65	76	84	88
		Buena	63	75	83	87
	Cultivos de conservación	Pobre	64	75	83	86
		Buena	60	72	80	84
	Contorneado	Pobre	63	74	82	85
		Buena	61	73	81	84
	Contorneado y cultivos de conservación	Pobre	62	73	81	84
		Buena	60	72	80	83
	Contorneado y terrazas	Pobre	61	72	79	82
		Buena	59	70	78	81
	Contorneado y terrazas con cultivos de conservación	Pobre	60	71	78	81
		Buena	58	69	77	80
Leguminosas	Surcos rectos	Pobre	66	77	85	89

DESCRIPCIÓN DEL USO DEL SUELO	TRATAMIENTO O PRÁCTICA	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	Nc PARA LOS GRUPOS HIDROLÓGICOS			
			A	B	C	D
o praderas con rotación de cultivos		Buena	58	72	81	85
		Pobre	64	75	83	85
	Contorneo	Buena	55	69	78	83
		Pobre	63	73	80	83
		Buena	51	67	86	89
Tierra agrícola no cultivada y áreas de pastoreo	Tratamiento no mecanizado	Pobre	68	79	86	89
		Media	49	69	74	84
		Buena	39	61	74	80
	Contorneado	Pobre	47	67	81	88
		Media	25	59	75	83
		Buena	6	35	70	79
Pradera permanente		–	30	58	71	78

Campos (2010), reporta los valores de N_c , para el caso particular de diferentes condiciones de bosque que se pueden presentar en zonas de vegetación intensa o de evapotranspiración (E_{vt}) asociada y originada de precipitaciones intensas como es el caso de la Costa de Chiapas (tabla 2.8); esta tabla tiene el inconveniente de que no refiere las especies que pudieran constituir el bosque ni ninguna otra precisión de cubierta vegetal menor y de pendiente del terreno.

Tabla 2.8. Valores del número de curva (N_c) para diferentes condiciones de bosque (Campos, 2010)

CONDICIÓN DE COBERTURA VEGETAL	GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO			
	A	B	C	D
Muy ralo o baja E_{vt}	56	75	86	91
Ralo o baja E_{vt}	46	68	78	84
Normal o E_{vt} media	36	60	70	76
Espeso o alta E_{vt}	26	52	62	69
Muy espeso o alta E_{vt}	15	44	54	61

2.4.1.6. Significado y determinación

Arellano (2012), considera que los números de curva y su adimensionalidad no tienen un significado físico específico y cita textualmente a Dal-Ré (2003) para referir que “es un

índice de potencialidad de producir escorrentía de una cuenca y es inversamente proporcional a la máxima capacidad de retención de la misma” y que los valores de los N_c son indicadores de la proporción del escurrimiento; de esta forma, valores de cercanos a 100 sugieren que el escurrimiento es producto del flujo superficial, reduciéndose al máximo la infiltración del agua en el suelo; es decir, una capacidad máxima de retención; S_r igual a cero, representa un terreno totalmente saturado o impermeable; por otro lado, un valor de N_c de cero, representa una capacidad de retención infinita, esto es un terreno permeable e insaturable (Aparicio, 2012).

El N_c se puede calcular con la expresión 2.30, obtenida de la 2.31, en las que S_r es el parámetro de retención, que varía espacialmente debido a los cambios en el uso, el manejo y la pendiente del suelo, y temporalmente como resultado de los cambios en su contenido de humedad. Esta expresión, de hecho justamente, acota el valor del N_c para variar entre 0 y 100. Una solución gráfica de la expresión 2.30 para diferentes valores de número de curva se presenta en la figura 2.15, (Neitsch, *et al.*, 2001 y Stone *et al.*, 1996, citado por Terzoudi, *et al.*, 2007).

$$N_c = \frac{25400}{S_r + 254} \quad (2.30)$$

$$S_r = 25.4 \frac{1000}{N_c} - 10 = \frac{25400}{N_c} - 254 \quad (2.31)$$

Y el escurrimiento, expresado como lámina (L_e , en m), se puede obtener de la expresión 2.34 (obtenida de la 2.32, sustituyendo l_a por su equivalente de la expresión 2.33):

$$Q = \frac{(Pma - l_a)^2}{[S_r + (Pma - l_a)]} \quad (2.32)$$

$$l_a = \lambda S_r = 0.2 S_r \quad (2.33)$$

$$L_e = \frac{(Pma - 0.2S_r)^2}{Pma + 0.8S_r} \quad (2.34)$$

Según Arellano (2012), la retención máxima potencial (S_r) depende de las condiciones del suelo, la cobertura vegetal y el manejo de los cultivos, lo que concuerda con Mockus, citado por Rallison y Miller (1982), quienes indican que el valor de S_r está limitado por la velocidad de infiltración de la superficie del suelo o la cantidad de humedad almacenada en el perfil del suelo. Los valores de S_r para diferentes combinaciones de uso del suelo se estiman graficando los datos de lluvia (Pma) y escurrimiento (L_e), estimando el N_c y despejando el valor de S_r para tener la expresión 2.31 que resulta de modificar la 2.30.

De otra parte, la expresión 2.34 es válida cuando $Pma > 0.2Sr$, por el contrario, si $Pma < 0.2Sr$, entonces no se presenta escurrimiento ($Le = 0$) debido a que la lluvia no supera el valor de la . Sin embargo, el numerador ($Pma - 0.2Sr$) sería negativo y al elevarlo al cuadrado sería positivo. De esta forma, según se muestra en la figura 2.17, la rama de la hipérbola situada a la izquierda del punto de tangencia, desde el punto de vista hidrológico no es significativa (Hawkins, 1993; y Dal-Ré, 2003).

En la idea de ampliar la aplicabilidad del método a otras condiciones, Mishra *et al.*, (2005), revisaron la metodología del Nc del SCS empleando datos que procedían de cuencas con superficies de entre 0.3 y 30,351.5 ha y datos de lluvia de 179 eventos registrados en periodos de 1 a 50 años; discretizaron la precipitación (Pr , en mm) en cinco clases de acuerdo a su magnitud: Clase A para eventos con $Pr \leq 12.7$, Clase B para Pr entre 12.7 y 25.4, Clase C para Pr entre 25.4 y 38.1, Clase D para Pr entre 38.1 y 50.8, y Clase E para $Pr > 50.8$; y propusieron la expresión 2.35 para el cálculo de Le , con $a = 0.5$ y λ de la expresión 2.33 igual a la mediana de lluvia por evento en la cuenca; al evaluar ambas expresiones, estos autores encontraron que para eventos con Pr mayor de 38.1 mm, la expresión del SCS (2.32) funciona bien, pero que en general, para todos los eventos funcionaba mejor la expresión 2.35 propuesta por ellos.

$$Le = \frac{(Pr - la)^2}{Sr + a(Pr - la)} \quad (2.35)$$

De otra parte, Paz (2009), hizo un análisis de las ecuaciones 2.30, 2.31 y 2.32 del SCS enfocándose en sus hipótesis matemáticas intrínsecas, concluyendo que no tienen sustento hidrológico y no tiene sentido seguir buscándoselo, por lo que propone buscar otra ecuación que sí tenga fundamentación física; según este investigador, el método es consecuencia de la hipótesis absurda de igualar dos líneas rectas $Le = Lp$ y $Le = Pr - Sr$, lo cual sólo es posible cuando Sr tiende a cero y cuando P tiende a infinito; es decir que dicha ecuación se acerca más a su rango de validez para valores de precipitación grandes, lo que coincide con lo que concluyeron Mishra *et al.* (2005) expuesto en el párrafo anterior, aunque ellos hicieron un análisis exhaustivo de datos de campo y Paz (2009), únicamente efectuó un análisis matemático.

No obstante, Ponce and Hawkins (1996), comentan que el método del SCS tiene ventajas y desventajas; como ventajas del método expone que es 1) simple, 2) predictivo y 3) estable, además de que 4) sólo usa un parámetro y 5) que su valor depende de los valores más relevantes de una cuenca como tipo de suelo, manejo y uso del suelo, condiciones de humedad antecedente y condición de la superficie en la cual se da el escurrimiento; en contraste, anotaron que sus desventajas son: 1) los escurrimientos son muy sensibles ante un cambio de número de curva, 2) información más detallada de cómo variar el número de curva ante los diversos valores de humedad antecedente, 3) la falta de precisión del método para diferentes biomásas, 4) falta de suficiente información sobre cómo el número de curva se ve afectado por la escala

espacial de aplicación, y 5) el fijar la abstracción inicial a un valor de 0.2 en lugar de regionalizar el valor basados en la geología y clima, de cada zona.

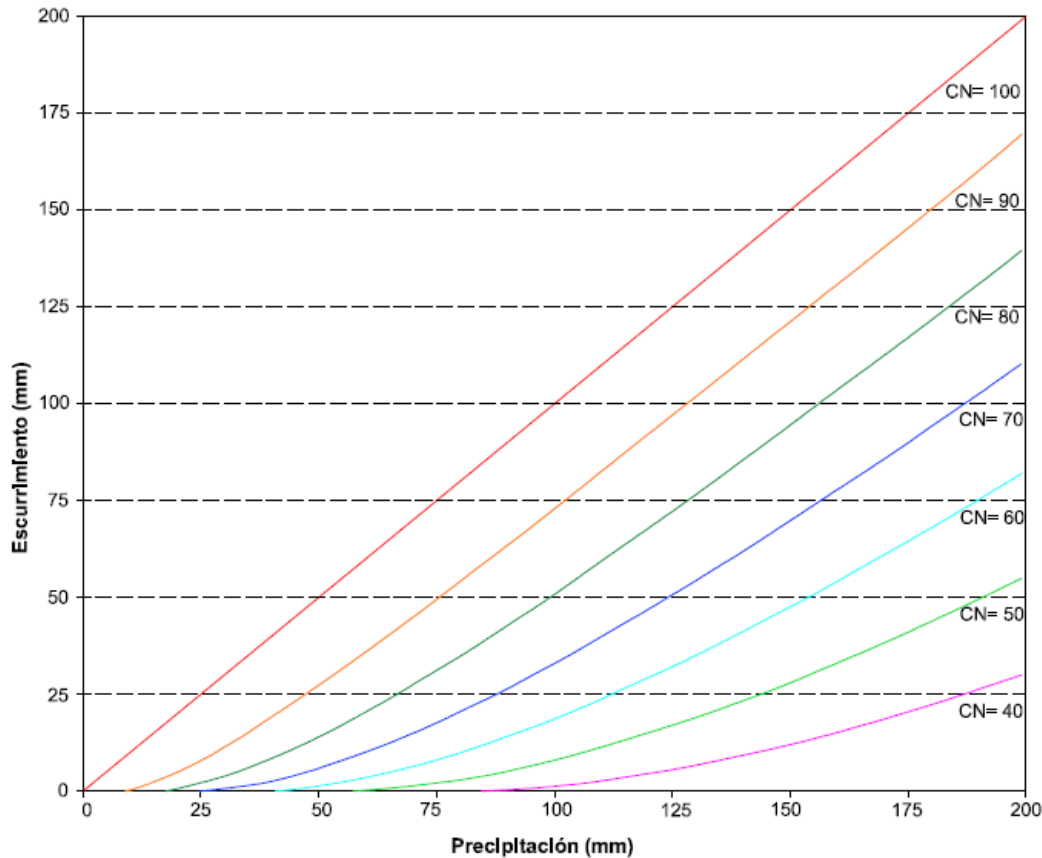


Figura 2.17. Relaciones entre la lluvia y el escurrimiento en el Método del Número de Curva del SCS

2.4.2. CONDICIÓN DE HUMEDAD ANTECEDENTE DEL SUELO

El número de curva, también varía con el contenido de humedad del suelo; de acuerdo con Neitsch, *et al.*, (2001), pasa de sus mínimos valores cuando el suelo está a punto de marchitamiento permanente (*PMP*) a cerca de 100 cuando los suelos están saturados. De acuerdo con estos mismos autores, el SCS define tres condiciones de humedad antecedente: 1 Seco, que corresponde a *PMP*; 2 Humedad media; y 3: Húmedo, que corresponde a la Capacidad de Campo (*CC*). El N_c tiene los valores más bajos para el primer grupo. Para los tres casos, el N_c se calcula con las expresiones 2.36 y 2.37, en las que N_{c1} , es el número de curva para la condición de humedad 1, y en N_{c2} , el correspondiente a la condición 2 obtenido de tablas (2.6 o 2.7 según corresponda u otras similares) y N_{c3} a la condición 3:

$$Nc_1 = Nc_2 - \frac{20(100 - Nc_2)}{100 - Nc_2 + \exp[2.533 - 0.0636(100 - Nc_2)]} \quad (2.36)$$

$$Nc_3 = Nc_2 \times \exp[0.00673(100 - Nc_2)] \quad (2.37)$$

Alternativamente, Chow *et al.*, citados por Muzik (2002) propusieron las expresiones 2.38 y 2.39 para el cálculo de los valores corregidos por condiciones de humedad antecedente 2 y 3.

$$Nc_1 = \frac{4.2 Nc_2}{10 - 0.058 Nc_2} \quad (2.38)$$

$$Nc_3 = \frac{23 Nc_2}{10 + 0.130 Nc_2} \quad (2.39)$$

Y Dal-Ré (2003) y Montaldo *et al.* (2004), presentaron otra alternativa para transformar la Nc_2 , por la CHA , consistentes en las expresiones 2.40 y 2.41.

$$Nc_1 = \frac{Nc_2}{2.281 - 0.01281 Nc_2} \quad (2.40)$$

$$Nc_3 = \frac{Nc_2}{0.427 + 0.00573 Nc_2} \quad (2.41)$$

Una definición práctica de estas tres condiciones de humedad antecedente son las propuestas por McCuen (2005) y Aparicio (2012), que son las siguientes: a) Condición 1: suelos secos con lluvia de los 5 días anteriores menor que 25 mm; b) Condición 2: Condiciones promedio de contenido de humedad del suelo, con lluvia de los 5 días previos de entre 25 y 50 mm; y c) Condición 3: suelos saturados, con lluvia en los 5 días anteriores mayor que 50 mm.

El parámetro de retención Sr referido en la expresión 2.31 varía con el contenido de humedad en el perfil del suelo de acuerdo con la expresión 2.42:

$$Sr = Smáx \left(1 - \frac{SW}{SW + \exp(w_1 - w_2 SW)} \right) \quad (2.42)$$

Donde Sr se refiere a un contenido dado de humedad (en mm), $Smáx$ es el máximo valor que el parámetro de retención puede alcanzar en un día dado (en mm), SW es el contenido de humedad del suelo en todo el perfil excluyendo la cantidad el agua

correspondiente a *PMP* y w_1 y w_2 son coeficientes de forma. El $Smáx$ se calcula resolviendo la expresión 2.20 para Nc_1 . y los coeficientes de forma w_1 y w_2 se determinan empleando las expresiones 2.43 y 2.44 asumiendo que:

- 1) El parámetro de retención para el Nc correspondiente a la condición de humedad a *PMP* (condición 1).
- 2) El parámetro de retención para el Nc correspondiente a la condición de humedad a *CC* (condición 3).
- 3) El suelo tiene un $Nc = 99$ ($Sr = 2.54$) cuando está completamente saturado.

$$w_1 = \ln \left(\frac{FC}{1 - Sr_3 \times Smáx^1} - FC \right) + w_2 \times FC \quad (2.43)$$

$$w_2 = \frac{\ln \left(\frac{FC}{1 - Sr_3 \times Smáx^1} - FC \right) - \ln \left(\frac{FC}{1 - 2.54 \times Smáx^1} SAT \right)}{SAT - FC} \quad (2.44)$$

En las expresiones 2.43 y 2.44, FC es la cantidad de agua en el perfil del suelo a *CC* (en mm), Sr_3 , es el parámetro de retención para el Nc para la condición de humedad 3, SAT es la cantidad de agua en el perfil del suelo cuando está completamente saturado (en mm) y el coeficiente 2.54 es el valor del parámetro de retención para $Nc = 99$.

El Nc se calcula con la expresión 2.31 insertando en parámetro de retención para la condición dada en el día en cuestión.

2.4.3. AJUSTES POR PENDIENTE

El Nc para la condición de humedad 2 dado en las tablas, es apropiado para una pendiente de menos del 5%, por lo que para valores distintos de pendiente debe ajustarse; ello puede hacerse con la fórmula 2.45 desarrollada por Williams (1995), citado por Neitsch, *et al.* (2001), que únicamente es válida para la CHA 3 y para valores de pendiente de entre 5 y hasta 30 %.

$$Nc_{2S} = \frac{Nc_3 - Nc_2}{3} [1 - 2 \exp(-13.86Sc)] + Nc_2 \quad (2.45)$$

En esta expresión, Nc_{2S} es el número de curva para la condición de humedad 2 ajustado por pendiente, Nc_3 es el número de curva para la condición de humedad 3 para la pendiente por defecto de igual o menor de 5%, Nc_2 es el Nc para la condición de

humedad 2 para la pendiente por defecto de 5% (en este caso obtenido de la tabla 2.8) y Sc es la pendiente promedio de la cuenca (en m/m).

Para el cálculo de los Nc ajustados por pendiente para las condiciones de humedad antecedente 1 y 3, se emplean las expresiones 2.46 y 2.47, que son muy similares a las expresiones 2.36 y 2.37, respectivamente, salvo por el subíndice S de Nc que indica el ajuste por pendiente; es decir que se introduce el NC_{2S} , obtenido de la expresión 2.45 para obtener la NC_{1S} o NC_{3S} , que son los respectivos valores corregidos por pendiente y por humedad antecedente, según corresponda.

$$Nc_{1S} = Nc_{2S} - \frac{20(100 - Nc_{2S})}{100 - Nc_{2S} + \exp[2.533 - 0.0636(100 - Nc_{2S})]} \quad (2.46)$$

$$Nc_{3S} = Nc_{2S} \times \exp[0.00673(100 - Nc_{2S})] \quad (2.47)$$

2.4.4. MÉTODOS PARA SU DETERMINACIÓN

Dal-Ré (2003), reporta **dos criterios para determinar el Nc** , y el escurrimiento correspondiente Le : **el método tradicional o agregado y el método distribuido**; el primero consiste en los siguientes pasos:

- Se seleccionan valores de Nc de tablas del SCS como las tablas 2.6 y 2.7, para cada área parcial de la cuenca (A_i) según el tipo de suelo, la cobertura vegetal y las condiciones de manejo;
- Se calcula un valor medio para la cuenca, en función del área parcial A_i de cada Nc_i y el área total de la cuenca A_c ;
- Se calcula el Nc medio de la cuenca como una media ponderada.
- Se calcula el coeficiente de retención Sr aplicando la expresión 2.31 y el valor del escurrimiento Le , empleando la expresión 2.34.

El mismo autor, describe la aplicación del método distribuido de la siguiente manera:

- Se obtiene de tablas del valor de Nc_i para cada celda o área parcial A_i de la cuenca según el tipo de suelo, la cobertura vegetal y las condiciones de manejo con uso de un SIG.
- Con el valor de Nc_i se calcula Sr_i y Le_i para cada celda o área parcial A_i , aplicando las expresiones 2.31 y 2.34, respectivamente.

c) Se calcula el valor de Le medio de la microcuenca como una media ponderada.

Mediante un estudio de caso, Dal-Ré (2003), muestra que la aplicación de estos métodos puede conducir a valores diferentes en más del 100 % como resultado de la heterogeneidad de la cuenca y de trabajar con valores pequeños de precipitación que apenas producen escurrimientos.

De esta forma se puede concluir que cuando los montos de precipitación son altos, como en el caso de las zonas tropicales de México, en que se superan los 3.0 y hasta 4.0 m es conveniente aplicar el Método Distribuido. Al respecto, Arellano (2012) comenta que hay que considerar que, **los métodos distribuidos permiten estimar la variabilidad espacial de la lluvia y la heterogeneidad de las características hidrológicas de la cuenca**, además de que, el método distribuido, permite aplicar el modelo y evaluar el efecto del cambio de uso del suelo así como de sus condiciones físicas en la distribución espacial y temporal del escurrimiento superficial.

Campos (1994), cita a Morei-Seytoux y Verdín, quienes relacionaron conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) y el factor de succión del frente de humedecimiento o succión efectiva capilar (S_f) de la ecuación de Green y Ampt (2.48); asimismo, reporta la expresión 2.49, para el cálculo de la S_f , de la que se obtiene en cm, si la carga hidráulica en la superficie del suelo (H_s) y la carga hidráulica en el frente de humedecimiento (H_f) se introduce en cm. En esta expresión, Θ_s y Θ_o es el contenido volumétrico de humedad en el suelo a saturación y el contenido inicial de humedad del mismo, respectivamente; ambos adimensionales.

$$In = K_{sat} \times T_i + S_e \times \ln \left(1 + \frac{1}{S_f} \right) \quad (2.48)$$

En esta expresión:

In = Lámina infiltrada, en cm;

T_i = Tiempo en el que se presenta el fenómeno de infiltración, en h;

K_{sat} = Conductividad hidráulica saturada, en cm/h;

S_f = Factor de fricción del frente de humedecimiento o succión efectiva capilar, en cm.

$$S_f = (H_s + H_f) (\Theta_s - \Theta_o) \quad (2.49)$$

Asimismo, estos autores, proponen las relaciones 2.50 a 2.54 entre N_c , K_s y S_r , mediante las cuales es posible transformar el algoritmo de infiltración en forma univariada y calibrar también el valor de las Curvas Numéricas de escurrimiento del SCS (Campos, 1994).

$$\text{Para } Nc > 75 \quad Ks = \frac{100 - Nc}{124.185} \quad (2.50)$$

$$\text{Para } 36 < Nc < 75 \quad Ks = 3.139 - 0.0391 Nc \quad (2.51)$$

$$\text{Para } Nc < 36 \quad Ks = 4.707 - 0.0823 Nc \quad (2.52)$$

$$\text{Para } Nc > 65 \quad St = \frac{100 - Nc}{16.635 / 2 Ks} \quad (2.53)$$

$$\text{Para } Nc < 65 \quad St = 3.025 \frac{0.0046Nc}{Ks} \quad (2.54)$$

2.4.5. RELACIONES ENTRE EL NÚMERO DE CURVA, EL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO Y LA LÁMINA ESCURRIDA

Sustituyendo Le por su equivalente de la expresión 2.34 en la 2.24 para Ce , se obtiene la expresión 2.55, que puede aplicarse para el cálculo del coeficiente de escurrimiento a partir del número de curva propuesto por el SCS.

$$Ce = \frac{Le}{Pma} = \frac{(Pma - 0.2Sr)^2}{Pma^2 + 0.8Sr Pma} \quad (2.55)$$

Para la determinación o calibración en campo de los Números de Curva, a partir de la ecuación 2.32 o 2.34, Hawkins (1993), obtuvo la expresión 2.56 para el cálculo de Sr , en la que se ha sustituido Pma por Lp .

$$Sr = 5 \left[Lp + 2Le - (4Le^2 + 5LpLe)^{0.5} \right] \quad (2.56)$$

En esta expresión, para cualquier par de valores Pma y Le , se cumple que $0 < Le < Pma$ y la raíz negativa de la expresión 2.56 se usa para mostrar la condición hidrológica de que cuando $Sr = 0$, entonces $Pma = Le$ (Hawkins, 1993). Así, como los valores de Nc varían de 0 a 100, los valores de Nc calculados varían de 55 a 95. De esta forma, a partir de los valores de Pma y Le medidos *in situ* en nanocuenas instrumentadas, se calculan los valores de Sr y Nc con el uso de las expresiones 2.56 y 2.30, respectivamente, (Arellano, 2012).

Muzik (1993), por su parte considera que los valores de Nc obtenidos de las tablas 2.6 y 2.7, propuestos por el SCS no son apropiados para su uso en climas tropicales como los

de Tailandia y propone una modificación al método del SCS, particularmente para el cálculo de los valores de las abstracciones iniciales I_a a partir de la expresión 2.57.

$$I_a = Pma - \frac{Le}{2} - \frac{(Le^2 - 4LeSr)^{0.5}}{2} \quad (2.57)$$

2.4.6. APLICACIONES DEL MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA EN CUENCAS

Campos (2011) cita a Mishra (2008) para indicar que **la obtención del número de curva N_c con base en datos de lluvia y su respectivo escurrimiento comenzó, en la década de los años ochenta**; asimismo, Campos (2009) refiere que, más recientemente, la aplicación de los sistemas de información geográfica ha permitido la estimación del N_c en cuencas a partir de la información detallada de su cobertura vegetal.

Arellano (2012), presenta los resultados de una revisión amplia sobre la aplicabilidad mediante ejemplos prácticos que emplean el índice topográfico (longitud, pendiente y área de aporte) que incorpora también la profundidad y conductividad hidráulica saturada del suelo, denominado área variable del fuente de escurrimiento (VSA); y Lyon, *et al.*, (2004), aplican en forma distribuida el modelo de los Números de Curvas (N_c -VSA) y obtienen una mejor distribución espacial de la lámina de escurrimiento y las áreas de saturación en la cuenca que proveen de escurrimiento que con el método tradicional de aplicación de las N_c del SCS.

Palacios, *et al.* (2000), citado por Arellano (2012) aplican el método de las N_c del SCS en forma distribuida en la cuenca del Río Itzapa, Guatemala de 2,671 hectáreas, calculando el escurrimiento que genera cada subcuenca. Por otra parte, Témez, citado por Dal-Ré (2003), propone un método distribuido con uso de SIG para la estimación del N_c en cada celda mediante la aplicación de números primos. Montaldo, *et al.* (2004), por su parte, estimaron con una resolución de 100 metros, las Curvas Numéricas de la cuenca del río Toce en los Alpes de Italia con un área total de drenaje de 1,534 km².

Dal-Ré (2003), ejemplifica el procedimiento para obtener el volumen de escurrimiento producido por la lluvia aplicando el Método del N_c , tanto de la forma agregada como en la forma distribuida, mediante la asociación de números primos para generar una cobertura para la lluvia, otra para la pendiente, una más para las condiciones hidrológicas, y otra vez más para los usos y aprovechamientos del suelo, y luego aplicar la técnica de álgebra de mapas para generar la capa de N_c en celdas de 10 m de lado.

McCutchon (2003), citado por Arellano (2012), utiliza la expresión propuesta por Hawkins (1993 y 1998) para la calibración de N_c en el modelo HEC para cuencas forestales instrumentadas en Virginia, Estados Unidos. Hawkins (1993) calculó los Números de Curva con datos de 110 cuencas agrícolas y forestales y las compara con los valores

obtenidos de tablas a partir de los parámetros de suelos y vegetación. Por su parte, Calvo *et al.*, (2005) aplican el procedimiento de Hawkins (1993) para calcular los números de curva en la cuenca superior del río Chagres en Panamá; y Paz (2009), por otra parte, después de analizar las hipótesis intrínsecas del modelo simple de las Curvas Numéricas, propone un modelo alternativo como sustituto hidrológico sólido, tipo expo-lineal de una variable para operar las N_c .

Finalmente, Mishra *et al.* (2006) utiliza el procedimiento de Hawkins (1993), para evaluar los valores de las Curvas Numéricas obtenidas a partir de datos de lluvia y escurrimiento para compararlos con los valores de N_c derivadas del modelo propuesto de lluvia-producción de sedimentos.

El propio Arellano (2012), reporta los resultados de calibrar el número de curva en tres nanocuenas de la Costa del Estado de Chiapas, previamente instrumentadas para medir precipitación y escurrimiento, en las que se obtuvo valores de N_c , que corresponden a condiciones límite por lo que aplicando las ecuaciones 2.18, 2.19 y 2.20 a los datos de eventos de precipitación máxima registrados en 24 horas así como a datos de precipitación máxima en 24 horas ajustadas a un periodo de retorno en la cuenca, y que, sin embargo, recomienda calibrar.

2.5. EL PROCESO DE EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS

2.5.1. GÉNESIS Y OCURRENCIA DE LA EROSIÓN HÍDRICA

Considerando lo expuesto por Foster y Meyer (1977), se puede **definir a la erosión hídrica como el proceso de degradación de los suelos que consiste en el desprendimiento, transporte y depositación de sus partículas en el horizonte en el que se desarrollan las actividades agropecuarias y forestales provocado por la lluvia y el escurrimiento superficial del agua, derivada de ella**. Estos mismos autores, señalan que la erosión y sedimentación son los mayores problemas que reducen la productividad de los terrenos de cultivo, degradan la calidad del agua y de los suelos, y limitan su uso como medio de comunicación y transporte.

Abasto (2004), refiere a este respecto, que **el proceso de erosión hídrica comienza con el impacto de las gotas de lluvia sobre las partículas del suelo, desprendiéndolas de su estructura original, para luego, a través del agua que escurre por la superficie del suelo se transportan a lo largo de la pendiente hasta sedimentarla en lugares bajos, acumulándolas en canales, alcantarillas, represas, cauces, o en el mar, con los consiguientes peligros de taponamiento e inundaciones y afectando la navegabilidad de las vías fluviales**.

Por su parte, Figueroa, *et al.*, (1991), expresa que el proceso de erosión del suelo consiste de **tres etapas: el primero, se refiere al desprendimiento de las partículas**

individuales de la masa de suelo por el viento o por el agua; el segundo consiste en su transporte mediante el escurrimiento y por el viento y; cuando éste no se presenta, ocurre el tercero que es la sedimentación. Brady y Weil (1999), coinciden con estas expresiones, precisando que la erosión hídrica se da fundamentalmente en los tres pasos/procesos siguientes que ilustran en el esquema y las imágenes de la figura 2.18.

- (a) Desprendimiento de las partículas de la masa del suelo por efecto de las gotas de lluvia.
- (b) Transportación de las partículas desprendidas aguas abajo mediante flotación en agua en escurrimiento, rodamiento por efecto de la pendiente, arrastre y salpicamiento.
- (c) Depositación de las partículas transportadas en las áreas de menor elevación ubicadas aguas abajo del trayecto.

En una versión más amplia, Arellano (1994), define a la erosión hídrica como **el proceso de degradación del suelo, inducido por las actividades del hombre en los agroecosistemas y se manifiesta con la pérdida del suelo y el abatimiento de sus niveles de productividad, y que de manera indirecta modifica las condiciones hidrológicas del ecosistema mediante la contaminación de las aguas superficiales, el azolvamiento de las áreas agrícolas y urbanas y la destrucción de la infraestructura localizada aguas abajo.**

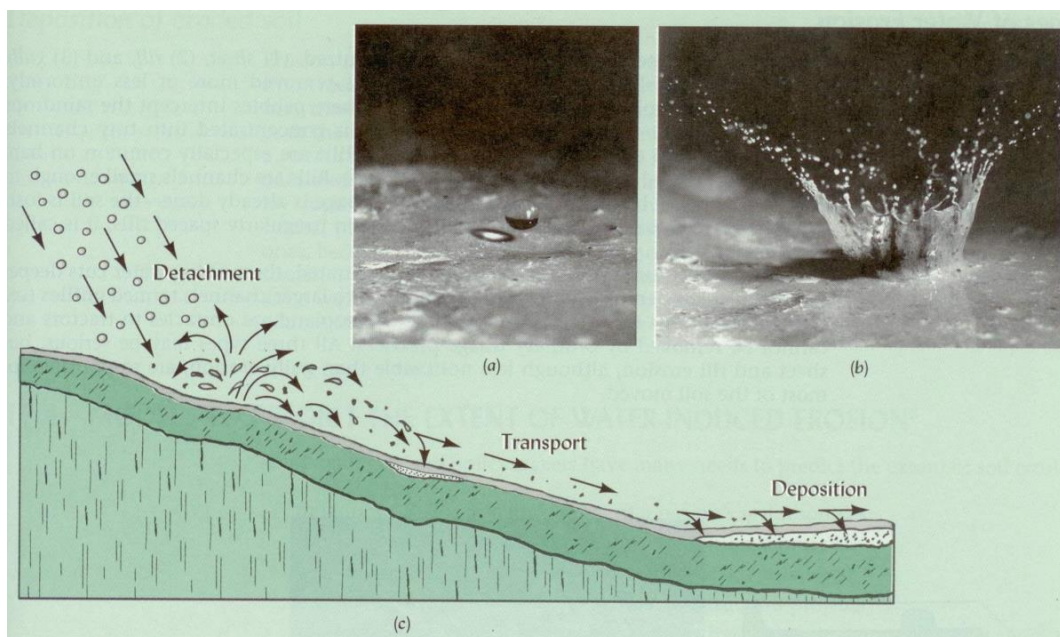


Figura 2.18. Esquemización del proceso de erosión hídrica de los suelos en los procesos de desprendimiento (a), transporte (b) y depositación (c) (Brady y Weil, 1999)

Sobre el tiempo en el que el proceso erosivo se lleva a cabo, Porta *et al.* (1999), refieren que éste se caracteriza por:

- a) Procesos relativamente lentos con respecto a la velocidad de formación del suelo, e intermitentes si bien recurrentes a lo largo de los años, ya que va asociados a la presencia de los eventos de lluvia.
- b) Procesos progresivos, que consisten en la disminución constante del horizonte del suelo con capacidad productiva, dejando expuestas y para su uso de las capas o subhorizontes cuyas características son menos favorables para el crecimiento de las raíces de las plantas y para suministrarles agua y nutrientes; a largo plazo, si no se limite o revierte, este proceso provoca una disminución de los rendimientos de los cultivos y finalmente el terreno se hace improductivo; no obstante sus efectos se hacen notorios en un lapso de tiempo relativamente corto.
- c) Procesos irreversibles, que son endotérmicos por utilizar la energía cinética generada por la lluvia o por el escurrimiento y tienen lugar en un sistema cerrado. Se consideran irreversibles porque, por un lado, la masa de suelo perdida suele ser irrecuperable o exige su acarreo y, por otro, el tiempo requerido para que se reponga es extremadamente largo. La escala temporal de los procesos edafogénicos es del orden secular o milenario, mientras que para los erosivos es de algunas décadas o a lo sumo siglos.

Las consecuencias de la erosión del suelo se manifiestan tanto en el lugar que se producen como fuera de él. **Los efectos inmediatos son particularmente importantes en las tierras de uso agrícola, donde la redistribución y pérdida de suelo, la degradación de su estructura y el arrastre de materia orgánica y nutrientes, llevan a la pérdida de espesor del perfil y al descenso de la fertilidad** (Morgan, 1997). Las imágenes de la figura 2.19 muestran el desarrollo del proceso erosivo del agua sobre el suelo, y su efecto e impacto sobre su estructura y productividad.

Sobre los efectos de **la erosión de los suelos**, Brady y Weil (1999), indican que ésta **impacta reduciendo el potencial productivo y disminuye la capacidad del suelo para proveer a la población de sus beneficios**, a través de la destrucción de las comunidades vegetales, de la reducción de las áreas destinadas a la agricultura y para la producción agrícola, y la simplificación de la naturaleza de los ecosistemas y, resumen el resultado final del fenómeno en pobreza, contaminación y baja productividad.

2.5.2. FACTORES QUE DETERMINAN LA TASA DE EROSIÓN

Hay tres elementos genéricos que actúan de manera conjugada, para que una cuenca se desarrolle o se deteriore con la presencia y efecto del agua: la propia naturaleza,

conformación y características de la cuenca; la presencia de eventos extremos de precipitación; y la actuación del hombre que la desprovee de su cubierta y deja expuesto al suelo al impacto de los agentes erosivos. Al respecto, CONAGUA y UACH (2006), refieren que **los factores que influyen en la tasa de erosión son la lluvia, el escurrimiento, el viento, el tipo de suelo, la pendiente, la cobertura vegetal y la presencia o ausencia de medidas de conservación**; lo que a su vez, coincide con lo expuesto por Terzoudi, *et al.*, (2007), que indican que la desagregación, transporte y sedimentación de las partículas del suelo por las gotas de lluvia y el escurrimiento superficial, definen el proceso de erosión hídrica, que se ve afectado por varios factores, como son, el clima, el suelo, la vegetación y la topografía.



Figura 2.19. Desarrollo del proceso erosivo por efecto del agua y la degradación de las propiedades y productividad del suelo

El estudio de **la erosión del suelo, puede abordarse con distintos enfoques, según se tome en consideración el agente erosivo, la forma en que se produce la erosión o su intensidad, por ejemplo, Porta et al. (1999)**. Siendo más puntuales, estos autores

refieren los factores expuestos en el cuadro 2.8 como los principales que definen el proceso erosivo por lluvia.

CONAGUA y UACH (2006), refieren también que los factores que condicionan los procesos erosivos debidos al agua, se agrupan en tres categorías o subsistemas: Energía, Resistencia y Protección y que el grupo correspondiente a la energía incluye la habilidad potencial de la lluvia, el escurrimiento y el viento para causar erosión, misma que se denomina erosividad de la lluvia e incluyen aquellos factores que afectan directamente el poder de los agentes erosivos, tal como la reducción en la longitud del escurrimiento o la fuerza del viento a través de la construcción de terrazas y barreras rompevientos, respectivamente.

Cuadro 2.8. Principales factores que condicionan y determinan los procesos erosivos debidos al agua y sus efectos (Porta, et al. 1999)

FACTOR	EFECTOS Y OBSERVACIONES
Climáticos	Todos los elementos del clima, intensidad, magnitud y frecuencia de la precipitación.
Morfología del terreno	Forma de la ladera, longitud y magnitud de la pendiente, exposición.
Litológicos	Características del material madre aflorante en su caso, y la velocidad y forma de meteorización
Edáficos	Propiedades físicas: estabilidad estructural, susceptibilidad a la erosión, velocidad de infiltración; Propiedades químicas: complejo de intercambio catiónico.
Hidrológicos	Tipos y propiedades de los flujos.
Cubierta vegetal	Función de pantalla, lámina interceptada de la precipitación, retención del suelo, influencia sobre las propiedades del suelo.
Tecnológicos	Rugosidad de la superficie; deforestación; uso del suelo; tipos y técnicas de cultivo; mecanización de actividades culturales; y características de las parcelas, de las vías de comunicación, de urbanización y de ocio de la zona.
Socioeconómicos	Presión demográfica; falta de percepción de la fragilidad del suelo, de la progresividad e irreversibilidad de los procesos erosivos y de la pérdida del horizonte cultivable a corto plazo; facilidad de las técnicas de cultivo; perjuicios de algunas medidas de control de la erosión; y costos de construcción y mantenimiento de la infraestructura de conservación de los suelos.

Un factor fundamental para el grupo de la Resistencia es la erosionabilidad del suelo, que depende de las propiedades mecánicas y químicas del mismo; aquellos factores que promuevan la infiltración del agua en el suelo y que, por lo tanto, reducen el escurrimiento, disminuirán la erosionabilidad, mientras que cualquier actividad que pulverice el suelo, la aumentará. Entonces, la labranza puede disminuir la erosionabilidad de algunos suelos arcillosos y aumentar la de los arenosos.

El grupo de la Protección se centra en la cobertura vegetal, la cual protege al suelo de la erosión mediante la interceptación de la lluvia y la reducción de la velocidad del escurrimiento y del viento. Los diferentes tipos de cobertura vegetal presentes propician grados distintos de protección, de manera que el hombre, al determinar el uso del terreno, definirá de manera importante la tasa de erosión.

Arellano (1994), indica que en particular, para el caso de las zonas tropicales como el estado de Chiapas, los factores físicos y biológicos que inducen altas tasas de erosión son los siguientes:

- Altas precipitaciones de larga duración y/o de alta intensidad;
- Altos gastos de escurrimiento superficial de las áreas de aporte;
- Suelos con estructura pobre, baja infiltración y mal drenaje;
- Suelos poco profundos;
- Pendientes escarpadas, continuas y/o de gran longitud;
- Prácticas de labranza en sentido de la pendiente;
- Terrenos desprovistos de residuos de cosecha; y
- Prácticas agrícolas destructivas.

Efectivamente, en el estado de Chiapas, estos factores se potencian y en la regiones de la Sierra y de la Costa mucho más y se han magnificado con la presencia de eventos extremos como es el caso de los huracanes y tormentas tropicales, de los que su mayor exponente es el Stan, acontecido en los primeros días del mes de octubre de 2005 que impactó de manera brutal y en todos los órdenes en las cuencas costeras del estado de Chiapas, algunas de cuyas características y efectos se describen en el apartado 2.7 y que es el evento base del presente estudio.

2.5.3. ESTIMACIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN

A decir de Brady y Weil (1999) y en coincidencia con Neitsch (2001), hay muchas razones por las que los funcionarios y especialistas que tienen que ver con **el manejo del suelo y del agua requieren conocer las relaciones entre los factores que causan la pérdida del suelo para predecir la tasa de erosión y aquellos que ayudan a reducirla**, tales como:

- a) Planear las mejores formas de manejo de los suelos a nivel de las naciones;

- b) Evaluar las consecuencias de prácticas inadecuadas de manejo y de las alternativas para ello;
- c) Determinar la concordancia de las medidas de manejo conforme a la normatividad aplicable;
- d) Desarrollar plantas y obras de control de sedimentos para la protección de obras de almacenamiento de agua; y
- e) Estimar la vida útil de las presas de almacenamiento de agua.

Estos mismos autores, aseguran que las tres etapas del proceso erosivo debido a la lluvia, se pueden predecir matemáticamente mediante modelos de erosión del suelo, que son ecuaciones –o un conjunto de ecuaciones ligadas– que interrelacionan información sobre la lluvia, el suelo, la topografía, la vegetación y el manejo de un lugar con la cantidad probable de suelo que se puede perder por erosión. **El más completo y sofisticado modelo de erosión desarrollado es un complejo proceso basado en un programa de computadora llamado Water Erosion Prediction Project (WEPP) que se basa en un esquema comprensible de los mecanismos fundamentales involucrados con los procesos que conlleva la erosión del suelo.** El WEPP, es un modelo que calcula sobre una base diaria los procesos hidrológicos, el crecimiento de las plantas y de descomposición de los desechos; pudiendo, teóricamente predecir cómo la lluvia interactuará con el suelo, en un sitio dado y para un evento de lluvia definido o durante todo un año; de modo que si se dispone de suficientes datos, es posible predecir el impacto de las gotas de lluvia, la erosión por salpicamiento, el flujo en arroyos, la formación de riachuelos, la erosión en canales, la formación de cárcavas y la depositación de sedimentos (Wilcox, *et al.*, 1992, citado por Baumann, 2000).

Sin embargo, este tipo de modelos, en general tienen en su misma complejidad su ventaja y desventaja, ya que si no se cuenta con la información que requieren para su correcta aplicabilidad se vuelven inoperantes y no confiables; ello, amén de que a menudo sólo son aplicables para las condiciones para las que fueron creados o concebidos, las cuales resultan demasiado restringidas y limitan su uso a cualesquiera condiciones diferentes.

2.5.3.1. La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Un modelo matemático más adecuado para estimar la tasa de erosión hídrica es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo EUPS (o USLE por sus siglas en inglés), desarrollada por Wischmeier y Smith (1965, 1978) fue modificada en los años 90's y adecuada para su uso en las computadoras, creando la herramienta para la predicción de la erosión llamada **revised universal soil-loss equation** (RUSLE) (Brady y Weil, 1999),

que emplea el escurrimiento en lugar de la lluvia, para la determinación, cuya expresión matemática es la 2.58 y constituye un modelo paramétrico que pretende interpretar los mecanismos erosivos por sus causas y efectos (Rivera, 2010).

$$Sp = 11.8(Qs \times q_p \times Ac)^{0.56} \times K \times C \times P \times LS \times FG \quad (2.58)$$

en la que, según Neitsche *et al.*, (2001), Sp , es la pérdida de suelo en un día dado, en toneladas métricas; Qs , es la magnitud del escurrimiento superficial, en mm/ha; q_p es el gasto de escurrimiento pico, en $m^3 \times s^{-1}$; Ac , es el área de la cuenca o de la Unidad Hidrológica, en ha; K , es el factor de erodabilidad del suelo, que es igual a $0.013 t \times m^2 \times h / m^{-3} \times t^{-1} \text{ cm}^{-1}$; C es el factor de cobertura y manejo, adimensional; P , es el factor de prácticas de manejo del suelo, adimensional; LS , es el factor topográfico, adimensional; y FG es el factor de fragmento grueso, adimensional.

Figuroa, *et al.*, (1991), denominó al término $11.8(Qs \times q_p \times Ac)^{0.56}$ de la ecuación 2.58, factor de erosividad R (en $MJ \text{ mm ha}^{-1} \times h^{-1} \times \text{año}^{-1}$) y separó el factor topográfico LS en factor del grado de longitud L (adimensional) y factor del grado de pendiente S (adimensional) y propuso la expresión 2.59 para la EUPS para su uso en México, en la que, Ps es el monto de la pérdida de suelo en $t \times ha^{-1} \times \text{año}^{-1}$; R es el factor de erosividad de la lluvia en $MJ \times mm \times ha^{-1} \times h^{-1} \times \text{año}^{-1}$; y K , C y P tienen el mismo significado y unidades que en la expresión 2.58.

$$Ps = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (2.59)$$

2.5.3.2. La erosividad de la lluvia R

El factor de **erosividad de la lluvia R** , definida como su capacidad potencial para causar erosión, toma en consideración la precipitación total, y su intensidad y distribución estacional (Neitsch *et al.*, 2001 y Brady y Weil, 1999). La intensidad de la lluvia es de gran importancia debido a que las lluvias intensas presentan gotas de tamaño grande, y porque las mayores magnitudes de precipitación, implican mayores escurrimientos, y el arrastre de las partículas desprendidas del suelo; lluvias suaves o ligeras de baja intensidad pueden causar menor erosión a pesar de que la precipitación anual sea alta; en contraste, los aguaceros torrenciales, poco frecuentes, pueden ocasionar severos daños, en áreas de baja precipitación anual, (Brady y Weil, 1999).

Porta *et al.*, (1999), indica que la intensidad de la lluvia se clasifica en suave (< de $2 \text{ mm} \times h^{-1}$), moderada (2 a 20), fuerte (20 a 50), muy fuerte (50 a 90) y torrencial (>90) y que el valor a partir del cual una lluvia empieza a causar erosión ha sido fijada en $30 \text{ mm} \times h^{-1}$, aunque algunos autores lo elevan a $50 \text{ mm} \times h^{-1}$, que definen los denominados índices de erosividad, de los cuales, los más importantes y de aplicación geográfica más amplia son, el índice de erosividad EI_{30} (cuya intensidad corresponde precisamente con

30 mmxh⁻¹ y que se aplica en MJxha⁻¹xmmxh⁻¹); el $KE_{>25}$, el de Al_m , el de Ram y el de Fournier.

El EI_{30} fue propuesto por Wischmeier en 1959 y es de uso más generalizado que los otros tres citados; **se define como el producto de la energía cinética total de la lluvia E** (que se puede considerar igual a $0.0017 m \times t \times m^2$), **y la intensidad máxima de lluvia en 30 minutos I_{30}** (expresión 2.60) y mide el efecto combinado de la erosión por salpicamiento y de la turbulencia del flujo para remover del terreno las partículas que se han desprendido de él (Rivera, 2010). En dicha expresión m , es el número de eventos cuya intensidad es mayor que 30 mmxh^{-1} .

$$R = \sum_{i=1}^m (EI_{30})_i \quad (2.60)$$

Por su parte, Figueroa *et al.*, (1991) propuso la expresión general 2.61 para la determinación del factor R a partir de la precipitación media anual (Pma). Cortés (1991), citado por Rivera (2010) por su parte, partiendo de esta expresión y considerando el escaso número de estaciones meteorológicas en México, que cuentan con pluviógrafos, regionalizó el territorio nacional en 14 regiones o áreas y con base en un análisis de regresión lineal generó una ecuación para cada una de ellas, de las cuales la 2.62 corresponde a la región 12 en la que se ubica el estado de Chiapas; y más propiamente, Baumann y Arellano (2003) propusieron diversas expresiones dependientes también de la precipitación media anual (Pma , en mm) para el cálculo de R en la Cuenca del Río Huehuetán, Chiapas; de las cuales la expresión 2.63 ha mostrado ser más adecuada para el caso de áreas costeras de Chiapas.

$$R = 2.4619Pma + 0.006067Pma^{(2.055 - 0.000061Pma)} \quad (2.61)$$

$$R = 2.4619Pma + 0.006067Pma^2 \quad (2.62)$$

$$R = 14.523Pma - 6601 \quad (2.63)$$

2.5.3.3. La erodabilidad del suelo K

El factor de erodabilidad K , sugerido por Cook en 1936, **se usa para indicar la susceptibilidad inherente del suelo a la erosión, de modo que un valor particular asignado a un suelo, indica la cantidad de suelo perdido por unidad de energía erosiva que tiene la lluvia, asumiendo una parcela estándar de 22 m de longitud y 9 % de pendiente, en la cual el suelo se mantiene permanentemente desnudo de rastrojo** (Brady y Weil, 1999); está influida por algunas propiedades, sobre todo físicas, de las cuales, las dos más importantes son, según estos mismos autores, la velocidad de infiltración, definida por la textura y la estabilidad estructural; así, altos valores de

infiltración implicarán menos agua disponible para el escurrimiento y es menos probable que la superficie se encharque (lo que lo haría más susceptible al salpicamiento); la agregación estable del suelo, resiste la acción golpeadora de la lluvia y de esa manera se elimina el arrastre del suelo por el escurrimiento; ciertos suelos tropicales con altos contenidos de arcilla, hidruros de hierro y aluminio, son conocidos por la alta estabilidad de sus agregados que resisten la acción de las lluvias torrenciales; sin embargo, aguaceros similares, pueden ser desastrosos en suelos con arcillas expandibles.

Brady y Weil (1999), también aseguran que las propiedades básicas que tienden a resultar en altos valores de K , incluyen altos contenidos de cieno y arenas muy finas, minerales arcillosos de tipo expansivo, tendencia a la formación de costras, la presencia de capas impermeables de suelo, y los tipos de estructura en bloques, en capas y masiva; en contraste -continúan-, las propiedades del suelo que tienden a hacer al suelo más **resistente** a la erosión (valores bajos de K), incluyen suelos con altos contenidos de materia orgánica, arcillas del tipo no expansivas y estructuras granulares resistentes.

Wischmeier *et al.*, citado por Neitsche *et al.* (2001), desarrolló la expresión 2.64 para determinar el factor K , cuando el contenido de arenas muy finas y cieno es menor del 70 % de las distribución de tamaños de las partículas del suelo. En dicha expresión M es el parámetro de tamaño de la partícula que se obtiene de la expresión 2.65; a es el contenido de materia orgánica (en %); b es una clave para la estructura del suelo y c es el tipo de permeabilidad o conductividad hidráulica del perfil.

$$K = 0.1317 \frac{2.1 \times 10^4 (12 - a) \times M^{1.14} \times 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)}{100} \quad (2.64)$$

$$M = (m_L + m_C) \times (100 - m_A) \quad (2.65)$$

En la expresión 2.65, m_L es el contenido porcentual de limos (partículas cuyos diámetros son de 0.002 a 0.05 mm); m_C es el contenido porcentual de arenas muy finas (cuyos diámetros son de 0.05 a 0.10 mm); y m_A es el contenido porcentual de arcillas (cuyos diámetros son de menos de 0.002 mm).

Por otra parte, Wischmeier *et al.*, (1971) citados por Figueroa *et al.*, (1991), elaboraron el **nomograma** mostrado en la figura 2.20, **que permite determinar el valor de K , usando los cinco parámetros siguientes del suelo: porcentaje de limos+arenas muy finas, porcentaje de arenas, porcentaje de materia orgánica, estructura y permeabilidad.** Los códigos definidos para las características de estructura y permeabilidad del suelo dada por su conductividad hidráulica (Kh), son los que se presentan en las tablas 2.9 y 2.10, respectivamente (Porta, *et al.*, 1999 y Rivera, 2010).

Cuando sólo se cuenta con datos de textura y de contenido de materia orgánica (MO), se puede emplear la tabla 2.11 desarrollado por el Agriculture Research Service (ARS) del

United States Department Agriculture (USDA) para determinar el valor del factor K.

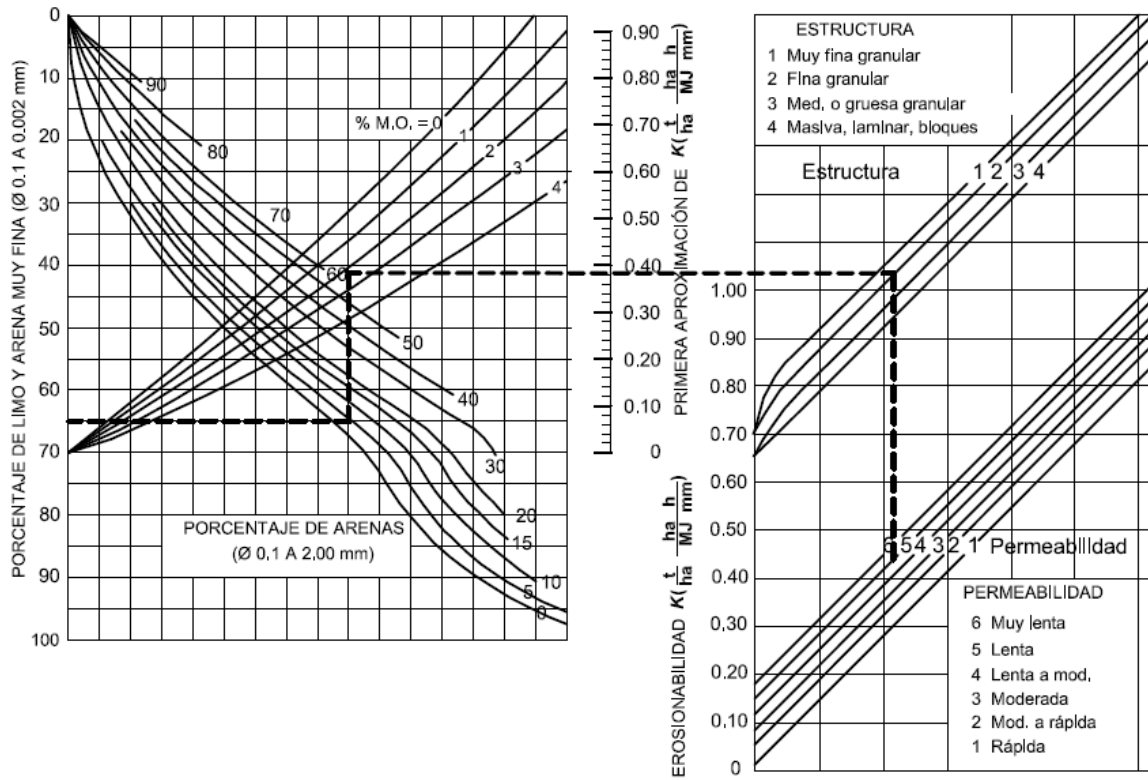


Figura 2.20. Nomograma para evaluar el factor K de erodabilidad del suelo

Tabla 2.9. Códigos para la estructura del suelo para determinar el valor de K a partir del nomograma de la figura 2.8

CÓDIGO	TIPO DE ESTRUCTURA	TAMAÑO DE AGREGADOS
		(mm)
1	Granular muy fina y grumosa muy fina	< 1.0
2	Granular fina y grumosa fina	1.0 – 2.0
3	Granular media, grumosa media y granular gruesa	5.0 – 10.0
4	Laminar, prismática, columnar, masiva y granular muy gruesa	>10.0

2.5.3.4. El factor topográfico LS

El factor topográfico **LS** refleja la influencia de la longitud (**L**) y la inclinación de la pendiente (**S**) sobre la tasa de erosión; se expresa como una relación adimensional con el suelo perdido de un área dada y la que ocurre en un área estándar (de 22 m de largo y 9% de pendiente); longitudes mayores de pendiente significan mayores

oportunidades para la concentración del escurrimiento del agua, (Brady y Weil, 1999 y Wichmeier y Smith, 1978, citados por Arellano, 1994). Dada la definición de este factor para su aplicación a parcelas agrícolas, su uso para cuencas con magnitud mucho mayor y pendientes muy fuertes, no es directo ni automático, y por tanto debe analizarse.

Tabla 2.10. Códigos para la permeabilidad del suelo dada por su conductividad hidráulica (K_h) para determinar el factor K con el nomograma de la figura 2.8

CÓDIGO	TEXTURA DEL SUELO	K_h (mm/h)	
		CLASIFICACIÓN	VALOR
1	Arenosa	Rápida a muy rápida	> 60.0
2	Franco arenosa	Moderadamente rápida	20.0 – 0.0
3	Arena francosa, Franco, Franco limosa	Moderada	5.0 – 20.0
4	Franco arcillo arenosa	Moderadamente lenta	2.0 – 5.0
5	Franco arcillosa, Franco limo arcillosa	Lenta	1.0 – 2.0
6	Arcillo arenosa, Arcillo limosa, Arcillosa	Muy lenta	< 1.0

Tabla 2.11. Valores del factor de erodabilidad K de la EUPS a partir de la textura del suelo y su contenido de materia orgánica (MO)

TEXTURA DEL SUELO	K ($t \times h \times MJ^{-1} \times mm^{-1}$)		
	MO = 0.0 a 0.5 %	MO = 0.5 a 2.0 %	MO = 2.0 a 4.0 %
Arenosa	0.005	0.003	0.002
Arena fina	0.016	0.014	0.010
Arena muy fina	0.042	0.036	0.028
Arena migajonosa	0.012	0.010	0.008
Arena fina migajonosa	0.024	0.020	0.016
Arena muy fina mogajonosa	0.044	0.038	0.030
Migajón arenosa	0.027	0.024	0.019
Migajón arenosa fina	0.035	0.030	0.024
Migajón arenosa muy fina	0.047	0.041	0.033
Migajón	0.038	0.034	0.029
Migajón limosa	0.048	0.042	0.033
Limo	0.060	0.052	0.042
Migajón arcillo arenosa	0.027	0.025	0.021
Migajón arcillosa	0.028	0.025	0.021
Migajón arcillo limosa	0.037	0.032	0.026
Arcillo arenosa	0.014	0.013	0.012
Arcillo limosa	0.025	0.023	0.019
Arcilla	0.013	0.035	0.029

Muchos sitios cultivados con cultivos en hileras o surcos, tienen moderadas relaciones de erosión en canalillos; sitios donde esta relación es baja, como las parcelas agrícolas, la erosión se da entre los surcos; en estos sitios, las pendientes empinadas tienen una influencia grande sobre la erosión, mientras que la longitud de la pendiente tiene una influencia relativamente pequeña; lo opuesto es cierto para áreas de construcción recientemente excavadas, en las que la erosión por canalillos predomina, la longitud de la pendiente tiene una gran influencia.

Neitsch, *et al.* (2001), indica que el factor topográfico LS se calcula con la expresión 2.66, en la que Ll , es la longitud de la pendiente de la ladera (en m); ml es un término exponencial (adim) definido por la expresión 2.67 y α_h , es el ángulo de la pendiente de la ladera (en grados). De hecho, en la expresión 2.66, el primer paréntesis evalúa el factor L y el segundo obtiene el factor S .

$$LS = \left(\frac{Ll}{22.1}\right)^m (65.41 \times \text{sen}^2 \alpha_h + 4.56 \times \text{sen} \alpha_h + 0.065) \quad (2.66)$$

$$ml = 0.6 \times (1 - \exp[-35.835 Sl]) \quad (2.67)$$

Evidentemente que:

$$Sl = \tan \alpha_h \quad (2.68)$$

Siendo Sl la magnitud de la pendiente de la ladera, en %.

Alternativamente, Porta *et al.*, (1999), reporta la expresión 2.69 para el cálculo del factor S , con lo que la expresión 2.66, se transforma en la 2.70.

$$S = \frac{0.43 + 0.30 Sl + 0.043 Sl^2}{6.613} \quad (2.69)$$

$$LS = \left(\frac{Ll}{22.1}\right)^m (0.065 + 0.045 Sl + 0.0065 Sl^2) \quad (2.70)$$

Lal (1977), citado por Arellano (1994), dice que el escurrimiento superficial depende más de las características hidráulicas del suelo que del ángulo de la pendiente aunque los efectos de las propiedades del suelo, y la pendiente del terreno no son independientes. Por otra parte, el propio Arellano (1994), referido por CONAGUA y UACH (2006) asegura que **el factor LS es el más importante de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo que otros factores**, (excepto tal vez el factor de manejo y cultivo), **debido a que representa la variabilidad espacial del proceso de erosión y a que tiene efecto tanto**

en el volumen de escurrimiento como en las velocidad superficial del mismo. En particular para el estado de Chiapas, este autor refiere que bajo las condiciones de relieve con una agricultura dominante de laderas, el factor topográfico en una condición característica que **junto con la erosividad de la lluvia son los factores más significativos de la erosión hídrica.**

2.5.3.5. El factor de manejo de la vegetación C

El parámetro de cobertura y manejo o simplemente de vegetación C, definido como el cociente de pérdida de suelo en un terreno cultivado bajo condiciones específicas de desnudez y con barbecho (Wischmeier y Smith, 1978), **representa la capacidad de la vegetación para impedir el arrastre de sedimentos**; es decir que si el suelo permanece desnudo durante la época de lluvias, su capacidad de permitir el arrastre de material es más alta que si tiene algún tipo de cobertura, de tal forma que su determinación requiere de un análisis temporal, donde se conjuga la presencia de lluvia (factor *R*), con la desnudez del suelo. Debido a que el parámetro C representa un factor de reducción de erosión, carece de unidades (CONAGUA y UACH, 2006).

La erosión hídrica podría controlarse con más facilidad con el manejo de la vegetación presente, los rastrojos y la labranza, ya que **tanto el escurrimiento como la erosión, son fuertemente afectados por los diferentes tipos de cobertura vegetal y los sistemas de cultivos**; los bosques no perturbados y los pastos densos proveen la mejor protección del suelo y son igualmente efectivos: los cultivos forrajeros, ya sean leguminosas o praderas, siguen en efectividad debido a su cobertura relativamente densa; los cereales de grano pequeño tales como trigo y avena, son de condición intermedia ya que ofrecen obstrucción considerable para el arrastre superficial; por último, los cultivos en hileras tales como maíz, frijol, soya y papas, ofrecen prácticamente poca cobertura viviente durante sus etapas tempranas de crecimiento, y por lo tanto dejan el suelo susceptible de la erosión, a menos que los rastrojos de los cultivos anteriores estén presentes (Brady y Weil, 1999).

El dosel de la planta afecta la erosión reduciendo la energía efectiva de la lluvia al interceptar las gotas. Las gotas que caen del dosel (por ejemplo de las copas de los árboles) pueden recuperar velocidad pero es menor que con la que originalmente caían. La altura promedio de la cual caen las gotas desde el dosel y su propia densidad determina la reducción de la energía de la lluvia antes de volver a caer al suelo. Es más efectivo tener el suelo cubierto con residuos que tener un dosel vegetal, ya que por estar al nivel del suelo no se recupera velocidad.

Porta *et al.*, (1999), menciona que la evaluación de este factor, resulta muy difícil, al tener que integrar las características de cada sistema de cobertura; así que para conocer su valor hay que conocer las prácticas agrícolas habituales y la secuencia y duración de cada una de ellas a lo largo del año; la tabla 2.12 fue desarrollada por Weischmeier y

Smith en 1978, para la determinación del factor *C* para las condiciones de Estados Unidos, que por lo tanto, no son aplicables a las condiciones de México y mucho menos a las de las zonas tropicales y costeras de Chiapas, particularmente por el tipo y altura de la vegetación presente, ya que en estas áreas los árboles pueden llegar a alcanzar alturas mayores a los 50 o incluso a los 100 m; sin embargo, pueden servir de buen referente para deducir las que sean aplicables a estas condiciones; por ejemplo, podría agregarse al menos un par de renglones que consideren estas circunstancias; por supuesto, será necesario hacer una valoración o validación de los valores propuestos.

Tabla 2.12. Determinación del factor *C*, a partir de la cubierta vegetal y de la cobertura a nivel superficial

COBERTURA VEGETAL		VEGETACIÓN EN CONTACTO CON LA SUPERFICIE DEL SUELO						
TIPO Y ALTURA	SC	Tipo	SUPERFICIE CUBIERTA (%)					
	(%)		0	20	40	60	80	95
Cubierta no apreciable	NA	G	0.450	0.200	0.100	0.042	0.013	0.003
		H	0.450	0.240	0.150	0.091	0.043	0.011
Hierbas altas o matorral con una altura de caída de gota de unos 45 cm	25	G	0.360	0.170	0.090	0.038	0.013	0.003
		H	0.360	0.200	0.130	0.083	0.041	0.011
	50	G	0.260	0.130	0.070	0.035	0.012	0.003
		H	0.260	0.160	0.110	0.076	0.039	0.011
	75	G	0.170	0.100	0.060	0.032	0.011	0.003
		H	0.170	0.120	0.090	0.068	0.038	0.011
Matorral con una altura de caída de gota de unos 165 cm	25	G	0.400	0.180	0.090	0.040	0.013	0.003
		H	0.400	0.220	0.140	0.087	0.042	0.011
	50	G	0.340	0.160	0.080	0.038	0.012	0.003
		H	0.340	0.190	0.130	0.082	0.041	0.011
	75	G	0.280	0.140	0.080	0.036	0.012	0.003
		H	0.280	0.170	0.120	0.078	0.040	0.011
Árboles sin vegetación baja apreciable y altura de caída de 3.30 m	25	G	0.420	0.190	0.100	0.041	0.013	0.003
		H	0.420	0.230	0.140	0.089	0.042	0.011
	50	G	0.390	0.180	0.090	0.040	0.013	0.003
		H	0.390	0.210	0.140	0.087	0.042	0.011
	75	G	0.360	0.170	0.090	0.039	0.012	0.003
		H	0.360	0.200	0.130	0.084	0.041	0.011

En dicha tabla, se debe tener en cuenta que la vegetación se debe considerar distribuida al azar; la altura se mide como la altura media de la caída del agua; la superficie de cobertura (SC) se estima con la proyección vertical y se expresa como porcentaje de las superficie total; **G** significa cubierta superficial de gramíneas o similares con residuos vegetales con al menos 5 cm de profundidad; y **H** significa cobertura superficial principalmente formada por plantas herbáceas de hoja ancha.

Para Nietsch *et al.*, (2001), la cobertura de las plantas varía durante su ciclo de crecimiento, por lo que se pueden o deben ir actualizando los valores diarios de C utilizando la expresión 2.71, en la que C_{min} es el mínimo valor del factor de cobertura y manejo del suelo cubierto, y Rs es la cantidad de residuo en la superficie del suelo (en $kg \times ha^{-1}$).

$$C = \exp\{\ln(0.8) - \ln(C_{min})\} \exp[-0.00115Rs] + \ln\{C_{min}\} \quad (2.71)$$

El mínimo del factor C puede estimarse de un promedio conocido del factor C usando la expresión 2.72 propuesta por Arnold y Williams (1995), citado por Nietsch *et al.*, (2001) en la que C_{pa} es el promedio anual del factor C para la cubierta del suelo.

$$C_{min} = 1.463 \ln\{C_{pa}\} + 0.1034 \quad (2.72)$$

Por su parte, Figueroa *et al.*, (1991) propusieron una metodología simplificada de acuerdo con la cual se determina primeramente, el intervalo de tiempo en el que se presentan las lluvias más erosivas, lo que requiere del análisis de lluvias con el consiguiente espacio temporal de presencia. Una vez ubicado este período, se analizan los tipos de cobertura y su etapa de crecimiento y duración para determinar los intervalos de tiempo en que se presenta de forma simultánea una pobre cobertura y altos valores de lluvia. Adicionalmente, estos intervalos de tiempo, se cruzan con cada etapa de crecimiento de las especies que cubren el terreno, asignándose un valor de C por cada intervalo de tiempo, hasta cubrir el total del lapso de evaluación que habitualmente es de un año.

De lo anterior, es evidente que para determinar la distribución espacial de C , es necesario conocer con detalle el uso actual de suelo, para lo cual en la actualidad se recurre comúnmente al empleo de imágenes de satélite y los resultados obtenidos mediante su estudio se confirman, con el análisis de áreas de entrenamiento en campo.

Para las condiciones más comunes de uso del suelo y tipos de vegetación en Chiapas, Arellano (1994 y 2006) elaboraron las tabla 2.13 y 2.14, con valores de C , que recomienda utilizar para este caso, además que se pueden elaborar mapas con ellos,

que a su vez se pueden emplear en conjunto con los demás factores para estimar la tasa de erosión empleando la Técnica de Álgebra de Mapas (TAM).

2.5.3.6. El factor de prácticas de manejo del suelo *P*

El factor de prácticas de conservación *P*, se define como el cociente entre la pérdida de suelo con una práctica de conservación dada y aquella correspondiente a un terreno bajo cultivo en el sentido de la pendiente y que pueden ser surcados al contorno, fajas al contorno y terrazas. Su valor adimensional se encuentra entre 0 y 1, de modo que cuando no hay el efecto de ninguna práctica, se considera 1.

Tabla 2.13. Valores medios anuales de *C* utilizados para la estimación de la erosión hídrica actual en el estado de Chiapas (Arellano, 1994)

TEXTURA	VALOR DE C
	(adim)
Agricultura de temporal (cultivos anuales)	0.56
Agricultura migratoria en selva	0.32 – 0.45
Agricultura migratoria en bosque	0.32 – 0.45
Agricultura de riego	0.40
Agricultura de perennes	0.20
Cafetales	0.12 – 0.05
Pastos y frutales	0.12
Bosques (pino, encino, cedro, ayamel)	0.06 – 0.01
Selva alta	0.01
Selva media y baja	0.18
Sabana	0.18
Pastizal cultivado	0.07
Pastizal inducido	0.20

El estudio de la erosión es de relevancia para plantear acciones para su reducción o para paliar sus efectos. Al respecto, Gómez, *et al.* (2007), refieren que la localización de las acciones defensivas frente a la erosión es fácil una vez cuantificadas y priorizadas las áreas afectadas; **una las acciones más empleadas es la implementación de prácticas productivo conservacionistas en las áreas agrícolas y la reforestación en cuencas hidrográficas.**

Sobre este tema, Brady y Weil (1999), indican que **en algunos sitios con largas y/o fuertes pendientes, el control de la erosión logrado mediante el manejo de la cubierta vegetal, los residuos agrícolas, y labranza puede mejorarse ampliamente con la construcción de estructuras físicas, u otras obras que ayuden a orientar los**

escurrimientos aguas debajo de la pendiente. Estas obras y prácticas, que incluyen la labranza o surcado en contorno, cultivos en contorno, sistemas de terrazas, zanjas para la retención de agua, determinan, reduciéndolo, el valor del Factor P .

Tabla 2.14. Valores medios anuales de C utilizados para la estimación de la erosión hídrica actual en el estado de Chiapas, (Arellano, 2005)

TEXTURA	VALOR DE C
	(adim)
Matorral de niebla	0.0020
Selvas altas siempre verdes	0.0034
Bosques de pino-encino	0.0040
Bosques de liquidámbar	0.0030
Bosques de álamo	0.0020
Bosques de pino	0.0010
Sabanas y guatalas	0.0090
Pastizales naturales	0.0100
Pastizales inducidos	0.0250
Cultivos anuales	0.4700
Bosque de café	0.0380
Agricultura de riego	0.0710
Cuerpos de agua	0.0000
Áreas de depositación de sedimentos	1.0000
Nube	0.0000

Brady y Weil (1999), presentan en la tabla 2.15, diversos ejemplos de valores del factor P , para prácticas de labranza en contorno y condiciones de suelo sin cultivo para diferentes gradientes de pendiente. En dicha tabla, el producto de los factores SURCADO EN CONTORNO y SUELO DESNUDO y el SUBFACTOR TERRAZAS, da el valor del factor P , para terrenos terracedados. Es de notarse en la tabla, que los valores de P , se incrementan con la pendiente y que son menores para condiciones de suelo desnudo de cultivo, lo que muestra la importancia de esta práctica para el control de la erosión. El terraceo también reduce los valores de P ; de hecho, **cada uno de los factores que afectan la erosión, sugieren las prácticas apropiadas que se pueden implementar para el control de la erosión de la erosión del suelo.**

A este respecto, Arellano (1994), indica que cuando se introducen cultivos en suelos con pendientes, en ocasiones se utilizan prácticas mecánicas que reducen el escurrimiento del agua y por consecuencia la cantidad de suelo que se puede transportar. Este parámetro se refiere a las prácticas mecánicas y de labranza que modifican la estructura

del suelo, retrasando o incrementando la susceptibilidad del material de ser arrastrado. Cuando P toma valores cercanos a cero, indica que el suelo no está siendo erosionado debido a las prácticas mecánicas de conservación; y cuando toma el valor de 1, indica que se tiene la erosión máxima o potencial debido a que no existen prácticas. Estas variaciones se estiman, generando valores medios anuales para evaluaciones globales, o bien en evaluaciones temporales para generar un acumulado por temporada.

Los valores de P para las condiciones de fajas al contorno y para terrazas a nivel, se presentan en las tablas 2.16 y 2.17, respectivamente, ajustadas para usarse en México.

Tabla 2.15. Valores del factor P para prácticas de surcado en contorno y terrazas en distintas pendientes y para diferentes separaciones

PENDIENTE (%)	FACTOR P		SEPARACIÓN DE TERRAZAS (m)	SUBFACTOR TERRAZAS	
	SURCADO EN CONTORNO	SUELOS DESNUDOS		SALIDAS CERRADA	SALIDAS ABIERTAS
1 – 2	0.60	0.30	33	0.5	0.7
3 – 8	0.50	0.25	33 – 44	0.6	0.8
9 – 12	0.60	0.30	43 – 54	0.7	0.8
13 – 16	0.70	0.35	55 – 68	0.8	0.9
17 – 20	0.80	0.40	69 – 90	0.9	0.9
21 – 25	0.90	0.45	90	1.0	1.0

Tabla 2.16. Valores del factor P , ancho máximo de fajas y límites de longitud de pendiente para fajas en contorno

PENDIENTE DEL TERRENO (%)	VALOR DEL FACTOR P			ANCHO DE FAJA (m)	LONGITUD MÁXIMA DE LA PENDIENTE (m)
	(adim)				
	A ¹	B ¹	C ¹		
1 a 2	0.30	0.45	0.60	40	244
3 a 5	0.25	0.38	0.50	30	183
6 a 8	0.25	0.38	0.50	30	122
9 a 12	0.3	0.45	0.60	24	73
13 a 16	0.35	0.52	0.70	24	49
17 a 20	0.40	0.60	0.80	18	37
21 a 25	0.45	0.68	0.90	15	30

1: Para los valores de P :

A: Para rotación de 4 años de cultivo en surcos, granos pequeños con semillas de pastizales y 2 años de pastizales.

B: Para rotación de 4 años de cultivo en surcos, granos de invierno con semillas de pastizales y 1 años de pastizales.

C: Para fajas alternas de cultivos en surcos y granos de invierno.

Tabla 2.17. Valores del factor P para campos con terrazas a nivel¹

PENDIENTE DEL TERRENO (%)	VALOR DEL FACTOR P		CÁLCULO DEL VOLUMEN DE SEDIMENTOS ³	
	SURCADO EN CONTORNO ²	SUELO DESNUDO	CANALES EN PENDIENTE. SALIDA SUPERFICIAL	PENDIENTE TRASERA PRONUNCIADA. SALIDA SUBTERRÁNEA
1 a 2	0.6	0.30	0.12	0.05
3 a 8	0.5	0.25	0.10	0.05
9 a 12	0.5	0.30	0.12	0.05
13 a 16	0.7	0.35	0.14	0.05
17 a 20	0.8	0.40	0.16	0.06
21 a 25	0.9	0.45	0.18	0.06

1 La longitud de la pendiente es el intervalo entre terrazas.

2 Use estos valores para control de erosión interterrazas con tolerancia de pérdida de suelo especificada

3 Estos valores incluyen eficiencia de retención de sedimento.

2.5.4. MAGNITUD Y CLASIFICACIÓN DE LA TASA DE EROSIÓN

CONAGUA y UACH (2006), reporta que la FAO definió las cinco categorías o clases incluidas en la tabla 2.18, y propuso las tres categorías incluidas en la tabla 2.19 (segunda columna), para desglosar la última definida por la FAO como severa, para valores mayores a $200 \text{ t}\times\text{ha}^{-1}\times\text{año}^{-1}$; en la última columna de la misma tabla, se agregan las denominaciones propuestas por el autor para las mismas categorías adicionales.

Tabla 2.18. Clasificación de la magnitud de la tasa de erosión definida por la FAO

TASA DE EROSIÓN ($\text{t}\times\text{ha}^{-1}\times\text{año}^{-1}$)	DENOMINACIÓN FAO
00 → 05	Nula
05 → 10	Ligera o incipiente
10 → 50	Moderada
50 → 200	Severa
> 200	Muy Severa

Estas categorías adicionales, resultaron necesarias dada la magnitud de las tasas de erosión estimadas en zonas tropicales de México, particularmente en las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, para las que Pérez *et al.* (2008) y Pérez *et al.* (2012), reportó que de la evaluación de los impactos del huracán Stan en 2005, el menor porcentaje de superficie afectada por erosión corresponde a la categoría de 5 a $10 \text{ t}\times\text{ha}^{-1}\times\text{año}^{-1}$, con

0.50 % en Huixtla, 4.32 % en Huehuetán y 1.10 % para Coatán; el mayor porcentaje se concentra en el rango de 50 a 200 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$, para las cuencas Huixtla con 39.08 %, Huehuetán con 20.36 % y difiriendo con Coatán, cuyo mayor porcentaje lo concentra en la categoría de 200 a 500 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ con 29.87 %; en tanto que alrededor de una décima parte de las cuencas no tiene mayores problemas de erosión al encontrarse en la categoría que va de 0 a 5 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$, y que un porcentaje mayor y similar entre las tres cuencas se ubica en la última categoría que es mayor de 1,000 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

Tabla 2.19. Clasificación de la magnitud de la tasa de erosión propuesta por CONAGUA y UACH (2006) y por el autor para valores mayores a 200 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$

TASA DE EROSIÓN ($\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$)	DENOMINACIÓN CONAGUA Y UACH (2006)	DENOMINACIÓN PROPUESTA
200 → 500	Muy Severa	Muy Severa
500 → 1,000	Muy severa 1	Extrema
> 1,000	Muy severa 2	Extraordinaria

2.6. USO DE IMÁGENES DE SATÉLITE PARA ESTUDIOS DE COBERTURA

2.6.1. CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE SENSORES REMOTOS

2.6.1.1. Descripción y aplicabilidad general

El uso de la tecnología de los sensores remotos (SR) ha generado altas expectativas en el sector agrícola. Efectivamente, sin ser de ninguna manera la panacea como muchos investigadores han tratado de mostrar, los sensores remotos ofrecen un gran potencial para el monitoreo de la producción regional, no obstante que las incertidumbres en las estimaciones de campo a gran escala pueden ser incorrectamente direccionadas, (Lobell *et al.*, 2002).

Por su parte, Chuvieco (1990), cita entre otras muchas, **los estudios de cobertura y uso del suelo, como un área en la que ha sido probada la aplicabilidad de la teledetección o percepción remota (PR)**, en combinación siempre con otras técnicas convencionales como la fotografía aérea y sin invalidar la importancia del trabajo de campo. Enseguida se hace una breve referencia a la definición y aplicabilidad general de las imágenes generadas por los sensores remotos para luego derivar en las aplicaciones específicas de interés para el uso del suelo.

Jensen (2000), cita a la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) de los Estados Unidos y coincide con Aronoff (2005), al definir los sensores

remotos como el arte, la ciencia y la tecnología que consiste en la medición o adquisición de información de alguna propiedad o característica de un objeto o fenómeno mediante un mecanismo de registro que no está en contacto físico o íntimo con el objeto o fenómeno que se estudia.

Para Lasselin y Darteyre (1991), citados por Soria, *et al.* (1998) **la Percepción Remota como el conjunto de conocimientos y técnicas utilizadas para determinar características físicas y biológicas de objetos mediante mediciones a distancia, sin el contacto material con los mismos**; y Campbell (2002), define los SR como la práctica de obtención de información del terreno y de la superficie del agua, usando imágenes adquiridas desde el espacio mediante el uso de radiación electromagnética en una o más regiones del espectro electromagnético, reflejada o emitida de la superficie terrestre. La figura 2.21, ilustra esta definición de SR, en cuya tecnología debe incluirse el procesamiento, análisis y aplicación de la información captada o sensada.



Figura 2.21. Ilustración de un sensor remoto (SPOT 5 VEGETATION) adquiriendo imágenes estereoscópicas de la superficie terrestre mediante el registro de la radiación electromagnética emitida por el sol y reflejada por ella

Aronoff (2005), refiere que la fuente de energía reflejada por el objeto puede ser la radiación del sol o algún tipo de energía emitida por el propio sistema de SR, lo cual implica que se puedan tener varias formas de productos con datos sensados remotamente, y que incluyen la fotografía aérea, las imágenes digitales de satélite y las imágenes generadas con señales láser o de radar, según se muestra en el esquema de la figura 2.22.

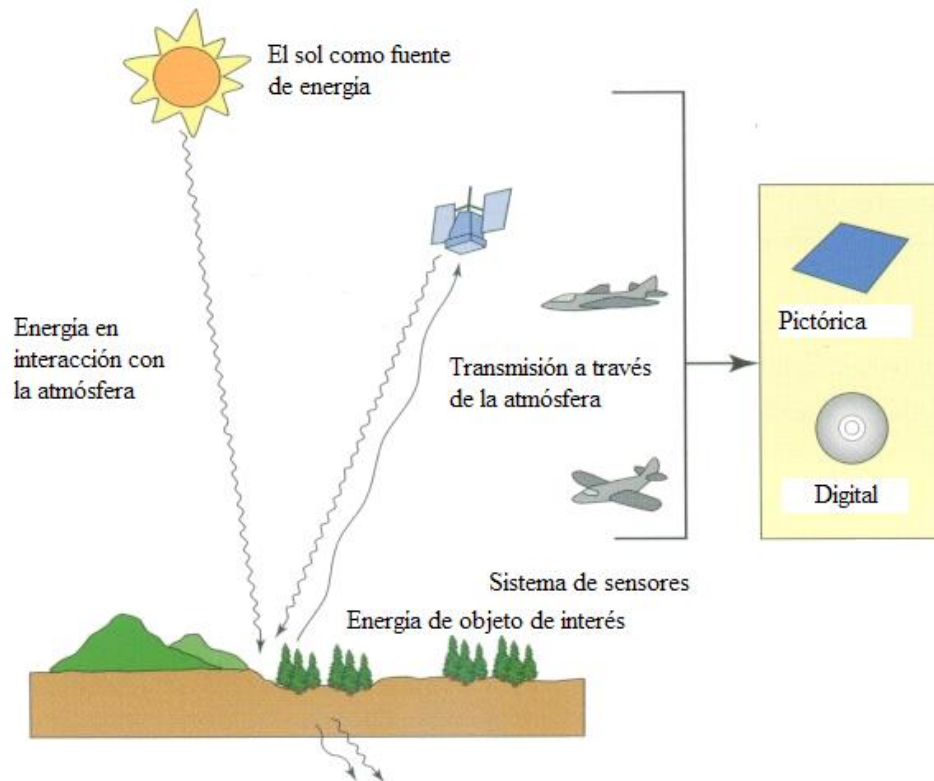


Figura 2.22. Fuentes de energía empleados por los sensores remotos

En la mayoría de los SR el proceso involucra una interacción entre la radiación incidente y el objeto de interés, lo que se puede visualizar en el esquema de la figura 2.23, en la que se involucran siete elementos, que se describen enseguida en referencia a la misma y de acuerdo con el Canada Center for Remote Sensing (2005).

- A: Fuente de energía o iluminación.** El primer requerimiento de los SR es tener una fuente de energía, la cual ilumina o provee de energía electromagnética para el objetivo de interés.
- B: Radiación y la atmósfera.** La energía viaja desde su fuente hasta el objetivo entrando en contacto con la atmósfera al pasar a través de ella. Esta interacción dura apenas en el poco tiempo en el que la energía viaja del objetivo al sensor.

C: Interacción con el objetivo. Una vez que la energía viaja del sensor a través de la atmósfera, interactúa con el objetivo dependiendo de sus propiedades y de la magnitud e intensidad de la radiación.

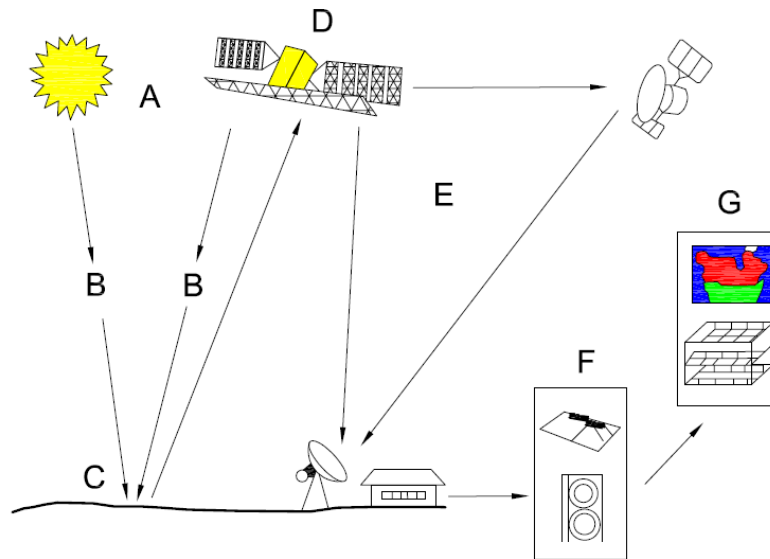


Figura 2.23. Esquematación del proceso de adquisición de datos con sensores remotos y su interpretación y análisis

- D: Almacenamiento de la energía por el sensor.** Después de que la energía ha sido dispersada o emitida por el objetivo, se requiere un sensor (remoto o en contacto con el objetivo) para coleccionar y almacenar la radiación electromagnética.
- E: Transmisión, recepción y procesamiento.** La energía almacenada por el sensor se transmite –frecuentemente en forma electrónica– a una estación de recepción y procesamiento, donde los datos se procesan en una imagen impresa o digital
- F: Interpretación y análisis.** La imagen generada se procesa, visual, digital y/o electrónicamente, para extraer información sobre el objetivo que fue captado en la imagen.
- G: Aplicaciones.** El elemento final del proceso de sensores remotos es el que consiste en aplicar la información extractada de la imagen para su mejor entendimiento, para obtener alguna nueva información o para resolver un problema particular.

Por lo tanto, se puede decir en general que **los SR están constituidos por un medio de transporte como un avión o una nave espacial o satélite que incluye la fuente de energía, y un sistema sensor o detector** que, de acuerdo con Jensen (2000) y con base en la tecnología que usan, pueden agruparse en los cinco tipos genéricos que se

reproducen en el cuadro 2.3, en el que además se puede apreciar el gran número de sensores existentes y, como consecuencia, el amplio tipo de imágenes disponibles.

Cuadro 2.3. Clasificación de los sistemas de sensores remotos con base en la tecnología aplicada

TECNOLOGÍA APLICADA	SISTEMAS DE SENSORES REMOTOS
Imágenes multiespectrales usando detectores y espejos de exploración	Landsat Multispectral Scanner (MSS)
	Landsat Thematic Mapper (TM)
	Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM ⁺)
	NOAA Geostationary Very High Resolution Radiometer (AVHRR)
	NASA and ORBIMAGE, Inc., Sea-viewing Field of view Sensor (SeaWiFS)
	Daedalus, Inc., Aircraft Multispectral Scanner (AMS)
	NASA Airborne Terrestrial Applications Sensor (ATLAS)
Imágenes multiespectrales usando arreglos lineales	SPOT 1, 2 y 3 High Resolution Visible (HRV) sensors y SPOT 4 High Resolution Visible Infrared (HRVIR) y Vegetation Sensor
	Indian Remote Sensing System (IRS), Linear Imaging Self-scanning Sensor (LISS)
	Space Imaging, Inc., (IKONOS)
	ORBIMAGE, Inc., OrbView-3 y OrbView-4 (Warfighter)
	EarthWatch, Inc., (Quickbird)
	NASA Terra Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)
	NASA Terra Multi-angle Imaging Spectroradiometer (MISR)
Imágenes espectrométricas usando arreglos lineales y de área	NASA Jet Propulsion Lab (JPL/CALTECH) Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)
	Canadian Compact Airborne Spectrographic Imager-2 (CASI-2)
	NASA Terra Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS)
	NASA Earth Observer (EO-1) Advanced Land Imager (ALI), Hyperion, and LEISA Atmospheric Corrector
Cámaras de imagen digital	Positive Systems, Inc.
	Litton Emerge Spatial, Inc.
Sistemas satelitales de fotografía	Russian SPIN-2 TK-350 KVR-1000
	NASA Space Shuttle Photography

2.6.1.2. Características de las imágenes adquiridas remotamente

Los sistemas de SR difieren en el nivel de detalle o resolución que pueden capturar. Aronoff (2005), refiere que hay cuatro diferentes tipos de resolución de los sensores

remotos, cuyo conocimiento es muy importante para la correcta interpretación de la información biofísica obtenida en las imágenes; éstas son: resolución espectral, resolución espacial, resolución temporal y resolución radiométrica. **La resolución se define como una medida de la habilidad de un sistema óptico para distinguir entre señales que son espacialmente cercanas y espectralmente similares; los cuatro tipos de resolución de una imagen determinan su idoneidad para una aplicación específica y define el método usado para el análisis. La resolución espectral se refiere al número y dimensión de intervalos específicos de longitud de onda en el espectro electromagnético para los cuales es sensitivo el instrumento del sensor remoto y se asocia con el número de bandas que capta, así como su ancho y posición.**

Para fines prácticos, la **resolución espacial nominal se define como la dimensión en metros del área instantánea proyectada IFOV (Instantaneous Field of View o Campo de Vista Instantáneo) y que corresponde con el tamaño del píxel.** Sobre este particular, Aronoff (2005), agrega que el tamaño de las entidades que se pueden ver en una imagen de SR, está determinada por tres factores: las características del objetivo y del fondo, la escala de la imagen y el poder de resolución del sistema; e indica que, adicionalmente, varios factores pueden degradar la calidad de la imagen y reducir la efectividad de su resolución espacial, entre las que se incluyen la pobre iluminación de la escena y las condiciones de la atmósfera, dadas por la presencia de humo, polvo o bruma, por ejemplo.

La **resolución temporal se refiere a la frecuencia con la que se toman las imágenes de una misma área.** Y la **resolución radiométrica, por otra parte, se define como la sensibilidad de un detector de SR para diferenciar la intensidad de señales como registros de flujo radiante reflejada o emitida desde la tierra,** y puede asociarse con el número de bits con los que el sensor registra la energía radiante, por lo que consecuentemente tiene un impacto significativo en la habilidad para medir las propiedades de los objetos de la escena (Jensen, 2000).

2.6.2. IMÁGENES DEL SATÉLITE LANDSAT

2.6.2.1. Características del sistema

En 1967 la NASA y el Departamento del Interior de los Estados Unidos dieron inicio al Programa denominado Earth Resources Technology Satellites (ERTSs) que incluiría el lanzamiento de 6 satélites, denominados ERTS-1, -2, -3, -4, -5 y -6; el primero de ellos se lanzó en julio de 1972. Con el lanzamiento del ERTS-2 en enero de 1975 el programa se red denominó como LANDSAT y los satélites se renombraron como LANDSAT del 1 al 6, en principio. Sin embargo, el LANDSAT 6 tuvo problemas para su lanzamiento, por lo que en su lugar se construyó y lanzó el LANDSAT 7. En el cuadro 2.4, tomado de Lillesand, *et al.*, (2004), se resumen las principales características de los satélites LANDSAT del 1 al 7, en el que se incluyen las bandas que cada uno tiene en los distintos tipos de sensores

que se han empleado en el Programa y que son: el Return Beam Vidicon (RBV), el Mutispectral Scanner (MSS), el Thematic Mapper (TM), el Enhanced Thematic Mapper (ETM) y el Enhanced Thematic Mapper plus (ETM+).

Cuadro 2.4. Principales características de los satélites LANDSAT

SATÉLITE	FECHA DE LANZAMIENTO	FIN DE LA MISIÓN	BANDAS RVB	BANDAS MSS	BANDAS TM	RESOLUCIÓN TEMPORAL	ALTURA
						(días)	(km)
LANDSAT 1	23/07/1972	06/01/1978	01-mar	04-jul	No	18 días	900
LANDSAT 2	22/01/1975	25/02/1975	01-mar	04-jul	No	18 días	900
LANDSAT 3	05/03/1978	31/03/1983	A-D	04-ago	No	18 días	900
LANDSAT 4	16/07/1982	Vigente	No	01-abr	01-jul	16 días	705
LANDSAT 5	01/03/1984	Vigente	No	01-abr	01-jul	16 días	705
LANDSAT 6	05/10/1993	Fallido	No	No	01-jul	16 días	705
LANDSAT 7	15/04/1999	Vigente	No	No	01-jul	16 días	705

Actualmente se emplean más ampliamente las imágenes de los satélites LANDSAT 5 y 7; éste último se lanzó el 15 de abril de 1999, desde Western Test Range por el vehículo de lanzamiento prescindible Delta II; pesa aproximadamente 1,973 kg, mide 4.04 m de largo y 2.74 m de diámetro y consiste de una nave espacial o satélite y el radiómetro multiespectral Mapeador Temático Mejorado plus (ETM+), que se ilustra esquemáticamente en la figura 2.24, redibujado de la fuente indicada.

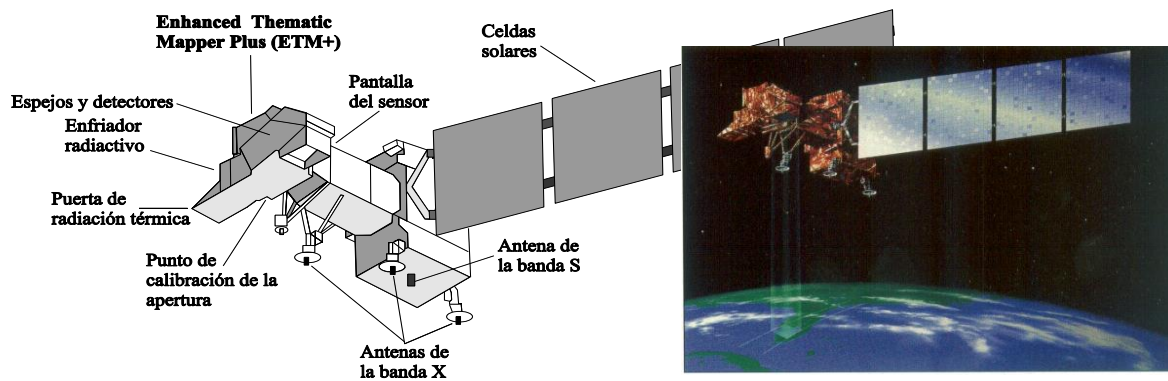


Figura 2.24. Disposición del sensor Enhanced Thematic Mapper Plus en el satélite LANDSAT 7. (Fuente: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/> y Aronoff, 2005)

El LANDSAT 7 colecta datos en áreas de 185 × 170 km, su resolución temporal es de 16 días y tiene un registrador en estado sólido de 378 Gb de capacidad, que puede

almacenar 42 minutos de datos del sensor y 29 horas de envío de datos a las estaciones terrestres, lo cual es necesario ya que el ETM+ obtiene 150 Mb de datos cada segundo, en una resolución radiométrica de 8 bits (Jensen, 2000).

2.6.2.2. Descripción y aplicabilidad de las bandas del sensor ETM+

Las ocho bandas que emplea el sensor ETM+ del LANDSAT 7 y que definen su resolución espectral, son las que se listan en el cuadro 2.5, mismas que se determinaron después de muchos años de análisis para que sus valores posibilitaran la penetración en cuerpos de agua, la medición de humedad en plantas y suelos, la diferenciación de nubes, nieve y hielo y la identificación de alteraciones hidrotérmicas en algunos tipos de rocas (Lillesand, 2004; Campbell, 2000; y Jensen, 2000). Una descripción más detallada de las siete bandas empleadas en el ETM+, tomada de estos mismos autores, incluyendo sus aplicaciones potenciales se hace a continuación.

Cuadro 2.5. Características de las bandas del espectro electromagnético empleadas por el ETM+ del LANDSAT 7

NÚM.	BANDA	ANCHO DE LA BANDA (µm)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (m)
	NOMBRE		
1	Azul	0.450 - 0.520	30
2	Verde	0.520 - 0.600	30
3	Rojo	0.630 - 0.690	30
4	Infrarrojo cercano (NIR)	0.760 - 0.900	30
5	Infrarrojo medio (MIR)	1.550 - 1.750	30
6	Infrarrojo térmico (TIR)	10.400 - 12.500	60
7	Infrarrojo lejano (LIR)	2.080 - 2.350	30
8	Panromático	0.500 - 0.900	15

Banda 1: Azul (Blue: 0.450 - 0.520 µm). Proporciona una fuerte penetración en cuerpos de agua, lo que permite hacer mapeo de aguas costeras y posibilita el análisis del uso del suelo y de las características de la vegetación. El límite inferior del rango está precisamente en el pico de la transmitancia del agua clara, en tanto que el límite superior está en el límite de la absorción de la clorofila azul para la vegetación verde sana. El límite inferior es sustancialmente afectado por la dispersión y la absorción atmosférica.

Banda 2: Verde (Green: 0.520 - 0.600 µm). Esta banda abarca la región entre las bandas azul y roja de absorción de la clorofila y, por lo tanto, corresponde a la

reflectancia verde de vegetación sana y que permite discriminar los tipos de vegetación y evaluar su vigor.

Banda 3: Rojo (Red: 0.630 - 0.690 μm). Esta es la banda de la absorción de la clorofila roja de la vegetación verde sana y representa una de las bandas más importantes para la discriminación de la vegetación. Se usa también para definir los límites de la vegetación y del suelo. Esta banda puede exhibir más contraste que las bandas 1 y 2, debido a que reduce el efecto de la atmósfera. El límite 0.69 μm es significativo porque representa el inicio de la región de 0.68 a 0.75 μm , donde la reflectancia de la vegetación se traslapa, dando lugar a que pueda haber confusión en las investigaciones sobre la vegetación.

Banda 4: Infrarrojo cercano IRC (Near Infrared NIR: 0.760 - 0.900 μm). Esta banda responde especialmente bien a la cantidad de biomasa vegetal presente en la escena y se usa para la identificación de los cultivos y enfatizar los contrastes suelo/cultivo y tierra/agua.

Banda 5: Infrarrojo medio IRM (MIR: 1.550 - 1.750 μm). Esta banda es sensible a la turgencia o cantidad de agua en las plantas y en el suelo, lo cual puede usarse para el estudio de la sequía de los cultivos y en las investigaciones sobre el vigor de las plantas. Además, esta es una de las pocas bandas que puede usarse para discriminar entre nubes, nieve y hielo, lo cual es muy importante en las investigaciones hidrológicas.

Banda 6: Térmica (Termal: 10.400 - 12.500 μm). El LANDSAT 7 genera la banda 6 con grano bajo (Canal 6L) y grano alto (Canal 6H), lo que permite varias opciones de análisis y aplicaciones, tales como la medición relativa de temperatura radiante o un cálculo de temperatura absoluta. Esta banda mide la cantidad del flujo de radiación infrarroja emitida desde las superficies, por lo que puede usarse para el análisis de estrés hídrico en las planas. La temperatura aparente es una función de la emisividad y la temperatura verdadera o cinética de la superficie, lo que puede aplicarse para localizar la actividad geotérmica, para el mapeo de la inercia térmica en investigaciones geológicas, en la clasificación de la vegetación, en el análisis del estrés vegetal y en estudios de humedad del suelo. El sensor frecuentemente obtiene información sobre diferencias en aspectos topográficos en áreas montañosas.

Banda 7: Infrarrojo Lejano IRL (LIR: 2.080 - 2.350 μm). Esta es una banda importante para la discriminación de las formaciones geológicas y para poder diferenciar los minerales de las rocas y es particularmente efectiva en la identificación de zonas de alteraciones hidrotérmicas en rocas. También es sensitiva al contenido de humedad de las plantas.

Banda 8: Pancromática Pan (0.520 - 0.900). La banda Pancromática es la mayor novedad del sensor ETM⁺ en el LANDSAT 7. Su resolución espacial de 15 m registrado

con las demás bandas, permite que las imágenes generadas a través de este sensor se puedan trabajar para obtener ampliaciones hasta una escala de 1:25.000.

2.6.3. IMÁGENES DEL SATÉLITE SPOT

Un sistema hoy ampliamente utilizado en el mundo y desde noviembre de 2003 disponible en México, es el Sistema para la Observación de la Tierra (Système Pour l'Observation de la Terre o SPOT), el cual fue concebido y diseñado a principios de 1978 por el gobierno francés como un programa comercial para operar a nivel mundial más que experimental y, transmite sus datos a más de 20 países a través del mismo número de estaciones terrestres. De acuerdo con Campbell (2000), este sistema se diseñó para proveer datos para estudios de uso del suelo, evaluación de recursos renovables, exploración de recursos geológicos y, para trabajo de cartografía a escalas grandes.

Este sistema tiene una resolución radiométrica de 8 bits, y una resolución temporal de 26 días, aunque como tiene cobertura estereoscópica, realmente toma una imagen de la misma área cada 4 o cuando más cada 5 días (dependiendo de la latitud del lugar), lo cual también implica que se pueden generar imágenes estereoscópicas. Su peso es de aproximadamente 1,750 kg y sus dimensiones de 2 × 2 × 3.5 m; la longitud del panel de celdas solares es de 15.6 m. El último satélite de este sistema, es el SPOT 5, que fue lanzado el 3 de mayo de 2002; lleva los instrumentos High Resolution Geometric (HRG) y High Resolution Stereoscopic (HRS) y el Vegetation 2, cuyas características de resolución espectral y espacial se exponen en el cuadro 2.6 y una imagen del mismo se muestra en la figura 2.25 (Lillesand, *et al.* 2004 y Aronoff, 2005).



Figura 2.25. Systeme Pour l'Observation de la Terre 5 (SPOT 5)

Cuadro 2.12. Características de los sensores del satélite SPOT 5 y su comparación con las del LANDSAT 7

SENSOR	BANDAS ESPECTRALES	RESOLUCIÓN ESPACIAL	ANCHO DE FRANJA	BANDAS LANDSAT
	(μm)	(m)	(km)	
High Resolution Geometric (HRG)	Pan: 0.48 – 0.71	2.5 o 5.0	60 – 80	Pan 0.50 – 0.90
	B1 : 0.50 – 0.59	10		Verde 0.52 – 0.60
	B2 : 0.61 – 0.68	10		Rojo 0.63 – 0.69
	B3 : 0.78 – 0.89	10		NIR 0.76 – 0.90
	B4 : 1.58 – 1.75	20		MIR 1.55 – 1.75
High Resolution Stereoscopic (HRS). Vegetation 2	Pan: 0.49 – 0.69	5.0 – 10.0	120	Pan 0.50 – 0.90
	B1 : 0.45 – 0.52	1000	2,250	Azul 0.45 – 0.52
	B2 : 0.61 – 0.68	1000		Rojo 0.63 – 0.69
	B3 : 0.78 – 0.89	1000		NIR 0.76 – 0.90
	B4 : 1.58 – 1.75	1000		MIR 1.55 – 1.75

El uso de los datos generados por estos sensores, se facilita por la condición multiespectral con la moderada resolución espacial, la elevada fidelidad geométrica y la posibilidad de tener imágenes pancromáticas simples de 2.5 m de resolución espacial o tamaño de píxel, todo lo cual hace posible su aplicación a un amplio rango de situaciones que van desde la predicción de cosechas, hasta el monitoreo de cubiertas vegetales y observaciones de largo alcance del cambio climático.

Los índices de vegetación (que se definen en el apartado siguiente), para las bandas del SPOT se pueden determinar similarmente que para las bandas del LANDSAT, por lo que su aplicación es idéntica, con mayores ventajas dada su resolución espacial.

2.6.4. ÍNDICES DE VEGETACIÓN

Una forma específica de hacer aplicaciones como las indicadas en los temas anteriores, es mediante su clasificación y análisis a través de los llamados índices de vegetación (IV o VI por sus siglas en el idioma inglés), que relacionan de diferente manera las distintas imágenes generadas por las bandas electromagnéticas contenidas en ellas. Esto puede hacerse gracias a la diferente reflectancia y en consecuencia diferentes firmas espectrales de la vegetación en razón a su especie, edad, condición de sanidad, condición de cobertura y del fondo.

Desde los años 60's, se definieron y modelaron varias variables biofísicas de vegetación, usando datos de sensores remotos, que han derivado en los índices de vegetación,

definidas como medidas radiométricas adimensionales que funcionan como indicadores de la abundancia y actividad relativa de la vegetación verde, incluyendo frecuentemente el Índice de Área Foliar (IAF), el porcentaje de cobertura verde, el contenido de clorofila, la biomasa verde y la Radiación Absorbida Fotosintéticamente Activa (RAFA), (Jensen, 2000).

En particular, los espectros en el infrarrojo medio de vegetación verde son dominados por absorción vibracional de agua líquida. Las bandas de agua se cambian por longitudes de onda ligeramente más pequeñas debido a los puentes de hidrógeno y la absorción en la región visible se debe a la clorofila; por otra parte, el espectro en la región no visible de vegetación seca y no fotosintética presenta absorciones debido a la celulosa, la lignina y el nitrógeno (Schowengerdt, 1997).

Este mismo autor, señala que la reflectancia del follaje es muy baja en la parte visible y la irradianza solar es máxima (la luz solar es absorbida para la fotosíntesis); en el infrarrojo cercano (IRC) el follaje tiene una alta reflectancia con una transición muy rápida entre el rojo y el IRC en 750 nm, lo cual es completamente diferente de la reflectancia del suelo (material del fondo) contra el cual usualmente se observan las hojas. Por su parte, la reflectancia del suelo se incrementa gradualmente conforme aumenta la longitud de onda sobre la misma región, aunque la reflectancia absoluta varía con el tipo de suelo y su contenido de humedad.

Muchos índices de vegetación se han generado y se aplican a la información obtenida de las imágenes de satélite como los del satélite LANDSAT 7 TM+, que maneja siete bandas del espectro electromagnético. Los índices más importantes, citados por Schowengerdt (1997), y sus respectivas ecuaciones de cálculo son los que se refieren enseguida, en las que la variable ρ_i representa la reflectancia de la Banda azul (ρ_A), Banda verde (ρ_V), Banda roja (ρ_R), Infrarroja cercana (ρ_{IRC}), Infrarrojo medio (ρ_{IRM}), Térmico (ρ_T), Infrarrojo Lejano (ρ_{IRL}), y Pancromático (ρ_P).

El Índice de Vegetación Perpendicular (*PVI*):

$$PVI = - \text{Sen } \rho_{NIR} \times \text{Cos } \rho_R \quad (2.73)$$

El Índice de Vegetación Relacionado (*RVI*):

$$RVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_R} \quad (2.74)$$

El Índice de Vegetación de las Diferencias Normalizadas (*NDVI*):

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \quad (2.75)$$

o

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - 1}{\rho_{NIR} + 1} \quad (2.75')$$

El Índice de Vegetación para el Porcentaje Infrarrojo (*IPVI*)

$$IPVI = \frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_R} = 0.5 \times (NDVI + 1) \quad (2.76)$$

El Índice de Vegetación Ajustado por el Suelo (*SAVI*)

$$SAVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_R}{\rho_{NIR} + \rho_R} \times (1 + L) \quad (2.77)$$

con:

$$L = 1 - (2 \times \text{pendientex } NDVI \times W DVI) \quad (2.78)$$

El Índice de Vegetación Ajustado por el Suelo Modificado (*MSAVI*)

$$MSAVI2 = 1/2 \times [(2 \times \rho_{NIR} + 1) - \sqrt{((2 \times \rho_{NIR} + 1)^2 - 8 \times (\rho_{NIR} - \rho_R))}] \quad (2.79)$$

El Índice de Vegetación de Diferencias de Peso (*WDVI*)

$$WDVI = \rho_{NIR} - \text{pendientex } \rho_R \quad (2.80)$$

El Índice de Vegetación Ajustado por Suelo Transformado (*TSAVI*)

$$TSAVI = \frac{a \times \rho_{NIRveg} - a \times \rho_{Rveg} - b}{\rho_{Rveg} + a \times \rho_{NIRveg} - a \times b + X(1 - a^2)} \quad (2.81)$$

Otro índice, definido por Huete *et al.* (1999), es el Índice de Vegetación Cuadrulado nivel 3 (MOD I3), que emplea en sus productos, reflectancia bidireccional diaria; pueden proporcionar mapas de vegetación corregidos atmosféricamente, libres de nubes, ajustados al nadir y con resoluciones de 250 m, 1 km y 0.25°; y pueden combinarse con los índices *NDVI* y el Índice de Vegetación Realzada (*EVI*) dado por la expresión (2.82) y propuesto por los mismos autores, según los cita Jensen (2000). En dicha expresión *L*,

es la corrección al efecto del fondo del follaje y C_1 y C_2 son coeficientes para corregir el efecto del aerosol en las bandas roja y azul.

$$EVI = \frac{\rho_{NIR} \rho_{rojo}}{L + \rho_{NIR} + C_1 \rho_{rojo} + C_2 \rho_{azul}} (1 + L) \quad (2.82)$$

Por último, el módulo *TASSCAP* de IDRISI32 mediante el procesamiento o composición de las imágenes de las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 (excluye la banda térmica 6) hace un proceso de ortogonalización de Gram Schmidt para generar 3 imágenes, bandas o índices denominados Brightness, Greenness y y Moistness. El primero se refiere a la brillantez del suelo; a las bandas Greenness algunas veces se refiere como el Índice de Vegetación Verde (GVI), como el reflejo de la cobertura vegetal verde o como la biomasa sobre el suelo; y el índice Moistness se relaciona con el contenido de humedad del fondo (Idrisi, s/f).

De lo planteado por Schowengerdt (1997) y Huete *et al.* (1999), se puede concluir que los índices de vegetación pueden aplicarse para:

- El análisis de coberturas vegetales;
- El monitoreo de la producción de cultivos agrícolas en la generación de modelos de crecimiento;
- Aunque de manera imprecisa, para predecir aspectos como el Índice de Área Foliar (*IAF*) y la cantidad Absorbida de Radiación Fotosintéticamente Activa (*RAFA*);
- El estudio de la temperatura de la vegetación y del suelo;
- Definición el contenido de agua en las plantas; y
- Determinación la biomasa en fresco y en seco de cultivos.

Soria, *et al.* (1998) cita a Trueba, *et al.*, (1984), Alberto, *et al.*, (1991), Rivera (1996), Bocco y Valenzuela (1988), Prado *et al.*, (1991) y a Palacios y López (1991), para referir múltiples trabajos desarrollados en los que se han empleado imágenes de satélite para evaluar las áreas afectadas por diversos grados de erosión en México.

2.6.5. CLASIFICACIÓN SUPERVISADA DE LAS IMÁGENES

De acuerdo con Eastman (2006), existen dos enfoques básicos para el proceso de clasificación de imágenes de satélite: clasificación supervisada y clasificación no supervisada; con la clasificación supervisada, se provee una descripción estadística del

modo en el que se espera que ciertas coberturas terrestres aparezcan en la imagen, y luego se usa un procedimiento (conocido como un clasificador) para evaluar la probabilidad de que cada pixel pertenezca a una de estas clases. Con la clasificación no supervisada, por otra parte, se utiliza un enfoque muy diferente; se emplea otro tipo de clasificación para descubrir en la imagen patrones de ocurrencia común y de reflectancia distintiva, con la suposición de que éstos representan clases importantes de cobertura terrestre; luego, el analista determina la identidad de cada clase por medio de una combinación de experiencia y recorridos de campo.

La clasificación digital supervisada comienza con la definición de las categorías que se pretenden distinguir en la imagen. Se trata de una clasificación basada en los valores numéricos o números digitales (*ND*), por lo que se obtiene el rango de ellos que identifica a cada categoría para todas las bandas que intervienen en la clasificación.

El primer paso, por lo tanto, consiste en identificar las clases de cobertura de interés en la imagen, que se denominan áreas de entrenamiento y luego se hace un análisis estadístico de las reflectancias que éstas presentan, lo que se conoce como firmas espectrales. El segundo paso, consiste en localizar las áreas identificadas en la imagen en campo, y definir la clase de cobertura que corresponde, (Verbyla y Kang-tsung, 1997, y Soria, *et al.*, 1998).

Una vez terminada la selección de las áreas de entrenamiento, se procede a calcular las estadísticas elementales de cada categoría: media, rango, desviación típica, matriz de varianza – covarianza, etc., a partir de los *ND* de todos los píxeles incluidos en el área de entrenamiento de dicha clase; el cual se aplica a cada banda espectral y se conoce como fase de asignación (Esatman, 2006 y Canada Center for Remote Sensing, 2005); y en ella, según Soria, *et al.*, (1998), se trata de asignar cada uno de los píxeles de la imagen a una de las clases definidas en la fase de entrenamiento, lo cual se hace, en función de sus *ND* para cada una de las bandas que se emplean en el proceso, con lo que se genera una nueva imagen, cuyo *ND* expresan la categoría en la cual se han incluido cada uno de los píxeles de la imagen original.

Estos últimos autores, agregan que, desde el punto de vista estadístico, los criterios más empleados para realizar este proceso, son aquellos que definen un área de dominio en torno al centro de cada categoría a discriminar mediante un conjunto de funciones discriminantes, que definen las fronteras de delimitan cada categoría; el píxel se asigna a una clase dada si sus *ND* se encuentran dentro del área de dominio de dicha clase. Las funciones discriminantes más comunes para establecer las fronteras estadísticas entre clases, son el método de la mínima distancia, el método del paralelepípedo y el clasificador de máxima probabilidad, que se pueden revisar en prácticamente cualquier publicación sobre análisis de imágenes de satélite.

2.7. LA TÉCNICA DEL ÁLGEBRA DE MAPAS

2.7.1. CONCEPTUALIZACIÓN

El álgebra de mapas incluye un amplio conjunto de operadores que se ejecutan sobre una o varias capas ráster de entrada para producir una o varias capas ráster de salida, entendiendo por operador un algoritmo definido mediante ecuaciones, que realiza una misma operación en todas las celdillas de una capa ráster. Cada capa ráster es una matriz de números y la operación se realiza para todos los números de la matriz, por tanto para todas las celdillas de la capa ráster; sin embargo, aunque ambas operan sobre matrices, el álgebra de mapas tiene poco más que ver con el concepto matemático de álgebra matricial.

Como ejemplo y en alusión a la figura 2.26, el operador $B = A \times 100$, genera una nueva capa (B) asignando a cada celdilla el valor de la celdilla correspondiente en la capa A multiplicado por 100.

A							B = 100 x A						
390	388	384	380	360	353	350	39000	38800	38400	38000	36000	35300	35000
392	390	385	380	370	360	360	39200	39000	38500	38000	37000	36000	36000
396	395	392	387	380	370	367	39600	39500	39200	38700	38000	37000	36700
400	400	395	393	387	380	372	40000	40000	39500	39300	38700	38000	37200
407	406	400	400	393	387	380	40700	40600	40000	40000	39300	38700	38000
413	410	406	404	400	393	387	41300	41000	40600	40400	40000	39300	38700
420	414	410	406	404	400	393	42000	41400	41000	40600	40400	40000	39300

Figura 2.26. Ejemplo de aplicación de un operador aritmético ($B=100 \times A$) que ilustra el principio fundamental de la técnica de álgebra de mapas

Con base en este ejemplo, evidentemente, pueden definirse un infinito número de operadores, aunque normalmente se clasifican en función de las celdillas implicadas en el cálculo en: locales, de vecindad o focales, de bloque, de área, de área extendida y operadores globales.

Los **operadores locales** generan una nueva capa a partir de una o más capas previamente existentes y cada celdilla de la nueva capa recibe un valor que es función de

los valores de esa misma celdilla en las demás capas, lo cual se puede mostrar matemáticamente con la ecuación 2.83.

$$Zm_{x,y} = f(Z1_{x,y}, Z2_{x,y}, \dots, Zn_{x,y}) \quad (2.83)$$

En la expresión 2.83, la función representada por $f()$ es una combinación de operadores y funciones de distinto tipo:

- a) Aritmético (suma, resta, multiplicación, división, raíz cuadrada, potencia, etc.)
- b) Lógico (AND, OR, XOR, NOT)
- c) Relacional ($>$, $>=$, $<$, $<=$, $==$, $!=$)
- d) Trigonométrico (sen, cos, tan, etc)
- e) Condicional (si *condición* entonces *instrucciones*, si no: *otras instrucciones*).

En cuanto a operadores de tipo aritmético, puede tratarse de operaciones sencillas como, por ejemplo, la multiplicación por 100 de una capa de altitudes en metros para obtener una capa de altitudes en centímetros o la suma de 12 capas de precipitación mensual para obtener una capa de precipitación anual.

Siguiendo un enfoque sistémico de lo que es un SIG, el álgebra de mapas es un conjunto de operadores, y cada operador constituye un componente del sistema de información que transforma una serie de entradas de información en una serie de salidas. Las entradas y salidas no son sólo capas espaciales sino que también pueden ser tablas o visualizaciones en pantalla o impresora.

2.7.2. APLICABILIDAD

Los mapas de erosión se elaboran con el fin de representar la distribución superficial de la actual o potencial erosión en un área, mostrando tipos, grados y tasas de erosión; pudiendo mostrar o determinar, por ejemplo, el grado en la erosión ha afectado el perfil del suelo (Baumann, 2000).

Con esta base, Arellano (1994), propone que dada la estructura de la EUPS (expresión 2.59), ésta puede evaluarse mediante la técnica de álgebra de mapas (TAM), si se genera un plano, debidamente georeferenciado para cada una de las componentes de la ecuación, tal como se esquematiza en la figura 2.27.

Ello es además, hoy día, mucho más factible y sencillo con el empleo de las tecnologías que emplean imágenes de satélite para determinar el uso del suelo, los modelos de elevación digital para mostrar y analizar la topografía del terreno, y los sistemas de información geográfica para la manipulación de la información y para la ejecución de las operaciones con los mapas.

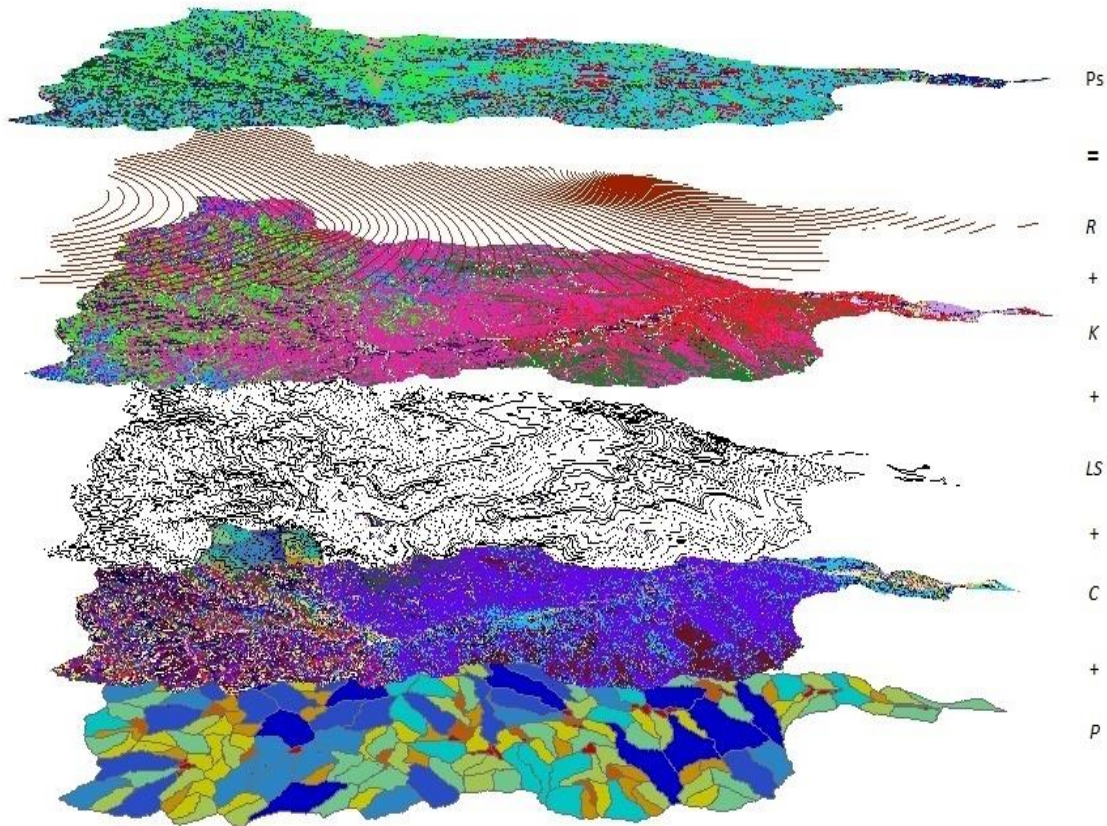


Figura 2.27. Esquematización del uso de la técnica de álgebra de mapas para la evaluación de la EUPS mediante la generación y multiplicación de un mapa para cada factor que la compone

La EUPS fue adaptada para su uso en Chiapas por Arellano (1994) mediante la aplicación de la técnica de álgebra de mapas para la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en sus diferentes regiones agrícolas; posteriormente, (2005) la empleó en la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la cuenca del Río Custepec, ubicada en la Vertiente Interior de la Sierra Madre de Chiapas.

Por otra parte, Arellano (2012), utiliza la técnica referida a la evaluación de EUPS para la estimación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y la obtención del plano de Erosión Hídrica Actual (EHA) en la Cuenca Superior del Río Huehuetán, precisando que se operó la EUPS mediante álgebra de mapas (Arellano, 1994; Pérez, *et al.*, 2007) con uso del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la cuenca y el Sistema de Información Geográfica (SIG) ArcView 3.2 tanto de variables en celdas ráster (K , LS , C , P) como vectoriales (R).

En los últimos años se han vuelto muy popular que modelos como el HEC-HMS y el SWAT (USACE, 2000; Neitsch *et al.*, 2001) que incluyen como una alternativa el método del Nc para calcular los escurrimientos directos. En el HEC-HMS es muy común usar el

Método en una cuenca para incremento de tiempo tan pequeños (del orden de minutos) y sus respectivos parámetros hidrológicos, como el N_c , se pueden analizar como un modelo distribuido o como un Modelo Agregado (Todini, 1988; Bedient *et al.*, 2012); en tanto que en el SWAT, el Método se usa para calcular láminas escurridas en 24 horas y la cuenca se considera como un Modelo Distribuido.

Para su aplicación en el cálculo, Dal-Ré (2003) refiere que el Modelo Agregado se caracteriza por considerar las variables y los parámetros implicados uniformemente distribuidos sobre la cuenca, obteniendo su magnitud mediante procedimientos de interpolación basados en principios geométricos; en tanto que el Modelo Distribuido, considera la variabilidad espacial tanto de las variables como de los parámetros implicados; y determinó la lámina escurrida en una cuenca de España empleando los Modelos Agregado y Distribuido y usando SIG y la singularidad de los números primos, asignando un valor diferente a cada condición de pendiente, precipitación y uso del suelo y a su producto (que resulta ser necesariamente un número primo también) y le asoció el N_c , que resulta de cada combinación biunívoca. Por otra parte, para aplicar el Modelo Agregado al cálculo del escurrimiento, obtuvo el promedio de N_c de todas las celdas y calculó un valor de S_r con la expresión 2.31 y un valor promedio de L_e con la 2.35; en tanto que para aplicar el Método Distribuido, aplicó las mismas expresiones a cada celda primeramente y obtuvo el valor de L_e para la cuenca, con la suma de los valores de cada celda; los resultados arrojaron un valor mayor en más del doble cuando se aplicó el Método Distribuido, lo cual -concluyó- no es habitual, y se atribuye a la gran heterogeneidad de la cuenca, así como a trabajar con rangos de precipitación que apenas producen escurrimiento en la cuenca.

Pérez *et al.*, (2007) y Pérez *et al.*, (2012) aplicó la TAM para estimar la tasa de erosión en cuencas costeras del estado de Chiapas, evaluando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo y elaborando un mapa para cada una de los factores que en ella intervienen. Cordero (2008), por su parte, utilizó dos metodologías para estimar la tasa de erosión de la Cuenca del Río Huixtla del estado mexicano de Chiapas; la primera aplicando la extensión del software Arcview 3.2 denominado Soil and Water Assessment Tools (SWAT) y la segunda mediante la Técnica de Álgebra de Mapas, obteniendo resultados muy similares.

Por su parte Rivera *et al.*, (2012), aplicaron la TAM para evaluar la pérdida de suelo por erosión hídrica mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, en una cuenca del Estado de México con pendientes mayores a 25 %, y comparar y validar los resultados obtenidos con la misma ecuación, pero valorada con el modelo SWAT, lo que mostró la confianza que se le puede atribuir a esta técnica.

Por las características de los sistemas de información geográfica (SIG), éstos constituyen una magnífica herramienta para la aplicación distribuida de los modelos hidrológicos a partir de información digital y los sensores remotos el complemento ideal para

proporcionarla; además, los SIG, permiten considerar la variación espacial de la precipitación, haciendo posible la generación de una capa con los valores específicos para cada sitio de la celda o píxel de la cuenca. De manera similar que en el modelo agregado en el HEC-HMS (USACE, 2000 y 2010) y la TAM para la EUPSM, es posible aplicarla en ArcGIS para obtener los N_c en una cuenca.

2.8. EVENTOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS EN LAS CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS

2.8.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS EVENTOS

La Costa de Chiapas, por su ubicación geográfica, y por su orografía peculiar y en particular, las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, son en el país una de las regiones, de las más propensas a la presencia de huracanes y eventos hidrometeorológicos extremos, con un promedio de 25 cada año y de los cuales 16 han sido los de mayor intensidad. Lo anterior, aunado a que, topográficamente, las cuencas costeras del estado son, en su mayoría, pequeñas y medianas, con fuertes pendientes de los cauces y de corto recorrido en sus partes altas, hacen que sus respuestas hidrológicas sean rápidas (Arellano, 2012), lo que significa que los escurrimientos se generan en tiempo y magnitud de manera pronta y cuantiosa, ocasionando deslaves, deslizamientos y erosión de los suelos, así como desastres sobre la infraestructura y la vida de las personas y en sus pertenencias.

Arellano (*op. cit.*), refiere la presencia de 42 eventos meteorológicos extremos, en las cuencas indicadas en los últimos 45 años (de 1964 a 2010), destacando la ocurrencia de las depresiones tropicales Isis y Javier en septiembre 1998, que causaron inundaciones y derrumbes y el ciclón tropical Stan de los días 1 al 5 de octubre de 2005, que ocasionó las mayores inundaciones, derrumbes, y deslizamientos de que se tenga memoria en la región, generando el derrumbe de 93 ríos, desastres en 41 municipios y, un número indeterminado de hogares, más de veinte puentes y otras infraestructuras fueron destruidas por las lluvias extremas.

2.8.2. IMPACTO Y AFECTACIONES DE LOS EVENTOS EXTREMOS

En septiembre de 1998 y en octubre de 2005 las cuencas de la costa de Chiapas resultaron seriamente afectadas por las inundaciones provocadas por el desbordamiento de los ríos que captaron las torrenciales lluvias ocurridas en las partes altas de las cuencas, causando pérdida de vidas humanas y cuantiosos daños materiales. Las inundaciones afectaron tanto a poblaciones urbanas como rurales, y desde luego, a la agricultura y ganadería. Entre los ríos que destacaron por la problemática de inundaciones y arrastre de sedimentos generados se encuentran los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán cuyas desembocaduras tienen lugar entre las Ciudades de Huixtla y Tapachula.

El Río Huixtla, en septiembre de 1998, fue uno de los que ocasionó problemas más serios en la cabecera municipal del mismo nombre, que también fue seriamente afectada con las inundaciones de octubre de 2005 con la presencia del Huracán Stan. Por su parte, el Río Coatán en septiembre de 1998 no ocasionó problemas tan severos como los provocados con las grandes inundaciones de octubre de 2005 y los graves daños en la Ciudad de Tapachula. El Río Huehuetán, que se encuentra entre los Ríos Huixtla y Coatán, no ocasionó grandes daños en ambas contingencias hidrometeorológicas.

Lamentablemente, los problemas ocasionados por los eventos extremos no se limitaron a las inundaciones, sino que también ocasionaron el deslizamiento de tierras en laderas, resultados de la desprovisión de cobertura, de las fuertes pendientes y de la textura de los suelos (Ver imágenes de la figura 2.28); y erosión hídrica en sus diversos tipos, laminar, en cauces y en cárcavas, según se puede apreciar en las imágenes de la figura 2.29, como resultado de las mismas razones y el consecuente arrastre de grandes volúmenes de sedimentos por las torrenciales avenidas, como se puede apreciar en las fotografías de la figura 2.30. En ambas ocasiones, 1998 y 2005, caminos, puentes y bordos de protección contra inundaciones fueron destruidos en la Costa de Chiapas.



Figura 2.28. Generación de erosión por deslizamientos en laderas en las faldas de la Sierra Madre de Chiapas donde las pendientes son mayores al 100 % y la cobertura vegetal se ha reducido al mínimo

A este respecto, Alcalá (1999), opina que las cuencas costeras de Chiapas presentan por sí mismas una "alta susceptibilidad a las inundaciones", misma que en los últimos años ha sido alterada, acrecentándola con el incremento de la deforestación en la Sierra Madre y el cambio de uso del suelo en la planicie costera a sistemas intensivos de producción agropecuaria a través de proyectos regionales de desarrollo como el Programa Hidráulico de la Costa de Chiapas.

Diversos estudiosos de los impactos de fenómenos meteorológicos en Chiapas, entre los que destacan, Cuevas (2006), Ingo e Inbar (2002) y Arellano (2010), coinciden en aseverar que, los desastres causados por ellos en la Costa y Sierra Madre de Chiapas, se deben en primer lugar a las lluvias extraordinarias; en segundo, a la deforestación en la Sierra, lo que favoreció el escurrimiento superficial y el arrastre de sedimentos y; en tercero, al avance de los asentamientos humanos a las llanuras de inundación.



Figura 2.29. Erosión hídrica ocasionada por el ciclón tropical Stan en las cuencas costeras de Chiapas

Los escurrimientos en los ríos que se desbordaron estuvieron muy por arriba del promedio mensual. En el cuadro 2.7 se muestran los valores de precipitación del ciclón

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

tropical Stan registrados en algunas estaciones meteorológicas de la Costa de Chiapas, que muestran que todo el evento con una duración de cuatro días registró una lámina precipitada de entre una cuarta y una quinta parte de la anual. Cuando se trata de enfrentarse a escurrimientos en ríos con grandes avenidas como las ocurridas en 1998 y 2005, es claro que los problemas se agravaron por la poca efectividad de las políticas para regular el uso de los recursos naturales y el desarrollo urbano, así como para impedir la deforestación y la construcción de infraestructura y vivienda en zonas de alto riesgo de inundación. En el cuadro 2.8 se sintetizan las afectaciones de ambos eventos, que muestran la magnitud del desastre.



Figura 2.30. Acarreo y depositación de sedimentos generados por la erosión hídrica y transportados por los escurrimientos en las cuencas costeras de Chiapas

Los daños ocasionados por estos eventos extremos, reportados por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), citado por Arellano (2012) se muestran en el cuadro 2.8; dada su su magnitud y de las condiciones y características de las cuencas de la Costa de Chiapas, es necesario analizar unas y otras y definir las acciones necesarias

para revertir las afectaciones causadas y prevenir que estos vuelvan a ocurrir en lo sucesivo, en caso de la ocurrencia de eventos similares.

Cuadro 2.7. Precipitaciones registradas en estaciones de la zona costera de Chiapas los días de la ocurrencia del huracán Stan en octubre de 2005

ESTACIÓN	03 DE OCT	04 DE OCT	05 DE OCT	06 DE OCT	SUMA
Cacahoatán	190.9	236.3	259.7	121.8	808.7
Pijijiapan	92.6	182.3	457.8	70.0	802.7
Tapachula (Malpaso)	112.5	273.0	253.0	154.5	793.0
Tuxtla Chico (Talismán)	126.1	330.3	199.5	91.8	747.7
Huehuetán	311.0	158.5	113.5	155.0	738.0

Cuadro 2.8. Afectaciones ocasionadas por los eventos extraordinarios de septiembre de 1998 y octubre de 2005 (Fuente: CENAPRED)

CONCEPTO	SEPTIEMBRE DE 1998	OCTUBRE DE 2005
Danmificados (número)	29,000	92,000
Defunciones (número)	229	82
Caminos dañados (kilómetros)	712	630
Puentes colapsados (número)	40	253
Sistemas de agua dañados (número)	22	38
Viviendas dañadas (número)	16,000	45,166
Escuelas dañadas (número)	N.D.	305
Unidades Médicas dañadas (número)	n.d	11
Superficie agrícola dañada (hectáreas)	51,159	307,000
Costo Directo (millones de \$)	630	11,490

Además de las acciones y obras que los gobiernos federal y estatal emprendieron recién acontecidos los eventos, para apoyar a la población y restituirle en lo posible sus pérdidas, reconstruir o rehabilitar la infraestructura afectada y devolver las condiciones mínimas para el desarrollo de sus actividades normales, lo cual implicó fuertes inversiones; en el año 2006, la Comisión Nacional del Agua, con el apoyo de la Universidad Autónoma Chapingo, emprendió la ejecución del proyecto de investigación denominado EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO DE USO DEL SUELO EN LA EROSIÓN HÍDRICA Y EN LAS RELACIONES PRECIPITACIÓN-ESCURRIMIENTO

EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN DEL ESTADO DE CHIAPAS, con el objeto de valorar el impacto de los cambios de cobertura y de uso del suelo en el comportamiento hidrológico y la pérdida de suelo en las cuencas referidas, aplicando técnicas como los modelos HEC-GeoHMS para caracterizar fisiográficamente las cuencas estudiadas a partir de la información topográfica de las mismas, el Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modelling System (HEC-HMS) para modelar las relaciones lluvia-escurrimiento con base en la información de precipitación y cobertura del suelo y el Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para estimar la pérdida de suelo mediante la evaluación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (EUPSM); así como el empleo tecnologías como las imágenes de satélite y software especializados como Arc View e Idrisi para el procesamiento de la información, y la realización trabajo de campo para corroborar información verificable, (CONAGUA y UACH, 2006).

Adicionalmente, en el mismo marco y con base en los resultados del proyecto referido, a partir del año 2008, la CONAGUA y UACH (2008) inició con la implementación de una serie de obras y acciones de conservación de suelo y agua para revertir los efectos de los procesos erosivos e iniciar la rehabilitación hidrológico ambiental de las cuencas referidas. Asimismo, a partir de 2009, se inició con los trabajos de un proyecto de MONITOREO DE LOS PROCESOS HIDROLÓGICOS en estas mismas cuencas con el objeto de medir y monitorear los fenómenos y procesos hidrometeorológicos, que se presenten en ellos, a fin de apoyar en la prevención de los desastres ocasionados por eventos extremos como los narrados arriba (CONAGUA y UACH, 2010).

2.8.3. ESTUDIOS DE EROSIÓN EN CHIAPAS Y ZONAS AFINES

2.8.3.1. Determinación de tasas de erosión

Distintos autores reportados por Figueroa *et al.*, (1991), indican que la erosión en México afecta un mínimo de 45 % del territorio nacional y hasta un 98 % del mismo, teniéndose como un valor promedio permisible de $5 \text{ t x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$, siendo el de $11 \text{ t x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$, la tasa máxima aceptable para el desarrollo del suelo. A este respecto, Lal (1990), citado por Arellano (1994) considera que regiones tropicales como las de Chiapas son particularmente susceptibles a altas tasas de erosión hídrica debido principalmente a los cambios en la cobertura de su vegetación nativa; en estas condiciones, señala la SARH (1992), citada por Arellano (*op. cit.*), el valor medio permisible de pérdida de suelo es de $25 \text{ t x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$.

La importancia de la erosión en el estado de Chiapas se resume en los siguientes datos reportados por Arellano (1994) y obtenidos de estudios realizados aplicando la metodología de FAO de 1954: se tenía de poca a severa erosión dominante en el 36 %; en 1984 se obtuvieron degradaciones de 4,671 y 4,584 $\text{t x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$ para las regiones de Grijalva-Usumacinta y la Costa de Chiapas, respectivamente y se consideraron las más

altas del país. En 1982 se reportó que el 29.91 % del territorio estatal tenía pérdidas de entre 10 y 50 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$, en tanto que en un 8.36 %, las pérdidas oscilan entre 50 y 200 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$; y en 1986, se obtuvo que se perdían 200 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en más de 80 mil ha. Asimismo, Arellano (*op. cit.*) refiere que la erosión hídrica actual para la costa de Chiapas era de 123 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$, siendo el máximo de 2,148 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Estas diferencias son resultado de los distintos supuestos en que se basan las metodologías empleadas, de la falta de información suficiente y confiable y en las diferentes finalidades, enfoques y áreas contempladas.

Lo anterior, sin embargo se refiere a condiciones normales o medias y, por lo tanto difiere enormemente de cuando se presentan eventos extremos de lluvia por ejemplo, que es el principal agente erosivo en el área. En este contexto la ocurrencia del ciclón tropical Stan, cuyo periodo de retorno se estima en más de mil años es, desde luego, el más extremo de los extremos; de ahí que su presencia fue inesperada, sus efectos han sido inestimables, las pérdidas causadas cuantiosos y que sea tan importante su estudio en todas sus fases, aspectos y condiciones.

Por su parte, Baumann (2000), refiere estudios diversos más recientes realizados por la Comisión Nacional del Agua, en los que se reportan valores de más de 300 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en las áreas con fuertes pendientes pero con cubierta vegetal de bosque y hasta 859 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en las planicies sin cobertura vegetal, los cuales, si bien muestran una consistencia con el desarrollo histórico, también deja ver una variabilidad sólo justificable por la falta de información consistente y confiable. Cordero (2008), por su parte, refiere que la denominación SEVERA en el sistema de clasificación de la FAO (correspondiente a entre 50 y 200 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$), presentó una superficie erosionada de 47.97 % del total de la cuenca del Río Huixtla, y un 28.50 % de la superficie presentó más de 200 t/ha año.

Rodríguez (2007), evaluó el efecto del factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, en la estimación de la erosión hídrica en la cuenca del Río Huehuetán, analizando tres escenarios dados por las coberturas de los años de 1972, 1994 y 2005 (posterior a la ocurrencia del ciclón tropical Stan en la zona), obteniendo que para el primer escenario, el porcentaje de superficie afectada con tasas de erosión menores de 200 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ fue de 56.8 %, mientras que en el escenario 3 pasó a ser de 49.21 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ y que, por el contrario, para el escenario 1 el 43.20 % de la superficie de la cuenca resultó afectada para pérdidas mayores de 200 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$; en cambio para el escenario 3 este porcentaje aumentó a 50.79 %, es decir en un 7.59 % pasaron de tener tasas de erosión menores a 200 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ a tener valores mayores de este valor, incluso acentuándose más en los valores extremos mayores a los 1,000 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$. Por su parte, Castillo (2010), avaluó los parámetros hidrológicos de coeficiente de escurrimiento, número de curva, escurrimiento máximo, factor de erosividad de la lluvia en tres microcuencas de la Cuenca Huehuetán, obteniendo valores de 18,929 $\text{MJxmmxha}^{-1}\text{xh}^{-1}\text{año}^{-1}$ para la microcuenca Finca Argovia y de 14,000 $\text{MJxmmxha}^{-1}\text{xh}^{-1}\text{año}^{-1}$ para la finca Dos Hermanos, que dan idea de la alta tasa de erosión que se presenta en esta cuenca. En

concordancia con este trabajo, Arellano (2012), reportó que las mayores tasas de pérdida de suelo por erosión hídrica en la Cuenca Superior del Río Huehuetán, se presentan en promedio en la cuenca alta y media alta, con valores de 50 a 200 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en un 31.67 % de la cuenca, y valores de 200 a 500 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en un 19.62 % de la misma; así que, en un 51.29 % de la cuenca se presentan valores de 50 a 500 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$; un 23.99 % de la superficie presentó pérdidas de suelo menores de 50 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ y un 24.72 % con pérdidas mayores a 500 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

2.8.3.2. Determinación del número de curva y coeficiente de escurrimiento

La CONAGUA y UACH (2006a), discretizaron las superficies de las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán en 53, 37 y 65 subcuencas, respectivamente y definieron los 13 usos de suelo que se muestran en el cuadro 2.9 y que en las texturas de los suelos predominó el contenido de arenas con un promedio de 60.18 % para Huixtla, de 51.52 % para Huehuetán y de 60.61 % para Coatán; definieron pendientes promedio de 40.99 %, 31.43 % y 47.63 %, para las tres cuencas en el orden indicado; con base en ello, determinaron los N_c a partir de las tablas del SCS (N_{c2}), corregido por condición hidrológica (N_{c2s}) y corregido por pendiente (N_{c3s}) para cada subcuenca, cuyos valores promedio se presentan en el cuadro 2.10. En el mismo cuadro, se anotan los valores correspondientes para las subcuencas Belisario Domínguez y Estación Huixtla, en las que se ubican las Nanocuencas Finca Brasil y Nueva Rosita, respectivamente, cuyos N_c se analizan en el presente trabajo.

Cuadro 2.9. Usos de suelos definidos por CONAGUA y UACH (2006), para las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán para su condición en 2005

ID	CLAVE	DESCRIPCIÓN
1	BP	Bosque de pino
2	BPQ	Bosque de pino-encino
3	BQP	Bosque de encino-pino
4	SMSC/VS	Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria
5	SMSC/CP	Selva mediana subcaducifolia con cultivos permanentes
6	SBC/VS	Selva baja caducifolia con vegetación secundaria
7	PAST-RAS	Pastizal rasante
8	S-DESN	Suelos desnudos
9	UA-SDESC	Suelos en descanso con alguna cobertura
10	UA-CP	Uso agrícola- cultivos permanentes (mango, caña café)
11	AUyPOB	Áreas urbanas y pobladas
12	VC	Vías de comunicación
13	C_AGUA	Corrientes y cuerpos de agua

Los valores obtenidos, indican que las cuencas son altamente impermeables o que implican grandes magnitudes de escurrimiento, definido ampliamente por la disminuida cobertura vegetal, los altos montos de precipitación y sus fuertes pendientes, no obstante la textura arenosa de los suelos, que debería implicar alta conductividad hidráulica; ello es completamente evidente, al considerar los valores del Nc_2 , que en promedio es 23 puntos menor que el del Nc_{3s} que incluye las correcciones por humedad antecedente y por pendiente.

Cuadro 2.10. Valores promedio de número de curva definidos por CONAGUA y UACH (2006), para las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán

CUENCA	Nc_2	Nc_{2s}	Nc_{3s}
Huixtla	64	70	91
Huehuetán	63	69	84
Coatán	73	78	95
PROMEDIOS	67	72	90
SUBCUENCAS DE HUIXTLA			
Belisario Domínguez	63	69	92
Estación Huixtla	72	77	95

Campos (2011), identificó el Nc para 7 subcuencas de la Región Hidrológica núm. 30 Parcial (Alto Río Grijalba) en el estado de Chiapas, partiendo de su área, su tiempo de concentración y las estimaciones de su gasto máximo asociado a seis periodos de retorno, y adoptando en todos los casos un suelo tipo B; los resultados globales indicaron que este parámetro tiene un valor representativo que oscila entre 70 y 80, con su valor medio de 76; concluyendo que en general, el procedimiento de calibración descrito es aplicable en toda cuenca rural aforada que incluya estaciones pluviométricas dentro de ella, o como mínimo en su estación hidrométrica; y recomendando utilizarlo en otro tipo de zonas geográficas del país, para contar con un indicador del orden de magnitud global del número Nc , como el encontrado en la zona estudiada.

Partiendo de la ecuación general del SCS, Castillo (2010) propuso una ecuación cuadrática para la estimación del parámetro de retención Sr y al considerar las dos raíces de su solución, calcula los valores de Nc y la aplica a datos de 2009 obtenidos en la estación de la Finca Argovia de la cuenca media del Río Huehuetán, obteniendo los siguientes valores: Nc_1 con un valor máximo de 90, un mínimo de 22 y un promedio de 63; para Nc_2 de 98, 56 y 72 para el máximo, mínimo y promedio, respectivamente; por lo que, desechando los extremos de 22 y 98 por estar fuera de los valores tabulados propuestos por el SCS, adopta como bueno el valor medio de $Nc_2 = a 72$ que

corresponde a una condición de bosque natural con cobertura normal y evapotranspiración media para condiciones hidrológicas de suelo entre C y D.

Arellano (2012) calibró el N_c para las nanocuencas Finca Argovia, Gibraltar y Dos Hermanos, ubicadas en la Cuenca Alta del Río Huehuetán, Chiapas, analizando 94, 37 y 65 datos de lluvia y escurrimiento para las tres nanocuencas, respectivamente. El procedimiento para la calibración consistió en el cálculo del tiempo de concentración con la fórmula de Kirpich (2.20) a partir la información topográfica; la lámina infiltrada la estimó como la diferencia entre la lámina precipitada y la escurrida medidas en estaciones de monitoreo; el grupo hidrológico se determinó a partir del análisis de los suelos y de pruebas de infiltración efectuadas en campo que permitieron valorar sus conductividad hidráulica; la retención máxima potencial se calculó con la expresión 2.56; y el valor del N_c se determinó con la expresión 2.30; los resultados máximo, medio y mínimo para el N_c y para las tres nanocuencas, son los que se muestran en el cuadro 2.11.

Cuadro 2.11. Valores promedio de número de curva obtenidos por Arellano (2012) para tres nanocuencas de la Cuenca Alta del Río Huehuetán Chiapas

NANOCUENCA	COBERTURA VEGETAL	VALORES DE N_c			Ajustado
		Máximo	Medio	Mínimo	
Finca Argovia	Café de sombra	99.82	82.68	58.15	63
Cantón Gibraltar	Acahual	99.94	83.40	30.30	46
Rancho Dos Hermanos	Agroforestal	99.23	88.04	64.78	77
PROMEDIOS		99.66	84.71	51.08	51

Para completar su análisis, Arellano (*op. cit.*), ajustó los valores obtenidos mediante regresiones del tipo $N_c = f(Pr)$, con Pr el valor de la precipitación de eventos extremos, obteniendo los valores que se listan en la última columna del cuadro 2.18 asociados a las coberturas vegetales listadas en la segunda columna del mismo y que corresponden, en las tablas del SCS reportados por Campos (2010) como sigue: a) el $N_c = 63$ a un bosque espeso con evapotranspiración para condiciones hidrológicas de suelo entre C y D, muy representativas de los bosques de café propios de la Cuenca del Río Cuilco en el Soconusco de Chiapas; b) el valor de $N_c = 46$ para acahual, correspondió a un bosque ralo con baja evapotranspiración para una condición hidrológica de suelo A, que en cierto modo representa la cobertura resultante de la composición vegetal y suelo de acahual o cafetal en transición a sistema agroforestal de la Nanocuenca del Cantón de Gibraltar; y c) el valor de $N_c = 77$ corresponde a un bosque natural ralo con baja evapotranspiración para una condición de suelo entre B (con $N_c = 73$) y C ($N_c = 82$).

Con los resultados obtenidos de *Nc*, Arellano (2012) también estimó los valores del coeficiente de escurrimiento *Ce*, obteniendo 34.84 %, 16.86% y 56.79 %, para las nanocuenas Finca Argovia, Gibraltar y Dos Hermanos, respectivamente, que se observan muy disímolos, en particular, pues el correspondiente a Gibraltar es muy bajo para las condiciones prevalecientes y el de Dos Hermanos es, por el contrario muy alto, no sólo con respecto al primero, sino *per se*, ya que valores de *Ce* de este orden son extraordinarios e inesperados.

También para la Costa de Chiapas, Campos (2010), estimó valores de *Nc* para las cuencas de los Ríos Despoblado y Coatán, a partir de los datos de lluvia máxima en 24 h ajustados a periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 50 y 100 años y haciendo ajustes mediante la aplicación los métodos hidrológicos de TR-55, de Chow y el del Hidrograma Triangula Unitario; los valores promedio obtenidos fueron de 64 para la Cuenca del Río Despoblado que corresponde con cobertura de bosque espeso con alta transpiración y grupo hidrológico entre C ($Nc=62$) y D ($Nc=69$) del SCS y, de 58 para la del Río Coatán, que corresponde con bosque muy espeso con alta transpiración y grupo hidrológico entre C ($Nc=54$) y D ($Nc=61$) del SCS.

En condiciones similares, Ramsankaran *et al.* (2009), determinaron valores promedio de *Nc* de 51.86 a 55.34 para los eventos extremos del monzón de 2005 en la cuenca Patri Rao (de 25 km² de extensión) en los Himalaya de la India, que presenta bosques secos desiduos y que según Arellano (2012), corresponderían a cobertura de acahual en la Cuenca Alta del Río Huehuetán de Chiapas, y precipitaciones con periodos de retorno de entre 2 (123.38 mm) y 5 años (186.84 mm).

Por su parte, Calvo *et al.*, (2005), calibraron el *Nc* para la cuenca del Río Chagres en Panamá, siguiendo el procedimiento propuesto por Hawkins (1993) obteniendo un valor de 75 que corresponde en la tabla 2.6 del SCS, a condición de bosque natural con cobertura normal y transpiración media con condiciones hidrológicas de suelo entre C y D y lo recomiendan aplicar para la temporada más húmeda de la región.

3. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

3.1. OBJETIVO PRINCIPAL

Analizar los procesos de erosión hídrica en las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán de la región hidrológica de la Costa de Chiapas, México, a partir de la valoración del escurrimiento como agente erosivo y de la tasa de erosión en diversos escenarios, derivados de la ocurrencia del ciclón tropical Stan, con el propósito de servir de base para el planteamiento de estrategias para su restauración hidrológico-ambiental.

3.2. OBJETIVOS PARTICULARES

- Estimar la tasa de erosión hídrica provocada por el ciclón tropical Stán en las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán de la Costa de Chiapas, evaluando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (EUPS) mediante la técnica de álgebra de mapas (TAM).
- Determinar y ajustar el número de curva y el coeficiente de escurrimiento, para la Cuenca del Río Huixtla de la Costa de Chiapas a partir de datos de precipitación y escurrimiento medidos en campo en nanocuencas de monitoreo, haciendo el ajuste por humedad antecedente aplicando varias expresiones citadas por la literatura y revisando la aplicación de la corrección por pendiente.
- Precisar una metodología para el cálculo del escurrimiento en áreas con altos valores de precipitación y de pendiente, a través de su aplicación para la Cuenca del Río Huixtla de la Costa de Chiapas, empleando una combinación de las técnicas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), Álgebra de Mapas (TAM) y Números de Base 10, así como los métodos distribuido y agregados para la determinación del número de curva.
- A partir de los resultados obtenidos y las conclusiones generadas, derivar recomendaciones que como estrategias se puedan aplicar para la restauración hidrológico-ambiental de las cuencas de estudio y para

profundizar o precisar en estudios que permitan afinar las metodologías y conceptualizaciones propuestas y aplicadas en el trabajo desarrollado.

3.3. HIPÓTESIS

Es posible aplicar los conceptos y metodologías para para estimar el escurrimiento en cuencas basada en el Número de Curva (Nc), desarrolladas para condiciones de baja precipitación (menores de 2,150 mm) y pendientes suaves (menores de 5 %), y para determinar la tasa de erosión mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo a las condiciones de cuencas como las costeras de Chiapas, con valores de precipitación anual que superan los 5,000 mm y pendientes mayores de 100 %, mediante su calibración, ajuste o adecuación y aplicando técnicas como los sistemas de información geográfica y de álgebra de mapas, para sistematizar, agilizar y facilitar los cálculos y hacer más congruentes los resultados con los fundamentos teóricos de los conceptos aplicables.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrollaron tres estudios; el primero denominado ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA PROVOCADA POR EL HURACÁN STÁN EN LAS CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS, MÉXICO, se desarrolló en la parte alta y media de las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán; el segundo, titulado AJUSTE DEL NÚMERO DE CURVA PARA TRES NANOCUENCAS INSTRUMENTADAS EN LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA, CHIAPAS, MÉXICO, se desarrolló para las nanocuencas Rosita, Finca Brasil, Hannover y Berriozábal ubicadas en la parte alta de la Cuenca del Río Huixtla; y el tercero, que se llamó DETERMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO EN LA CUENCA HUIXTLA, CHIAPAS, POR EL MÉTODO DE N_c Y USANDO SIG, TAM Y NB_{10} se realizó para 53 subcuencas en las que se dividió la parte media y alta de la Cuenca del Río Huixtla. Las áreas de trabajo para los tres estudios, se describen y caracterizan en este capítulo, en el que además se precisa en los materiales, metodologías y fuentes de información empleados y seguidos para el desarrollo de las tres partes. Para cada uno de los estudios desarrollados se generó un artículo científico, cuyo contenido se expone en el capítulo 5.

4.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DEL ZONA DE ESTUDIO

4.1.1. DEFINICIÓN Y LOCALIZACIÓN

Las Cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán (para fines de abreviar la nomenclatura, en lo sucesivo se hace referencia a las cuencas como Huixtla, Huehuetán y Coatán) se localizan en la región del Soconusco de Chiapas en la frontera con la República de Guatemala, sus corrientes principales son los ríos que llevan los mismos nombres, y se enmarcan en el rectángulo imaginario definido por las coordenadas $15^{\circ} 23' 10''$ de latitud norte y $92^{\circ} 39' 40''$ de longitud oeste para el vértice superior izquierdo y $14^{\circ} 45' 10''$ de latitud norte y $91^{\circ} 56' 55''$ de longitud oeste, para el vértice inferior derecho.

El grupo de las tres cuencas, limita y se define al norte con la Sierra Madre de Chiapas, y en el caso de la Cuenca Coatán para este trabajo con la línea de frontera entre México y Guatemala; al oriente con la cuenca del Río Cahucán; al sur con el Océano Pacífico; y al poniente, con la cuenca del Río Despoblado, tal como se muestra en el plano 1 DE 11 LOCALIZACIÓN DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN, EN LA COSTA DE CHIAPAS. En los tres casos, sin embargo, por la finalidad de los trabajos, en **la parte de estudio de las cuencas, no se consideró la zona de la planicie**, sino que

se definieron como puntos de inicio justamente donde ingresan a ésta, particularmente donde se tiene instalada una estación hidrométrica en caso de las Cuencas Huixtla y Huehuetán; mismas que se precisan en el tema 4.1.2.4. Hidrología.

Territorial y políticamente la cuenca Huixtla se ubica en los municipios de Huixtla, Tuzantán y Motozintla; la cuenca Huehuetán en los municipios de Huehuetán, Tapachula, Mazatán y Motozintla y la cuenca Coatán en los municipios de Cacahoatán, Tapachula y Mazatán (ver figura 4.1). Administrativamente las cuencas se ubican fundamentalmente en la Región Económica VIII Soconusco y en el límite sur de la Región VII La Sierra, como se muestra también en la figura 4.2. (INEGI, 2002).

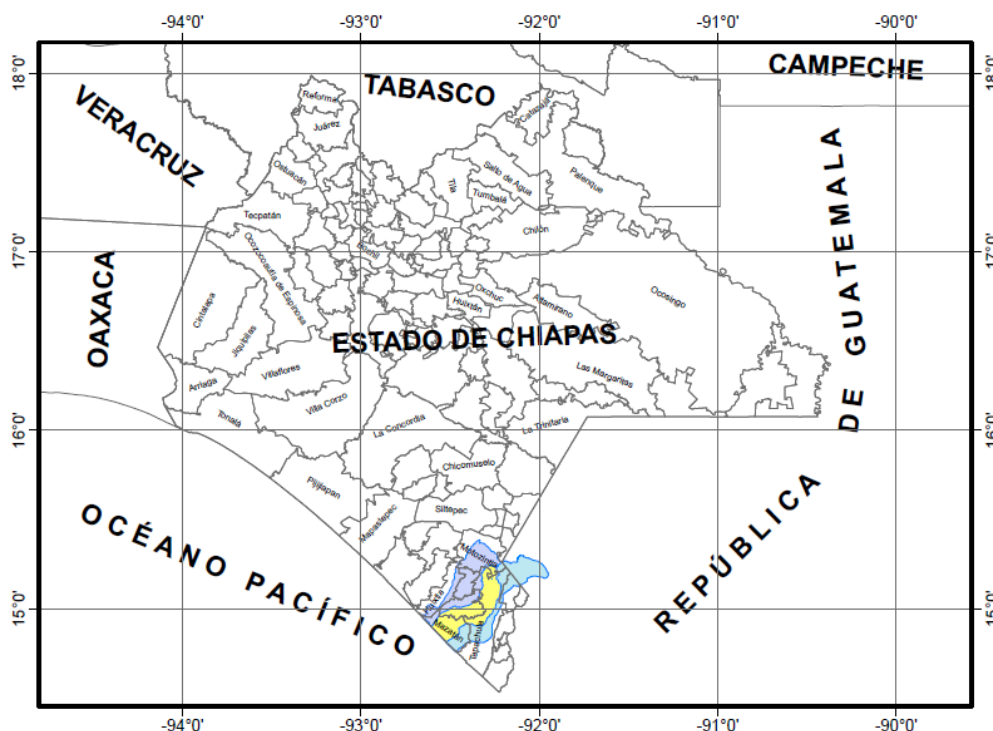


Figura 4.1. Localización de las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán en el estado de Chiapas

4.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN

4.1.2.1. Caracterización general de la Región Soconusco

Por su ubicación estratégica, la región Soconusco, en cuyo extremo sureste se ubican las cuencas de estudio, tiene una importancia comercial preponderante en el estado de Chiapas y concentra las principales vías de comunicación que son paso obligado hacia los países de Centroamérica a través de la carretera panamericana. **Tapachula constituye un polo de desarrollo económico y el mercado más importante para las**

4. MATERIALES Y MÉTODOS

regiones del Soconusco, Istmo-Costa, Sierra y Guatemala. Esta región está conformada por 16 municipios, que ocupan en conjunto un espacio de 5,475 kilómetros cuadrados, equivalente al 7.2% del territorio estatal de Chiapas. Es una de las regiones mejor comunicadas del estado, ya que cuenta con la carretera de cuatro carriles Arriaga-Tapachula y la línea de ferrocarril panamericano que recorre la Costa y el Soconusco hasta la Ciudad de Hidalgo, que es la frontera con la República de Guatemala.

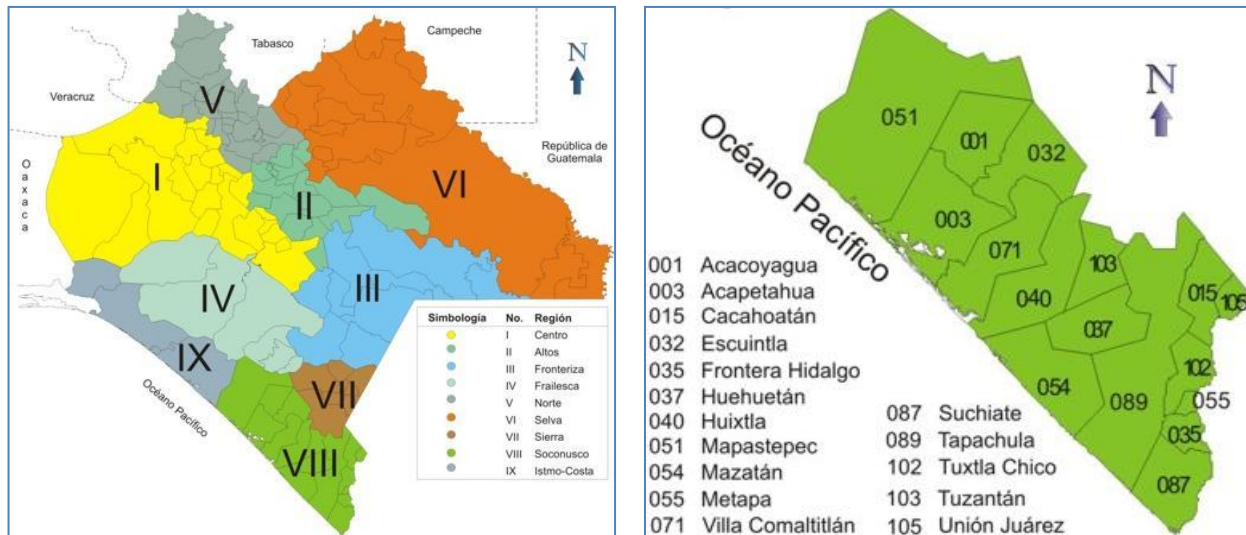


Figura 4.2. Localización de las cuencas de trabajo en la división administrativa del estado de Chiapas

El Soconusco es una región sobreexplotada en sus recursos naturales, con un fuerte deterioro ecológico, por lo que las lluvias han disminuido y la producción agrícola de temporal es menos productiva. Se tienen zonas con problemas de erosión y de contaminación por productos agroquímicos que son arrastrados hacia el litoral y el flujo de los ríos de aguas negras que tienen su origen en las principales cabeceras municipales.

La actividad económica en la región del Soconusco depende en gran medida de las actividades agropecuarias ya que la población que labora en el sector primario rebasa el 50 %. El café, el plátano y el mango representan más del 80 % de la producción agrícola total. Las áreas de cultivo del café y maíz representan 37 y 25 % del total, respectivamente; esto es, en forma conjunta representan el 62 % del total del área cultivada; le siguen las de mango, cacao y ajonjolí. La soya es el cultivo que más ha reducido su superficie de producción; los cultivos que presentan mayor fluctuación en su área de producción son los de maíz, frijol, arroz y melón. Recientemente se han introducido **nuevos cultivos** que están teniendo mucho auge y aceptación no sólo en

las áreas productivas, sino en el mercado, tales **como: maracuyá, palma de aceite y rambután**, que, por lo tanto están desplazando rápidamente a los cultivos tradicionales de maíz, mango y caña de azúcar.

4.1.2.2. Delimitación de las cuencas de estudio

Las superficies de **las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán** definidas desde sus orígenes en el parteaguas de la Sierra Madre de Chiapas y hasta las desembocadura de sus corrientes principales que llevan los mismos nombres y mostradas en la figura 4.3 sobre un recorte de una imagen de satélite, cortesía del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y el PLANO 1 DE 28 LOCALIZACIÓN DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN EN LA COSTA DE CHIAPAS, **tienen las áreas totales de 799.85, 726.93 y 739.56 km², respectivamente.**



Figura 4.3. Definición de las cuencas completas Huixtla, Huehuetán y Coatán completas sobre un recorte de imagen satelital SPOT

Considerando que la parte de la planicie de todas ellas no se presentan las etapas de los procesos erosivos, que se planteó analizar en el presente estudio, sólo se consideraron las áreas que la CONAGUA y UACH (2006), definieron para su **Evaluación de los efectos del cambio de cobertura y de uso del suelo en la erosión hídrica y las relaciones precipitación-escurrimiento** y que se definieron como se describe

enseguida y se muestra en el PLANO 2 DE 28 DELIMITACIÓN DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO, en el que se muestran los límites individuales y de conjunto de las tres cuencas, así como sus superficies:

- a) Para la Cuenca Huixtla el punto de **cruce del Río Huixtla con la Carretera Costera**, inmediatamente aguas arriba de la Ciudad de Huixtla, que se ilustra en la figura 4.4 y que tiene las coordenadas geográficas $15^{\circ} 09' 11''$ de latitud norte y $92^{\circ} 27' 11''$ de longitud oeste.
- b) Para la Cuenca Huehuetán, el punto para su definición lo constituyó el **cruce del Río Huehuetán y la carretera costera**, donde se ubica la estación hidrométrica Huehuetán, cuyas coordenadas geográficas son $15^{\circ} 00' 05''$ de latitud norte y $92^{\circ} 24' 02''$ de longitud oeste; dicho punto se muestra en las figura 4.5.



Figura 4.4. Punto de definición de la Cuenca Huixtla en el cruce del Río Huixtla y la carretera Costera



Figura 4.5. Punto de definición de la Cuenca Huehuetán en el cruce del Río Huehuetán y la carretera Costera

- c) Y para la Cuenca Coatán, el punto de inicio se definió en el **punto de la carretera costera con el Río Coatán** (ver figura 4.6), a la entrada de la Ciudad de Tapachula, y que se ubica en las coordenadas $14^{\circ} 55' 12.3''$ de latitud norte y $92^{\circ} 16' 03.8''$ de longitud oeste.

Así, en todo el documento, cuando se hace referencia a las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, se hace referencias a estas definiciones.

4.1.2.3. Clima

La SRH (1970), citada por Rivera (2007), indica que, de acuerdo con la clasificación de Thornthwaite, son dos los climas típicos dominantes dentro de la región hidrológica 23, donde se encuentran las cuencas de estudio; hacia la zona del Suchiate, Tapachula, Huixtla y Escuintla, existe un núcleo bien definido de clima muy húmedo, sin estación seca bien definida, mientras que el resto de la región tiene un clima cálido con estación invernal bien definida.



Figura 4.6. Punto de definición de la Cuenca Coatán en el puente de cruce del Río Coatán y la carretera costera a la entrada de la Ciudad de Tapachula

Por otra parte, atendiendo al sistema de clasificación de Köppen, modificada por García (1988), en la zona se presentan dos grupos de climas; el **A** que predomina en las partes bajas, que abarca los cálidos húmedos, con temperatura media del mes más frío mayor de 18°C y el **C** que corresponde a los templados húmedos, se presenta en las partes altas con temperatura anual del mes más frío de entre -3 y 18°C . Más expresamente, recorriendo el área de la colindancia con el mar hacia la Sierra Madre de Chiapas, se tiene en una pequeña porción el clima Aw1 cálido subhúmedo con lluvias en verano, intermedio de los subhúmedos; en la parte de planicie, predomina el clima Aw2 cálido

4. MATERIALES Y MÉTODOS

subhúmedo con lluvias en verano, el más húmedo de los subhúmedos; en prácticamente toda la parte media de las cuencas, el clima es Am cálido húmedo con lluvias en verano; en la mayor parte de las cuencas altas el clima es (A)C(m) semicálido subhúmedo con influencia de monzón; y, en las partes más altas, prácticamente en el parteaguas de las cuencas, el clima es C(m) templado húmedo con influencia de monzón (Juárez, 2007 y López, 2012).

La variabilidad altitudinal de la zona de estudio, implica también una variación climática que va de una condición fría de montaña en la zona de la Sierra Madre de Chiapas (la franja de los 3,000 a 1,800 msnm), **a cálido húmedo y cálido subhúmedo en la franja costera** cuyo ancho es del orden de 25 km y de la cota 40 msnm a la orilla del mar, pasando por templado húmedo y semicálido subhúmedo en las faldas de la sierra que se localiza entre las dos franjas anteriores, con un ancho (visto en planta) de alrededor de 20 km, que se caracteriza por la localización de las fincas cafetaleras.

En la franja de la sierra representada por la zona de Tacaná-Unión Juárez de Cacahoatán, la temperatura es menor de los 20 °C y la precipitación es del orden de 3,359 mm anuales, con un promedio de 183 días de lluvia al año; en la franja intermedia, que corresponde a la parte medular de la zona cafetalera, se presentan temperaturas que varían de 29 a 32 °C y la precipitación llega a valores de 4,963 mm anuales, con un promedio de 208 días de lluvia al año; en tanto que, en la franja costera, caracterizada por la Ciudad de Tapachula, la temperatura varía de 32 a 39 °C y la precipitación es de 2,433 mm anuales, con un promedio de 178 días de lluvia.

4.1.2.4. Hidrología

Hidrológicamente las cuencas de estudio se ubican en la Región Hidrológica 23 Costa de Chiapas, sobre la vertiente de una faja alargada y de anchura variable orientada de SE a NW, que tiene cuatro subcuencas, en dos de las cuales se localiza la zona de estudio: del Río Suchiate y otros y la del Río Huixtla y Otros, según se muestra en la figura 4.7; las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, tienen por corrientes principales, los ríos que les dan nombre y se conducen desde sus orígenes en el parteaguas continental definido por las cotas más elevadas de la Sierra Madre de Chiapas hacia el suroeste hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, siguiendo su trayectoria más corta.

En concordancia con esto, Arellano (2012), describe las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, indicando que tienen su origen en las estribaciones de la Vertiente del Pacífico de la Sierra Madre de Chiapas y descargan sus aguas al Océano Pacífico a través de un complejo urdimbre fluvial que forma la interfase de la planicie costera, el gran humedal del Hueyate, los canales de los manglares y las boca-barras de San José y San Simón.

De acuerdo con SRH (1970) y Arellano (1999), la red hidrológica la completan una serie amplia de corrientes que a manera de esqueleto de pescado, tienen su origen en caídas de agua y pendientes muy escarpadas, descienden de las partes altas en ambas márgenes y que posteriormente, al aumentar su número de orden, forman una red de drenaje que descargan en el cauce principal, que le da nombre en cada caso a las respectivas cuencas.

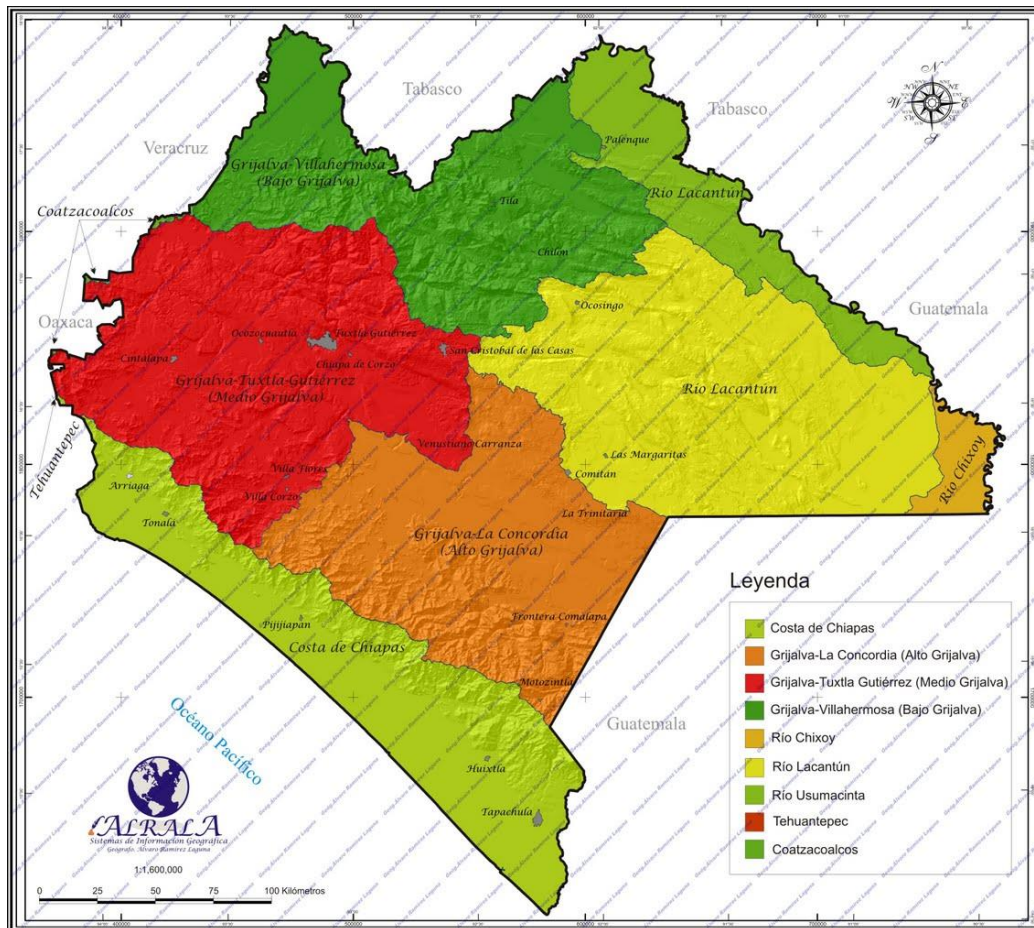


Figura 4.7. Localización de la región hidrológica 23 Costa de Chiapas donde se ubican las cuencas de estudio

Aunque con formas algo diferentes, definidas por la topografía y fisiografía específicas para cada una, **todas las cuencas que conforman la costa chiapaneca, son de forma alargada y con sus corrientes principales corriendo prácticamente paralelas, desde su origen hasta su desembocadura**; en su parte accidentada, todas las cuencas tienen cauces accidentados en su trayecto y con fuertes pendientes, que aunado a las intensas precipitaciones que se presentan, se conjugan para conducir grandes flujos y fuertes velocidades que sobrepasan los 10 m/s, que originan el arrastre no sólo de sedimentos

4. MATERIALES Y MÉTODOS

sino de grandes rocas y material vegetal que erosiona los suelos y ocasiona importantes destrozos en las partes bajas, no solo al arrastrar los materiales presentes, sino al invadir las zonas productivas, como se puede apreciar en las imágenes de la figura 4.8 y en el cuadro 4.1, en el que se exponen los datos de gastos estimados por CONAGUA Y UACH (2006) para distintos periodos de retorno analizados. En esta zona, se le incorporan al cauce principal, como bien lo refiere Arellano (2012), un gran número de las corrientes tributarias que en conjunto dan la impresión de un esqueleto de pescado.



a) Partes altas del Río Huixtla

b) Partes altas del Río Huehuetán



c) Río Coatán al inicio de la planicie

d) Características del flujo en la parte alta

Figura 4.8. Condiciones prevalecientes en las partes altas de los cauces de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán que implican flujos torrenciales y grandes velocidades

En la zona de la planicie, por el contrario, las corrientes son prácticamente rectas, con pendientes muy suaves y prácticamente nulos materiales u obstáculos que limiten los escurrimientos, que implican mínimos coeficientes de rugosidad de entre 0.020 y 0.025 que corresponden a cauces planos, arenosos y vegetación herbácea, y la presencia de escurrimientos propiamente tranquilos y uniformes que propician la sedimentación de las partículas arrastradas de las partes altas y las inundaciones de estas áreas, como se puede apreciar en las imágenes de la figura 4.9. Esta condición

prevalece para los tres casos, desde el cruce de los cauces con la carretera costera y extendiéndose a medida que se acercan a las barras mediante las cuales se incorporan al Océano Pacífico.

Cuadro 4.1. Gastos máximos estimados para los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán para los periodos de retorno (PR) analizados (m³/s)

PR (años)	RÍO HUIXTLA	RÍO HUEHUETÁN	RÍO COATÁN
2	266	395	324
5	409	533	623
10	491	623	834
20	564	709	1,039
50	650	820	1,303
100	710	904	1,500
200	767	988	1,696
500	839	1,100	1,951
Medio	279	421	407
Ciclón Stan	2,147	2,544	2,802

En referencia a la Cuenca Huixtla en particular, ésta tiene una forma que se puede asemejar a la de un basto, cuyo cuerpo amplio corresponde a la zona de sierra y el mango, de tamaño corto, corresponde a la parte de la planicie. El Río Huixtla inicia en su extremo poniente con el arroyo concepción; en el centro con el arroyo Agua Fría al que se le une el Ojo de Agua, que se incorporan al Concepción aguas arriba del Pueblo de Belisario Domínguez tomando el nombre de Río Tolimán; y en el extremo oriente, donde colinda con la Cuenca Coatán nace con el arroyo Checuté que corre hacia el poniente, en cuyo recorrido se le suman diversos arroyos por su margen derecha y adoptando el nombre de Río Etzumú, hasta unirse con el Río Tolimán **aguas abajo del Pueblo de Belisario Domínguez, a partir de donde adopta el nombre de Río Huixtla**. A partir de este sitio se le unen diversas corrientes menores, en un recorrido de unos 11 km, donde se le incorpora por su margen derecha el Río Pedregoso y luego, unos 2.5 km más abajo el Río El Cangrejero, por la misma margen y que baja prácticamente paralelo a aquél desde la sierra oriente de la cuenca; por último, en la parte de la cuenca estudiada y apenas un km aguas abajo, ingresa al Río Huixtla por su margen izquierda, el Río negro que tiene su origen en la población de Bremen, y pasa por el sitio el Cantón de Agua Prieta. Otras corrientes que se incorporan también por su margen izquierda, como el Río Tepuzapa, el Islamapa, el Chamulapa y el Cuyamiapa, lo hacen aproximadamente 10 km aguas abajo de la Ciudad de Huixtla.

La cuenca Huehuetán por su parte, para describir su forma, se puede comparar con un plátano doblado a la izquierda, pues tiene prácticamente el mismo ancho, de alrededor

de 11 km en toda su longitud; pero su corriente principal, el Río Huehuetán se conduce en su extremo derecho, en su mayor longitud, teniendo todos sus afluentes por su margen izquierda. Según Arellano (2012), **el Río Huehuetán, nace al unirse los Ríos Cuilco y el Río Londres, inmediatamente aguas abajo de la Finca Argovia**; el primero inicia en la parte alta de la Sierra Madre de Chiapas con los tributarios que tienen su origen en la cañada localizada entre las inmediaciones de los poblados serranos de Niquivil (a 2,725 msnm), Zaragoza (2,650 msnm) y Santa Ana Pinabete (2,470 msnm) en su margen izquierda y el cerro denominado "Cabeza del Cuilco" (2,500 msnm) en su margen derecha, cerca del poblado de Chicuté. En su margen izquierda, el Río Cuilco inicia con los tributarios del Río Zajú provenientes de la cañada formada por la parte alta de la Sierra Madre (en las inmediaciones de Pinabete), la vertiente del cerro Chimborazo formada por la cima de Toquián Grande (2,700 msnm) y la cima de Sandino antiguamente denominado Cerro Xukumutz (2,400 msnm) y, la cima Miramar del cerro Naranjo (2,400 msnm).



a) Flujo tranquilo en el Río Huixtla



b) El Río Huehuetán en la planicie



c) Flujo tranquilo en el Río Coatán



d) Flujo en la planicie del Río Coatán

Figura 4.9. Condiciones prevalecientes en las partes bajas de los cauces de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán que implican flujos tranquilos y sedimentación

El Río Londres tiene su origen en la vertiente interior del Cerro Chimborazo a 2,480

msnm; fluye a través de la otrora Finca Londres (1,895 msnm), al ejido ampliación Toquián Chiquito (805 msnm), a Finca Violetas y Ejido Mexiquito (740 msnm) para finalmente conjuntar sus aguas con el Río Cuilco a 620 msnm; después de su paso por Finca Argovia y de recibir las aguas del río Zapote-Argovia, el Río Cuilco es denominado por ya de manera definitiva como Río Huehuetán, que más abajo cruza el puente de la carretera de Nueva Alemania (otrora Finca Eduviges) y Finca Hamburgo.

La red hidrológica de la cuenca la completan los tributarios que en ese orden se incorporan al cauce principal, el Río Nexapa, y las corrientes Santo Domingo, la Joya, Río Escocia, Tepacalapa, Chalón, Chalito y el Caracol (Rodríguez, 2007).

Y, para el caso de la Cuenca Coatán, su forma es difícil de encontrarle semejanza; pero se puede decir que inicia con una parte amplia que alcanza un ancho de unos 15 km, en una longitud de alrededor de 30 km, para luego continuar con un estrechamiento importante pues se reduce el ancho de la cuenca a unos 3.0 km en promedio y por una longitud de aproximadamente 25 km hasta entrar en las orillas de la Ciudad de Tapachula; termina con una nueva ampliación a unos 8 km en promedio hasta desembocar en el Océano Pacífico. Su corriente principal, es **el Río Coatán, que nace ya con ese nombre en la región noroccidental del Volcán Tacaná, en Guatemala**, corriendo aproximadamente la mitad de su trayecto por ese país, en dirección poniente y la otra mitad hacia el suroeste; cruza la línea fronteriza con México y a partir de ahí corre en dirección prácticamente en línea recta y hacia el sur con ligera orientación al suroeste; apenas unos dos km de su cruce por la frontera se le une por su margen derecha el Río Salitre que nace en los límites de la cuenca con la Cuenca Huixtla y se acerca con dirección sureste, y luego, otros dos km más abajo, se le incorpora por su margen izquierda el Río Icul; en su recorrido hacia la Ciudad de Tapachula, aproximadamente a un tercio de esa longitud de alrededor de 30 km, ya sólo se le incorpora por su margen derecha como corriente de importancia, el Río Buenavista; y ya aguas abajo de la Ciudad de Tapachula, se le incorporan, ambos por la margen izquierda, los ríos Madronal aproximadamente 12 km de ésta y la Latas apenas 1 km antes de su franca descarga al Océano Pacífico.

La descripción de la red hidrológica de las tres cuencas de estudio, recién hecha, se muestra de manera general para el área de estudio, registrando las principales corrientes referidas en el PLANO 3 DE 28 HIDROLOGÍA DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN, EN LA COSTA DE CHIAPAS.

4.1.2.5. Fisiografía

De acuerdo a la clasificación fisiográfica de INEGI (2002), **las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, en su parte alta corresponden a la Subprovincia Volcanes** de Centroamérica y en la parte baja, a la denominada Discontinuidad de la Llanura Costera de Chiapas y Guatemala; en la primera **se manifiestan procesos erosivos muy**

intensos asociados a la inestabilidad de masas de suelo y rocas, en tanto que en la segunda, se presentan procesos muy significativos de acumulación de material pétreo por acarreo fluvial (CONAGUA y UNACH, 2003).

En Chiapas, la Planicie Costera del Pacífico, tiene una longitud de 280 kilómetros, se extiende de noroeste a sureste con un ancho de entre 15 a 35 kilómetros; limita con la Sierra Madre en promedio a 35 msnm con una pendiente promedio de 1 metro por kilómetro. Por otra parte, la Sierra Madre de Chiapas corre cuasi-paralela a la Planicie Costera y en la misma dirección con un ancho de entre 50 y 65 kilómetros y una elevación promedio, sin considerar el volcán Tacaná, de 3,000 msnm.

La región montañosa está afectada por fallas y fracturas que dan lugar a **la formación de grandes cañadas de paredes muy a menudo casi verticales**, que originan una morfología muy abrupta y que da lugar, por una parte, a que en la cuenca vertiente se presenten ríos con régimen torrencial y en la planicie costera o llanura de inundación, ocurran desbordamientos frecuentes en los cauces principales y la formación de planicies de inundación, así como la descarga de sedimentos de grano fino en los sistemas lagunarios y la desembocadura de los ríos en los humedales y boca-barras.

Como consecuencia, **la Planicie Costera muestra los depósitos aluviales recientes de arcilla, arena y guijarros, que descargan los ríos según su gradiente granulométrico en dirección al mar, la cual disminuye significativamente desde el pie de la Sierra Madre hacia el mar**; mientras al pie de la Sierra Madre en los conos de grava se encuentran guijarros, la Planicie Costera está formada de sedimentos de arenas y arcillas de grado más fino según su gradiente de depositación hacia el mar. Las imágenes de la figura 4.10, ilustran las condiciones fisiográficas que prevalecen en las cuencas de estudio.

Arellano (2012), menciona a este respecto que en su descarga, el Río Huehuetán aún no se ha desarrollado un abanico aluvial, por lo que sus aguas descargan en la planicie de inundación del humedal del Hueyate; en contraste, el Río Coatán forma un amplio abanico aluvial que impide la descarga libre del río Coapantes-Pumpuapa. De esta forma, la condición fisiográfica del gran abanico aluvial del río Coatán tiene un efecto de remanso en el flujo de la descarga que provoca desbordamientos e inundaciones del río Coapantes-Pumpuapa que en eventos hidrometeorológicos extremos se extiende hasta el río Huehuetán.

La CONAGUA y UACH (2006), para hacer la caracterización fisiográfica de las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, las dividieron en 25, 25 y 31 subcuencas, con superficies promedio de 1,420, 1,280, y 1,490 ha, respectivamente, y para a partir del modelo digital de elevaciones (MDE) y empleando las expresiones correspondientes determinaron los valores promedio mostrados en el cuadro 4.2, para el área de la cuenca (A_c), pendiente del cauce principal (Sc_p), la longitud del cauce principal (L_{cp}) y la elevación media de la

cuenca (*ElevC*). De dicho cuadro, se evidencia que la magnitud de las pendientes es muy fuerte, e influyen en la magnitud de los escurrimientos, en la tasa de erosión y en la estimación de sus parámetros, por lo que estos valores se tuvieron en cuenta para su determinación en el presente proyecto.



Figura 4.10. Características fisiográficas de las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán que muestran su condicionamiento y vulnerabilidad a los procesos erosivos debidos al agua

4.1.2.6. Caracterización de los suelos

López (2012), refiere que la geología de la zona corresponde a la época Paleozoica y que la actividad tectónica de la misma ha provocado una orografía accidentada, de montañas con laderas escarpadas en proceso de levantamiento y hundimiento de la llanura costera; muchos de los torrentes están formados por **material fácil de escavar y fácilmente erosionable, que dentro de las cuencas forman cárcavas, especialmente en las zonas de mayor pendiente, debido a los deslaves o derrumbes de material dendrítico**; las partes bajas de las cuencas están generalmente formadas por material granular sedimentario, aluviones y aglomerados que

4. MATERIALES Y MÉTODOS

han sido generados por acarreos fluviales, formando en muchos casos conos de deyección o abanicos aluviales, que inducen a la formación de mantos acumulativos de aluviones, tanto en los cauces como en la llanura de inundación de los valles fluviales, que es fácilmente movable y transportable ante flujos de cierta magnitud, que facilitan los procesos erosivos de tipo pluvial y fluvial.

Cuadro 4.2. Parámetros fisiográficos principales de las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán

PARÁMETRO Y UNIDAD	RÍO HUIXTLA	RÍO HUEHUETÁN	RÍO COATÁN
Ac (ha)	35,458.0	31,966.0	46,175.0
Scp (%)	40.7	31.7	47.6
Lcp (m)	3,910.9	27,453.6	130,608.4
ElevC (msnm)	1,100.0	763.4	2,118.1

Los suelos del Soconusco de Chiapas son de origen volcánico, de acuerdo con diversas referencias que indican incluso la presencia reciente de eventos volcánicos (como la erupción del volcán Santa María en Guatemala ocurrida del 24 al 25 de octubre de 1902) que contribuyeron a su formación y a la conformación de sus características actuales, que se pueden observar en la presencia de depósitos someros de tierra vegetal producto de la desintegración de rocas, tobas y cenizas volcánicas. No obstante, se pueden diferenciar perfectamente también a partir del clima y la topografía dos tipos principales: **en la planicie, las profundidades del suelo pueden llegar a varios metros a causa de la intensa desintegración de rocas y capas de profundidad considerable de las partes altas y a su arrastre y sedimentación en ella y suelen ser de alto contenido de materia orgánica y pertinencia para la producción agrícola**, que en efecto ha hecho que esta zona sea rica en el cultivo muy remunerativo de especies como plátano, caña de azúcar y mango; por el contrario, en las partes altas, los suelos tienen profundidades muy variables y cambiantes de un sitio a otro, como resultado de su arrastre permanente por efecto de la erosión hídrica, y se han destinado a las producción forestal y del café, pero que, sin embargo, dada la presencia y permanencia de vegetación, a menudo están cubiertos de material vegetal de incorporación reciente que forman un horizonte A si bien limitado y variante, persistente; no ocurre lo mismo donde se desarrolla la actividad agrícola, que ha contribuido a su degradación casi total.

Helbig (1964), refiere que los suelos de la planicie costera, en la zona de humedales y sistemas lagunarios del Soconusco, están orgánicamente enriquecidos; son oscuros, frecuentemente de un olor desagradable y de consistencia desde arenosa hasta arcillosa, que con el aumento de la humedad progresiva en dirección de la sierra, se han formado, especialmente en el campo delantero de los volcanes andesíticos, suelos rojos lateríticos,

frecuentemente de un espesor considerable y que en las cumbres de la Sierra Madre y sus vertientes suroccidentales están caracterizados por poseer suelos complejos de montaña, prevaleciendo los suelos cafés forestales y podzólicos. Y, para Mülleried (1982), los suelos son principalmente arcillosos o arcillo-arenosos teñidos por hidróxido de hierro que produce colores pardos o rojizos. En las imágenes de la figura 4.11, se presentan imágenes que muestran los perfiles y colores característicos recién descritos de los suelos en la zona de estudio.

Si bien con la presencia de áreas con texturas muy arcillosas que los lugareños emplean como barro para recipientes y utensilios de cocina, **el suelo predominante en toda la zona** de las laderas de la Sierra Madre de Chiapas, debido al intemperismo intenso, al cual están sometidas las rocas ígneas como los granitos y dioritas, **es de textura arenosa**, denominadas regionalmente por los indígenas mames como *taxcales*, y que al conjugarse con las pendientes de más del 100 % y las precipitaciones incluso mayores de 4,000 mm anuales, favorecen ampliamente el proceso erosivo de origen hídrico, incluyendo los deslizamientos de grandes masas de suelos que desprotegen completamente amplias áreas como en el caso de acontecido con la ocurrencia del huracán Stan en 2005.

En la zona cafetalera del Soconusco, según lo refiere Helbig (1964), sobre suelos andesíticos profundamente corroídos en las regiones más altas de la sierra, se desarrollan ciertos árboles indicadores de la fertilidad, textura arcillosa y buena humedad del suelo, como el árbol de chiri, el de cepillo o peine y el albaricoque, que se desarrollan en los suelos mejor apropiados para el cultivo del café; asimismo considera, que los restos de cenizas volcánicas provenientes de la erupción del volcán Santa María son ricos en cuarzo, que actualmente han sido recubiertos o acarreados por aluviones, lo que ha desfavorecido el crecimiento vegetal, con lo que Baumann (1983) citado por Arellano (2012), no concuerda al mostrar el efecto positivo de la erupción y la ceniza volcánica sobre la producción de café en el Soconusco, después de la erupción del volcán Santa María en 1902.

4.2. CARACTERIZACIÓN DE LAS NANOCUENCAS

4.2.1. DEFINICIÓN Y LOCALIZACIÓN

Los análisis del número de curva se hicieron con datos de cuatro nanocuencas ubicadas en la Cuenca Huixtla, ubicadas en la comunidad de Rosita, por lo que se le denominó con este nombre; en la Finca Brasil de la comunidad de Belisario Domínguez, que se denominó Finca Brasil; Hannover, ubicada en la parte alta y límite con la Cuenca Huehuetán en la Finca Hannover en el municipio de Tuzantán; y Berriozábal, ya en el sotavento del municipio de Motozintla. Las cuatro nanocuencas, así denominadas atendiendo la definición de Arellano (2006), fueron seleccionadas considerando que formaron parte del Proyecto de Monitoreo de Procesos Hidrológicos que implementó el

Organismo de Cuenca Frontera Sur (OCFS) de la CONAGUA, en las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán a partir de 2007 con la participación del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, con el apoyo del Centro de Investigaciones del Agua de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (CONAGUA y UAQ, 2008) y del Departamento de Irrigación la Universidad Autónoma Chapingo, en los años 2009, 2010 (CONAGUA y UACH, 2010) y 2011 (CONAGUA y UACH, 2011), por lo que se instrumentaron y cuentan con información de precipitación y escurrimiento disponible, según se precisa para cada una enseguida. Las nanocuenas de Rosita y Finca Brasil, fueron caracterizadas en campo para el presente proyecto, en cuanto a su topografía, suelos y uso del suelo, en tanto que, las características de las de Hannover y Berriozábal se retomaron de CONAGUA y UAQ (2008), CONAGUA y UACH (2010) y CONAGUA y UACH (2011), con la respectiva autorización de la CONAGUA a través de su Organismo de Cuenca Frontera Sur y de su Gerencia de Distritos de Temporal Tecnificado (GDTT) que encabezaron la ejecución del proyecto de monitoreo de procesos hidrológicos referido.

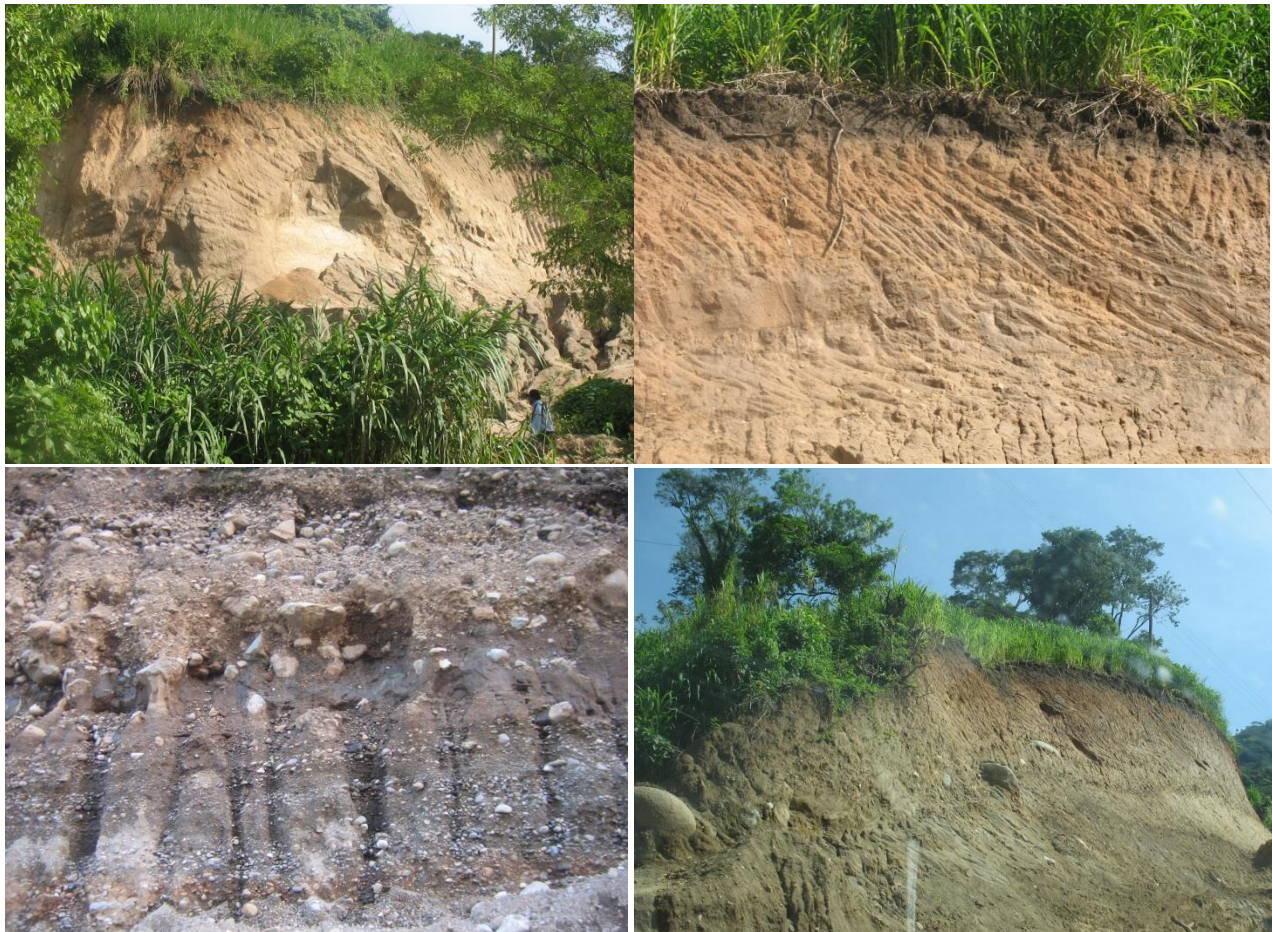


Figura 4.11. Perfiles de suelo representativos de las cuencas costeras de Chiapas, que muestran su textura arenosa y colores rojizos y verduzcos

4.2.1.1. Nanocuenca Rosita

La Nanocuenca Rosita, se ubica, prácticamente sobre la carretera Huixtla-Motozintla, a 3.25 km desde Huixtla y 0.325 km antes de la desviación a Tuzantán y a escasos 260 m del Río Huixtla, lo cual se puede apreciar en la imagen de la figura 4.12. Las coordenadas geográficas correspondientes al sitio de medición, que se localiza en la salida de la misma, son: $15^{\circ} 09' 47''$ de latitud norte y $92^{\circ} 25' 54''$ de longitud oeste. La figura 4.13 muestra un croquis de localización de esta nanocuenca.

4.2.1.2. Nanocuenca Finca Brasil

La Nanocuenca Finca Brasil, se ubica dentro de la propiedad de la Finca Brasil, prácticamente sobre la carretera a la Comunidad de Varitas, a escasos 750 m de donde se desvía en su lado izquierdo de la carretera Huixtla-Motozintla, localizada 670 m antes del centro del pueblo de Belisario Domínguez del municipio de Motozintla, y a 840 m del Río Huixtla medidos en línea recta y perpendicular a él, lo cual se puede apreciar en la imagen de la figura 4.14. Las coordenadas geográficas del sitio de medición, que se localiza en la salida de la nanocuenca, son: $15^{\circ} 18' 04''$ de latitud norte y $92^{\circ} 23' 30''$ de longitud oeste. La figura 4.15 muestra un croquis de localización de esta nanocuenca.

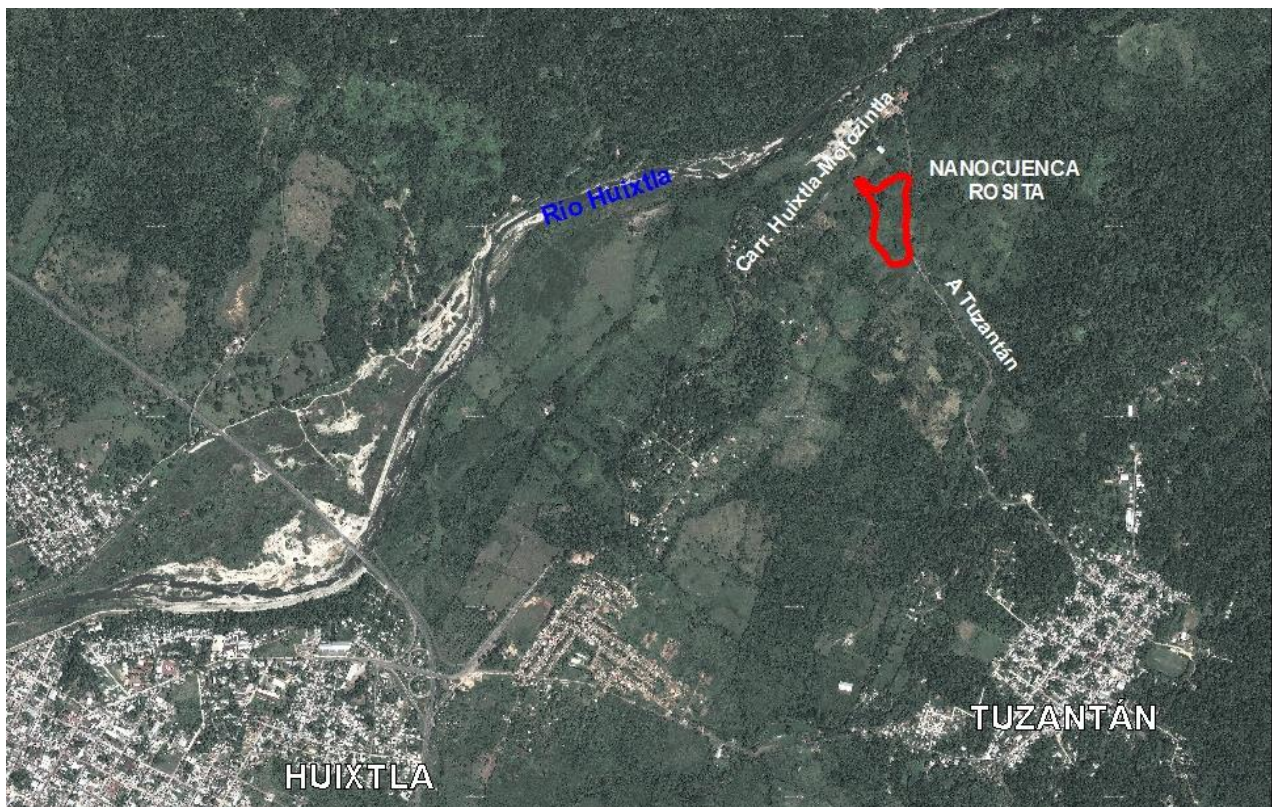


Figura 4.12. Localización de la nanocuenca Rosita sobre la imagen google

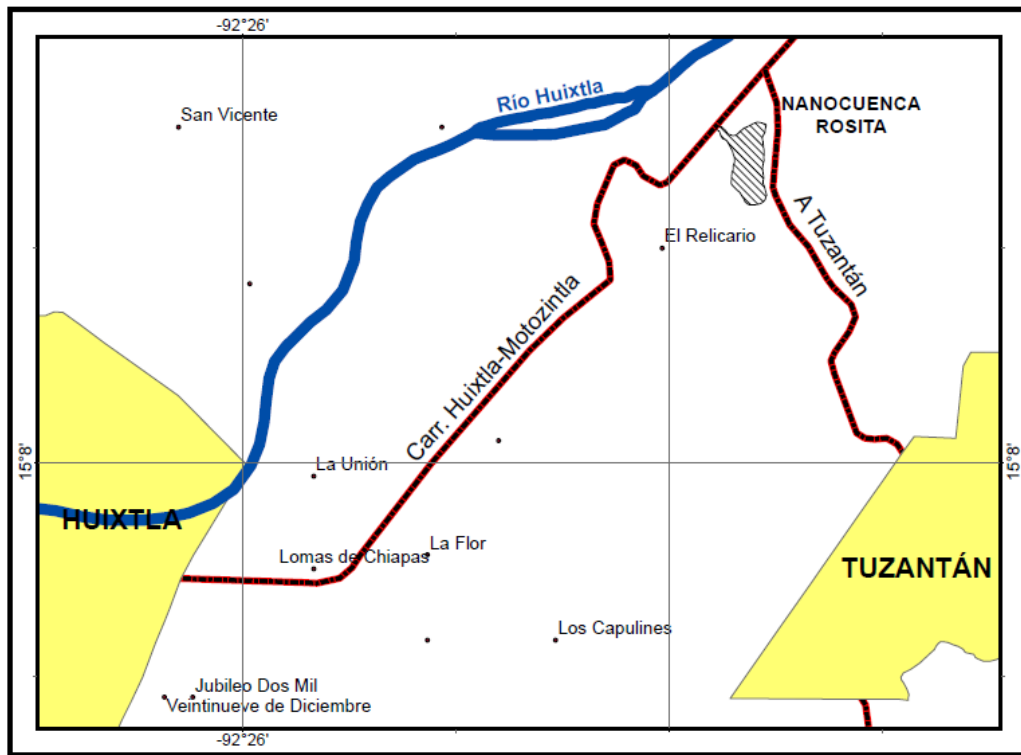


Figura 4.13. Croquis de localización de la nanocuenca Rosita



Figura 4.14. Localización de la nanocuenca Finca Brasil sobre la imagen google

4.2.1.3. Nanocuenca Hannover

Este sitio se ubica dentro de la propiedad de la Finca Hannover; la microcuenca es tributaria de la subcuenca del río Tepuzapa, que desemboca en el Río Huixtla aguas abajo del poblado del mismo nombre; para llegar al sitio se toma la carretera que conduce al ejido Manacal, municipio de Tuzantán y se ubica unos 50 min arriba de la cabecera municipal (CONAGUA y UACH, 2011). La figura 4.16, muestra un croquis de localización de esta nanocuenca. Las coordenadas UTM del sitio de medición son $X = 566,258$ m, $Y = 1,677,884$ m y $Z = 613$ msnm.

4.2.1.4. Nanocuenca Berriozábal

Esta Nanocuenca se ubica en la comunidad de Berriozábal del municipio de Motozintla hacia el sureste de la cabecera municipal; concretamente en las coordenadas UTM $X = 576,433$ m, $Y = 1,687,236$ m y $Z = 1,889$ msnm. En la figura 4.17, se muestra la localización del sitio Berriozábal en la Cuenca Huixtla; en ella también se pueden apreciar la localización de las Nanocuecas Rosita y Finca Brasil, incluidas en este estudio.

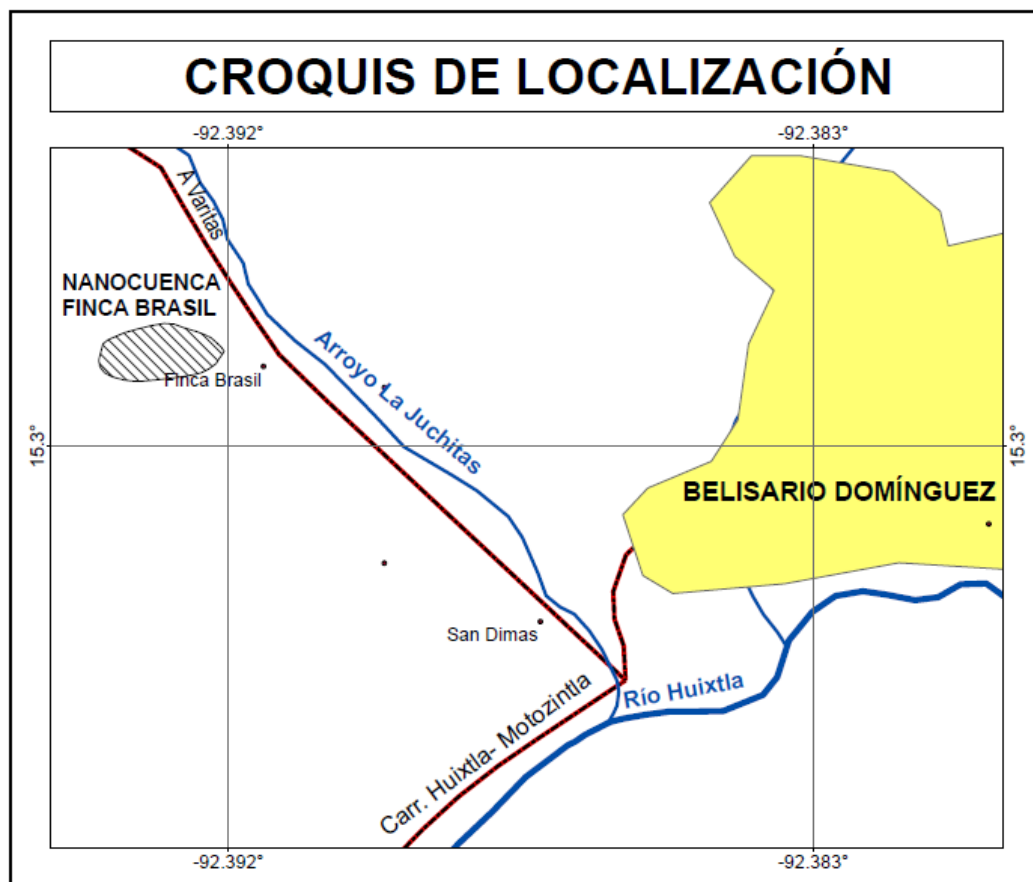


Figura 4.15. Croquis de localización de la nanocuenca Finca Brasil

4. MATERIALES Y MÉTODOS



Figura 4.16. Croquis de localización de la Nanocuenca Hannover

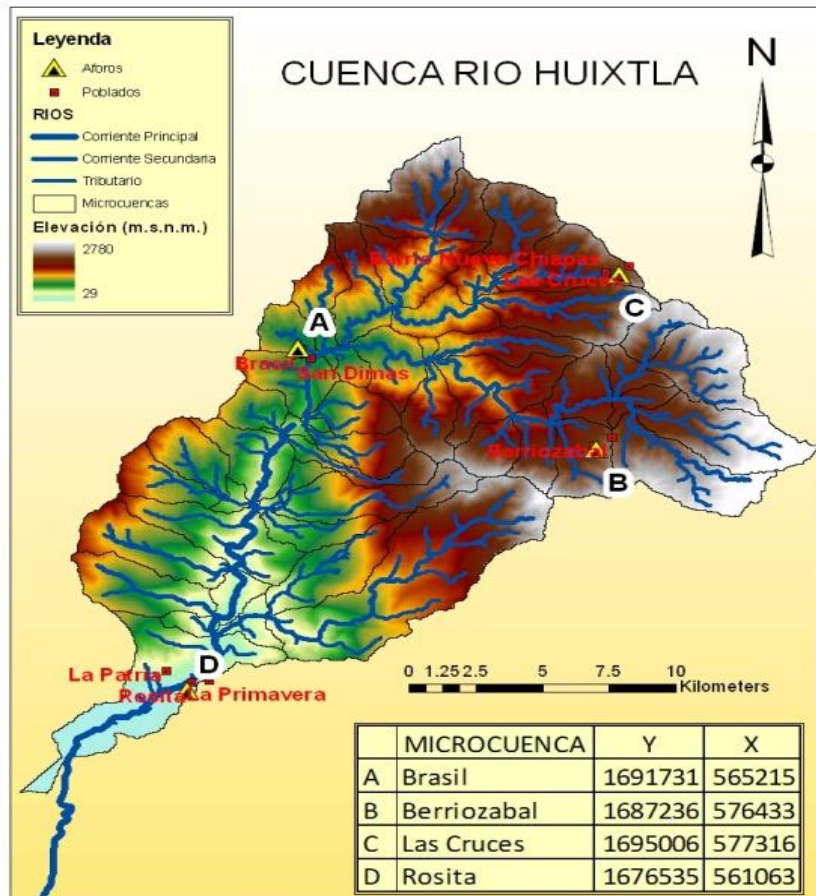


Figura 4.17. Ubicación del sitio de medición de las Nanocuenclas Rosita, Finca Brasil y Berriozábal en la Cuenca del Río Huixtla (CONAGUA y UAQ, 2008)

4.2.2. CARACTERIZACIÓN GENERAL

4.2.2.1. Topografía y fisiografía

Para hacer con precisión la caracterización topográfica y fisiográfica de las nanocuentas Rosita y Finca Brasil, mediante la determinación de sus parámetros más importantes, a partir de datos de campo confiables, se hizo primeramente un **levantamiento topográfico detallado, empleando el procedimiento topográfico de Poligonal y el Método de Radiaciones**, y con el uso de un equipo de **estación total** de la marca LEICA con **precisión lineal de 3 mm+3 ppm y precisión angular de 5 segundos de arco**. El Sistema de Puntos y Líneas de Control y Apoyo (SPLCA) se hizo mediante un equipo de posicionamiento global (GPS) con el mismo grado de precisión que la estación total. Las imágenes de la figura 4.18 muestran la ejecución del trabajo topográfico de campo en ambas nanocuentas.

Los puntos así levantados se procesaron en gabinete utilizando el software comercial AutoCAD, y se elaboró un plano para cada una de estas nanocuentas en el que se registró el parteaguas, las corrientes principales y la topografía del terreno mediante curvas de nivel a cada 1.0 m. Los planos así generados, se denominaron 4 DE 28 PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENTA ROSITA y 5 DE 28 PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENTA FINCA BRASIL.



a) Nanocuenta Rosita

b) Nanocuenta Finca Brasil

Figura 4.18. Levantamiento topográfico de las nanocuentas para conocer su delimitación y área y determinar sus parámetros fisiográficos

En cambio, para la Nanocuenta Hannover, se elaboró el PLANO 6 DE 28 PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENTA HANNOVER a partir de la delimitación realizada por CONAGUA y UACH (2011), y del modelo digital de elevaciones obtenido de la página

web del INEGI, y el PLANO 7 DE 28 PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENCA BARRIOZÁBAL, se adecuó a partir del elaborado por CONAGUA y UAQ (2008).

Empleando como base los planos referidos, se determinó el **Área de la cuenca** Ac (aplicando la expresión 2.1), el **Índice de forma** If (2.2), el **Coefficiente de sinuosidad** Ks (2.3), el **Parámetro de forma** Pf (2.4), la **Longitud de la cuenca**, **Pendiente del cauce principal** Scp (2.5) y la **Pendiente media de la cuenca** Sc , por el Método de Horton, aplicando sucesivamente las expresiones 2.7, 2.8 y 2.9; los valores determinados de estos parámetros para estas nanocuenas y los que se tuvo acceso para las de Hannover y Berriozábal se presentan en el cuadro 4.3.

4.2.2.2. Uso del suelo

Por la magnitud pequeña de las nanocuenas, **la determinación de su uso del suelo se hizo mediante recorrido de campo** y verificando las especies presentes y la magnitud de la cobertura vegetal, según se describe a continuación.

A. Nanocuenca Rosita

El uso del suelo de la nanocuenca Rosita, puede definirse como de pastizal y bosque y con cobertura vegetal prácticamente total, como se puede apreciar en la vista aérea sobre la imagen de satélite de google earth mostrada en la figura 4.19.

Cuadro 4.3. Parámetros fisiográficos determinados o consultados para las nanocuenas estudiadas

PARÁMETRO FISIGRÁFICO			NANOCUENCA			
NOMBRE	SÍMBOLO	UNIDAD	ROSITA	BRASIL	HANNOVER	BERRIOZÁBAL
Área de la cuenca	Ac	ha	4.34	1.23	1.11	1.67
Índice de forma	If	adim	0.23	0.33		
Coefficiente de sinuosidad	Ks	adim	1.11	1.06		
Parámetro de forma	Pf	adim	24.09	37.14		
Longitud de la cuenca	Lc	m	431.92	192.43	100.00	221.29
Pendiente del cauce principal	Scp	%	60.0	35.0	60.0	23.00
Pendiente media de la cuenca	Sc	%	23.84	41.24	23.76	33.15

Se pueden identificar dos tipos de cobertura vegetal en el área de la cuenca: la primera, que consiste de **pastizales altos con algunos arbustos**, que localmente se conoce como **acahual**, se utilizan como pradera para ganado vacuno que se alimenta en pastoreo y que se muestra en la figura 4.20; cubre las partes altas en una superficie de

3.76 ha que representan el 86.6 %; y la segunda es **bosque con árboles de mediana altura** que se localiza en las áreas cercanas a los cauces más profundos y que se muestra en las imágenes de la figura 4.21; cubre una superficie de 0.58 ha que representan el restante 13.4 % del total. La ubicación y magnitud de las coberturas vegetales referidos se muestra en el plano 8 DE 28 PLANO DE USO DE SUELO DE LA NANOCUENCA ROSITA. Es pertinente decir que este tipo de cobertura del suelo, no corresponde con ninguna definida por el SCS en la tabla 2.6, pero puede asimilarse a la de **Tierras forestales, césped o huertos siempre verdes o deciduos con una buena condición hidrológica**.



Figura 4.19. Vista aérea que muestra la cobertura vegetal completa con pastizales (acahual) y menores áreas de bosque en la Nanocuenca Rosita

B. Nanocuenca Finca Brasil

El uso del suelo de la nanocuenca Finca Brasil, puede definirse para toda su área como de bosque completamente de cedro con cobertura aérea, vista desde el aire, de más del 75 %, como se puede apreciar en la vista aérea sobre la imagen de satélite de google earth mostrada en la figura 4.22 y con cobertura vegetal de entre el 25 y el 50 % a nivel del piso, debido a que, los restos de tallos o troncos de los árboles dejan muchos espacios libres, como se puede ver en la figura 4.23; no obstante, el suelo, está cubierto entre un 50 y 75 %, debido a la presencia de restos vegetales, que contribuyen a la

infiltración y limitan el escurrimiento. En la tabla 2.6 definida por el SCS, este tipo de cobertura se hizo corresponder con **Bosque bueno**: protegido del pastoreo de manera que el suelo siempre está cubierto de arroyo y arbustos.



Figura 4.20. Uso del suelo de pastizales con bosque (acahual) en la Nanocuenca Rosita



Figura 4.21. Uso del suelo de bosque en la nanocuenca Rosita

En el plano 9 DE 28 PLANO DE USO DE SUELO DE LA NANOCUENCA FINCA BRASIL, se muestra la cobertura total de esta Nanocuenca con bosque de cedro.

C. Nanocuenca Finca Hannover

El tipo de uso del suelo y la condición de cobertura de esta Nanocuenca fue definido completamente por CONAGUA y UACH (2011) como café bajo sombra cuya conformación se puede visualizar en las fotografías de la figura 4.24.



Figura 4.22. Vista aérea del uso del suelo de bosque de cedro con más de 75 % de cobertura en la nanocuenca Finca Brasil



Figura 4.23. Uso del suelo de bosque en la nanocuenca Finca Brasil

Este tipo de uso del suelo corresponde en las tablas del SCS, a un **bosque espeso con alta evapotranspiración para condiciones hidrológicas de suelo entre C y D**, muy representativas de los bosques de café de la cuenca del río Cuilco en el Soconusco, Chiapas (Arellano, 2012).

D. Nanocuenca Berriozábal

Para el caso de la Nanocuenca Berriozábal, CONAGUA y UAQ (2008) definieron el uso del suelo como **maíz sembrado en surco y en buenas condiciones hidrológicas** en un 56 % de su superficie, que corresponde a 0.935 ha y de tipo acahual en el restante 44 % de la superficie equivalente a 0.735 ha. Tal condición se puede apreciar en las

4. MATERIALES Y MÉTODOS

fotografías que componen la figura 4.25. Tomado de esta fuente se regeneró el PLANO 10 DE 28 PLANO DE USO DEL SUELO DE LA NANOCUENCA BERRIOZÁBAL (CONAGUA y UAQ, 2008).



Figura 4.24. Uso del suelo de café con sombra prevaeciente en la nanocuenca Hannover



Figura 4.25. Uso del suelo de maíz (en el 56 % de la superficie) y de acahual (44 %) en la Nanocuenca Berriozábal

4.2.2.3. Caracterización del suelo y condición hidrológica

Para la caracterización del suelo y la definición de su condición hidrológica, se recolectaron muestras (como se aprecia en las imágenes de la figura 4.26) de dos sitios de cada una de las Nanocuecnas Rosita y Finca Brasil y de las profundidades de 00-30 y 30-60 cm.

Las muestras se analizaron en el Laboratorio de Aguas y Suelos del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, donde se les determinó el peso específico aparente (*Pea*) por el Método de la Probeta, el contenido de materia orgánica (*MO*) por el Método de Walkley and Black, la textura por el Método del Hidrómetro de Boyoucos, el contenido de humedad a Capacidad de Campo (*CC*) por el método de la Olla de Presión y el contenido de humedad a Punto de Marchitamiento Permanente (*PMP*) por el método de la Membrana de Presión.

Los resultados obtenidos se exponen en el cuadro 4.4 para la Nanocuenca Rosita y en el cuadro 4.5 para el caso de las Nanocuenca Finca Brasil. En ambos cuadros, *Pz* es profundidad de mojado del suelo.



a) En la nanocuenca Rosita

b) En la nanocuenca Finca Brasil

Figura 4.26. Muestreo del suelo en las nanocuenca Rosita y Finca Brasil

Cuadro 4.4. Resultados del análisis de suelos de la Nanocuenca Rosita

ID	<i>Pz</i>	<i>Pea</i>	<i>MO</i>	ARENA	LIMO	ARCILLA	CLASIFICACIÓN TEXTURAL	<i>CC</i>	<i>PMP</i>
	(cm)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)
R1-30	00-30	1.2	4.42	60.0	28.0	12.0	Franco arenosa	16.2	6.4
R1-60	30-60	1.3	1.92	76.0	20.0	4.0	Areno francosa	10.0	3.6
R2-30	00-30	1.4	2.89	56.0	28.0	16.0	Franco arenosa	20.3	6.9
R2-60	30-60	1.4	2.52	56.0	26.0	18.0	Franco arenosa	17.6	7.8
PROM.	30	1.3	2.94	62.0	25.5	12.5	Franco arenosa	16.0	6.2

De los resultados de los cuadros indicados, muestran que el contenido de materia orgánica es mayor en la Nanocuenca Rosita, lo que es compatible con las condiciones de cobertura de su superficie; en cuanto a la textura, los suelos tienen altos contenidos de

4. MATERIALES Y MÉTODOS

arena, con 62.0 % para Rosita y 80.5 % para Brasil, lo que se constata con la clase textural que es franco arenosa y areno francosa respectivamente, y con los contenidos de humedad a capacidad de campo y a punto de marchitamiento permanente muy bajos, que corresponden en efecto, a texturas gruesas, con los que favorecen la infiltración y se reduce el escurrimiento, correspondiendo en ambos casos a la condición hidrológica C definido por el SCS (tabla 2.6), que se describe como **suelos que tienen baja velocidad de infiltración; consisten básicamente de arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo; estos suelos tienen bajas velocidades de transmisión del agua (de 1.3 a 3.8 mm/h)**. Así, de esta tabla, el *Nc* para la Nanocuenca Rosita se definió en 72 y para Finca Brasil de 70.

Cuadro 4.5. Resultados del análisis de suelos de la Nanocuenca Finca Brasil

ID	<i>Pr</i>	<i>Pea</i>	<i>MO</i>	ARENA	LIMO	ARCILLA	CLASIFICACIÓN TEXTURAL	<i>CC</i>	<i>PMP</i>
	(cm)	(g/cm ³)	(%)	(%)	(%)	(%)		(%)	(%)
B1-30	00-30	1.3	0.92	90.00	4.00	6.00	Arenosa	7.4	5.0
B1-60	30-60	1.3	0.60	88.00	6.00	6.00	Areno francosa	9.1	5.6
B2-30	00-30	1.4	1.05	76.00	16.00	8.00	Franco arenosa	12.2	4.8
B2-60	30-60	1.4	1.89	68.00	20.00	12.00	Franco arenosa	8.0	6.1
PROM.	30	1.4	1.12	80.50	11.50	8.00	Areno francosa	9.2	5.4

De acuerdo con la tabla 2.5, y la definición del grupo hidrológico para los suelos de las nanocuecas de estudio, la porosidad (*Pr*) de sus suelos varía de 0.50 - 0.55 cm³/cm³ y su coeficiente de saturación (*Ks*) oscila entre 0.20 y 2.00 cm /h.

Para la Finca Hannover se reportó una textura arenosa que en conjunto con la condición hidrológica condujeron a definir el valor de *Nc* = 63 que corresponde a café con sombra con cobertura del suelo y con terrazas con grupo hidrológico de suelos entre B (*Nc* = 52) y C (*Nc* = 68).

Y para la Nanocuenca Berriozábal, se reporta tipo de suelo arenoso para donde se tiene **cubierta de acahual** con lo que se definió un *Nc* = 63; y un tipo de suelo arenoso para la cobertura de maíz, que se asoció al grupo hidrológico B y buena condición hidrológica, que implicó un *Nc* = 78; estos valores ponderados por la superficie que cada cobertura abarca, llevó a tener un *Nc* = 71 para la Nanocuenca.

4.2.3. INSTRUMENTACIÓN E INFORMACIÓN GENERADA

Las nanocuecas definidas, fueron equipadas a su salida por la CONAGUA entre 2008 y 2011 como parte del Programa de Monitoreo de Procesos Hidrológicos de las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, Chiapas, con el siguiente equipo y dispositivos, que se

muestran en las imágenes de las figuras 4.27, 4.28, 4.29 y 4.30 para la nanocuenca Rosita, Finca Brasil, Hannover y Berriozábal, respectivamente:

- Un pluviógrafo; que es un pluviómetro tipo Hellmann de la empresa Thies de Gottingen, Alemania con registro continuo de 31 días y avance de $20 \text{ mm} \times \text{h}^{-1}$ para la medición de intensidades de lluvia de hasta $250 \text{ mm} \times \text{h}^{-1}$ que dispone de un mecanismo que registra de manera continua la lámina de lluvia acumulada durante el periodo de tiempo del evento denominado pluviograma.
- El pluviómetro Hellmann, debe su denominación a su autor, de nombre Gustav Johann Georg Hellmann, (1854-1939), Director del Instituto Meteorológico de la antigua Prusia, en Berlín, entre 1907 y 1922, y uno de los más conocidos de la meteorología mundial; su conformación se muestra de manera esquemática en la figura 4.31 y es descrito como un cilindro de chapa galvanizada formado por dos vasos de longitudes calculadas adecuadamente a la función a desempeñar, que se acoplan uno en otro; el primero, llamado receptor, lleva como boca de recepción un aro calibrado a 200 cm^2 de latón o bronce, y cuyo fondo termina en un embudo soldado con el vaso y haciendo de fondo de éste, con la inclinación necesaria para que las gotas al rebotar se reflejen en la pared enfrentada y con los dispositivos adecuados para enviar el agua rápidamente al segundo vaso, llamado protector, que tiene como misión recoger el agua, aunque no directamente, sino mediante una vasija o colector que se encuentra aislada en el centro mediante topes en el fondo y flejes o aletas laterales en los costados, para crear cámaras de aire que eviten en lo posible la evaporación.



Figura 4.27. Instrumentación de la Nanocuenca Rosita con pluviógrafo y aforador tipo H con limnógrafo integrado

- Aforador tipo H3 al que se le acopló un limnógrafo para medir los escurrimientos superficiales y los reporta mediante hidrogramas de cada evento registrado; el dispositivo tiene una capacidad de descarga de diseño de 0.790 a $1.000 \text{ m}^3 \text{xs}^{-1}$ para un periodo de retorno de 5 años con limnógrafo acoplado modelo F-95 tipo Stevens de la empresa Rosbach de México calibrados a escala 1:5 con resolución múltiple de registro con registros de 31 días y un tirante máximo en la sección de control de 1.5 metros.



Figura 4.28. Instrumentación de la Nanocuenca Finca Brasil con pluviógrafo y aforador tipo H con limnógrafo integrado



Figura 4.29. Instrumentación de la Nanocuenca Finca Hannover con pluviógrafo y aforador tipo H con limnógrafo integrado

El pluviógrafo, por otra parte, es un aparato registrador que mide continuamente a través del tiempo, la cantidad de lluvia precipitada, lo que permite obtener también las

intensidad de lluvia (Romo y Arteaga, 1989). Estos mismos autores indican que, existen varios tipos de pluviógrafos, pero de ellos, al igual que los pluviómetros, el tipo Hellmann, que se muestra en la figura 4.31, es el más utilizado; este aparato tiene en su parte superior, un embudo receptor rematado en una arista viva y que descarga en un recipiente, en cuyo interior se encuentra un flotador con un eje, al cual va unido un estilete con una pluma en su extremidad, que va trazando líneas sobre papel enrollado alrededor de un tambor que por medio de un movimiento de relojería, da una vuelta completa en 24 horas.



Figura 4.30. Instrumentación de la Nanocuenca Berriozábal con pluviógrafo y aforador tipo H con limnógrafo integrado

La estructura aforadora tipo H, fue creada por el SCS de los Estados Unidos para resolver el problema de medición de caudales en cauces naturales para un amplio rango de descargas sin que los valores grandes ocasionen remansos y que en la medición de los pequeños se pierda sensibilidad (Harrold y Krimgold, 1948, citado por Ortíz, 1982), lo cual se logró definiendo una forma de V en la salida y tres tipos definidos por sus tamaños, y denominados HS de tamaño pequeño (small) para gastos de entre 0.0022 a 0.022 m³/s con una profundidad D de entre 0.4 (0.122 m) y 1 pie (0.305 m); H, de tamaño normal con profundidad D (ver figura 4.32), de entre 0.5 ft (0.152 m) y 4.5 ft (1.37 m) para gastos de 0.009 y 2.366 m³/s, respectivamente; y los de tamaño grande (large) HL, cuyas medidas de profundidad varían de 3.5 ft (1.07 m) a 4.0 ft (1.22 m) y para gastos de 2.370 y 3.298 m³/s, respectivamente.

Dentro de cada tipo, se denominan por la profundidad dada en ft; así la estructura empleada en los sitios de monitoreo de las nanocuenca de estudio son del tipo H3, cuyas dimensiones son las que se muestran en la figura 4.32 y para el cual (Harrold y Krimgold, 1948, citado por Ortíz, 1982), reportan la expresión 4.1, en la que h_a es la carga hidráulica en la salida.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

$$\log Q = 0.0329 + 2.3977 \log ha + 0.2588 (\log ha)^2 \quad (4.1)$$

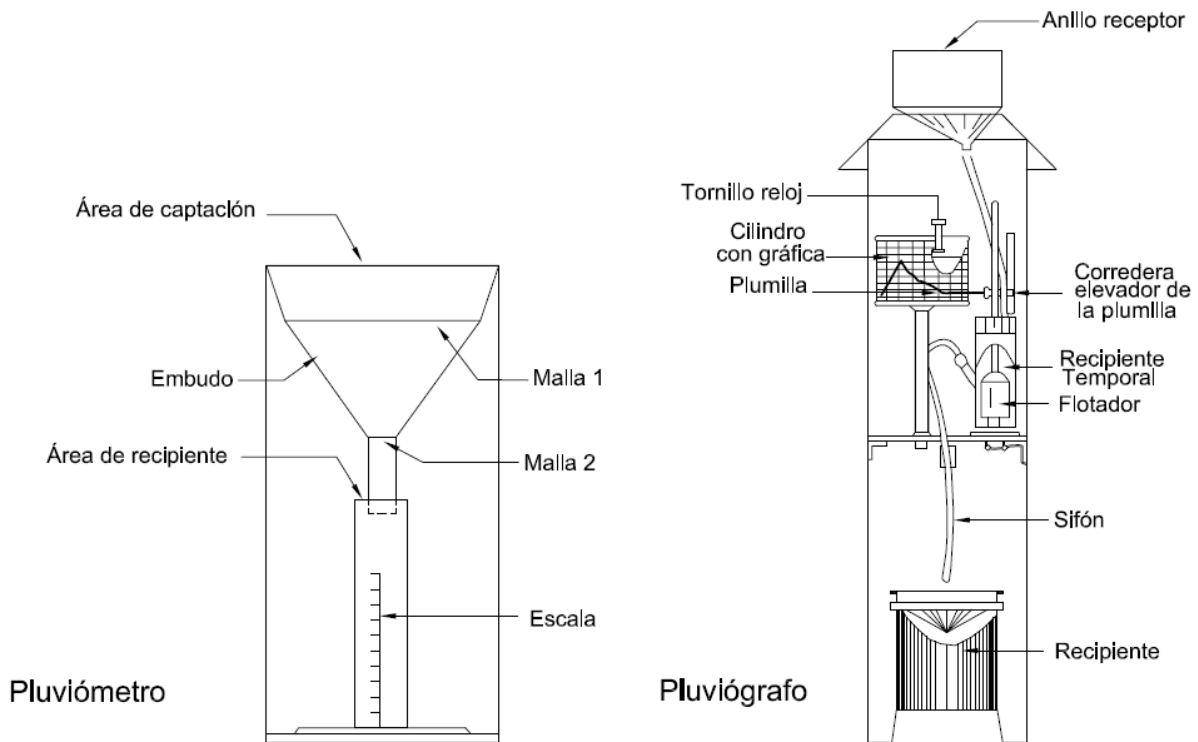


Figura 4.31. Esquematzación del pluviómetro y pluviógrafo tipo Hellmann, como los instalados en las nanocuecas de estudio

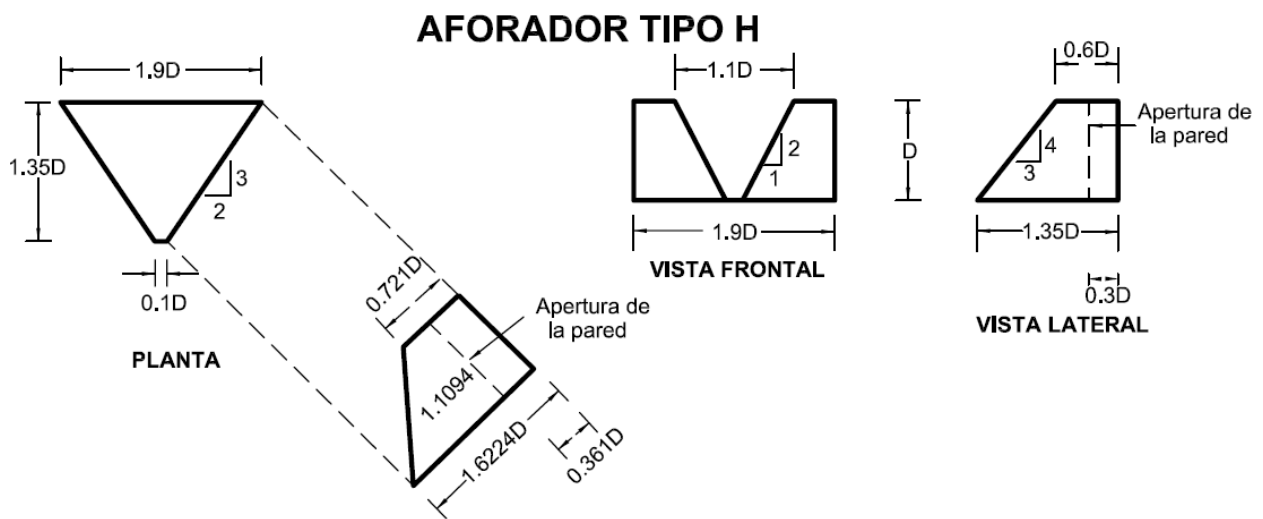


Figura 4.32. Dimensiones del aforador tipo H definidas por Holtan et al., (1962), citados por Ortíz (1982)

4.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

4.3.1. PARA LOS ESTUDIOS DE EROSIÓN

4.3.1.1. Procedimiento general

La determinación de la tasa de erosión (P_s) se hizo para las tres cuencas estudiadas aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (expresión 2.59), aplicando la Técnica de Álgebra de Mapas (TAM) y para cuatro escenarios definidos para tres fechas (noviembre de 1990, febrero de 2005 y noviembre de 2005), con las que se pretendió evaluar el impacto de los cambios de cobertura que presumiblemente hubo en los últimos 15 años (entre noviembre de 1990 y noviembre de 2005) y la que se presenta entre el periodo seco y el periodo lluvioso del año 2005.

El ESCENARIO 0 entendido como de referencia, se definió con los valores del parámetro C y del R de la EUPS correspondientes a febrero de 1990; en los escenarios 1 al 3 se consideró la lluvia de 2005 que considera al Huracán Stan, diferenciándose por la condición de cobertura dada por el parámetro C ; así, con el valor de C para febrero de 1990 se generó el ESCENARIO 1, con el valor de C para febrero de 2005 el ESCENARIO 2 y con el valor de C de noviembre de 2005 el ESCENARIO 3. En los cuatro escenarios, los demás parámetros fueron los mismos.

Para aplicar la TAM en el cálculo de P_s con la expresión 2.59, se elaboraron mapas de los factores de la EUPS, uno para cada uno y para cada escenario en el caso de C y R . El procedimiento para la determinación de los valores de los factores y de los mapas, se describe en los incisos siguientes, a partir de lo descrito por CONAGUA y UACH (2006).

4.3.1.2. Precipitación y factor R

Del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y del Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC) versión II elaborado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), se obtuvo la información pluviográfica de las estaciones meteorológicas listadas en el cuadro 4.6, en el que se registran sus coordenadas geográficas que definen su localización y el periodo para el que se obtuvieron datos.

Adicionalmente, se obtuvo la información disponible de precipitación de las estaciones establecidas y manejadas por las Fincas Cafetaleras Argovia, Chicharras, La Paz, Hamburgo, Germania, La Victoria y La Patria, establecidas en el área de estudio, cuyas coordenadas UTM se exponen en el cuadro 4.7. Con los datos disponibles de precipitación de todas las estaciones referidas, se definió su área de influencia con el método de polígonos de Thiessen para las tres cuencas de estudio, estimando el valor de la precipitación correspondiente para cada punto.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Cuadro 4.6. Nombres, localización y periodos de datos de las estaciones meteorológicas del SMN empleadas para la información pluviométrica para el cálculo del factor R

IDENTIFICACIÓN DE LAS ESTACIONES		PERIODO DE DATOS		COORDENADAS		
CLAVE	NOMBRE Y MUNICIPIO	DE A	AÑOS	LATITUD (°)	LONGITUD (°)	ALTITUD (m)
7014	Belisario Domínguez, Motozintla	1962-2002	40	15.31	-92.36	660.00
7077	Huixtla, Huixtla	1954-2003	50	15.14	-92.49	40.00
7333	Buenos Aires, Motozintla	1980-2004	25	15.33	-92.27	1,720.00
7191	Malpaso, Tapachula	1986-2005	19	14.95	-92.27	303.00
7200	Tapachula, Tapachula	1986-2005	19	14.95	-92.27	179.00
7075	Huehuetán, Huehuetán	1964-2006	42	15.16	-92.24	1,760.00

Cuadro 4.7. Localización de estaciones meteorológicas de las Fincas cafetaleras cuyos datos de precipitación se emplearon también para el cálculo del factor R

NOMBRE DE LA ESTACIÓN	COORDENADAS UTM	
	X	Y
	(m)	(m)
Finca Argovia	575,238.25	1,672,287.17
Finca Chicharras	581,563.56	1,671,404.00
Finca La Paz, Escuintla	576,851.41	1,666,525.74
Finca San Cristóbal, Tuzantán	569,091.81	1,678,404.01
Finca Hamburgo, Tapachula	572,503.54	1,677,590.39
Finca Germania, Tapachula	569,732.83	1,680,358.45
Finca La Victoria, Motozintla	562,060.22	1,690,274.03
Finca La Patria, Tapachula	582,359.87	1,668,389.61

Con los datos así calculados de precipitación media anual Pma , para las tres cuencas, se determinó el valor del factor R de la EUPS, empleando la expresión (2.62) propuesta por Baumann y Arellano (2003). Los datos de Pma y los resultados del factor R calculados se exponen en el cuadro 4.8 de los que es evidente que, a pesar de la consideración de la precipitación del huracán Stan en 2005, no hay una diferencia notable entre la precipitación, y –por lo tanto– entre los valores del factor R de 1990 y 2005; más aún, entre las estaciones Finca Chicharras y Malpaso, la Pma y el R resultaron mayores en 1990 que en 2005. Ello es resultado de que 1990, es el tercer año más lluvioso del periodo analizado y, por lo tanto, no constituye un buen referente para valorar el impacto del ciclón tropical Stan. Y con estos datos se elaboraron los mapas para el factor R y para cada una de las tres cuencas estudiadas.

Cuadro 4.8. Valores precipitación empleados y de del factor R de la EUPS calculados con la ecuación de Baumann y Arellano (2003)

ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN (P _{ma})		FACTOR (R)	
	(mm)		(MJ×mm×ha ⁻¹ ×h ⁻¹ ×año ⁻¹)	
	1990	2005	1990	2005
Finca Argovia	4,469.00	5,635.00	58,302	75,236
Finca Chicharras	4,364.10	4,320.60	56,779	56,147
Finca La Paz, Escuintla	2,783.20	ND	33,819	ND
Finca San Cristóbal, Tuzantán	4,620.00	6,782.00	60,495	91,894
Finca Hamburgo, Tapachula	ND	5,126.00	ND	67,844
Finca Germania	3,562.60	5,279.70	45,139	70,076
Finca La Victoria, Motozintla	1,945.00	3,814.00	21,646	48,790
Finca La Patria	ND	4,826.50	ND	63,494
Huixtla	1,278.40	2,559.00	11,965	30,563
Malpaso	4,914.50	4,918.90	64,772	64,836
Tapachula	2,619.50	2,978.00	31,442	36,648
Huehuetán	2,751.80	3,790.80	33,363	48,453
PROMEDIO	3,330.81	4,548.23	41,772	59,452

ND: Datos no disponibles

4.3.1.3. Caracterización para la determinación del factor K

Para la caracterización de los suelos, se emplearon las cartas de uso del suelo del INEGI, definiendo las clases texturales de suelo, mediante una simbología representada por S's que van de 1 al 10 y que tienen relación con las bases de datos que emplea el modelo SWAT al utilizar la TAM; los casos que aplican para las cuencas de estudio son los que se incluyen en la tabla 4.1.

CONAGUA y UACH (2006), hicieron una caracterización de los suelos de las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, haciendo muestreo en 24, 17 y 18 sitios, respectivamente (lo cual se muestra en la figura 4.33) y analizando las muestras en el laboratorio se determinó su textura mediante la medición de sus porcentajes de arcilla, limo y arena por el Método del Hidrómetro de Boyoucos, su contenido de materia orgánica y, porcentaje de arena fina, obteniendo, los valores medios o mediana que se exponen en el cuadro 4.9, de la que se observa que el contenido de materia orgánica, con valor promedio de 3.6 % es alto, pero propio de las zonas tropicales e indican la presencia de turbas y que predomina el contenido de arenas con promedios de 60.2 % para Huixtla, de 52.5 % para Huehuetán y de 60.7 % para Coatán y que implican una textura dominante de migajón arenosa.

Tabla 4.1. Clases texturales, su relación con el grupo hidrológico y su equivalencia con la clasificación del INEGI para las cuencas de estudio

NÚM.	NOMBRE	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN DE INEGI	
1	S2	B	Moderada proporción de infiltración	2	Media
2	S4	C	Baja proporción de infiltración	3	Fina
3	S10	A	Alta proporción de infiltración	1	Gruesa



Figura 4.33. Muestreo de los suelos de las cuencas para su caracterización y determinación del factor K de la EUP

Con los datos de todos los sitios para cada cuenca, se determinó el parámetro *K* empleando las expresiones 2.63 y 2.64 propuestas por Wishmeier *et al.* (1971) y con el nomograma expuesto en la figura 2.8 para la determinación de los parámetros *a*, *b* y *c* empleados en ellas. Los resultados de *K* para cada uno de los sitios de muestreo y para las tres cuencas se reportan en el cuadro 4.10.

Cuadro 4.9. Datos promedio de contenido de materia orgánica (MO) y clasificación textural presentes en la Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán (CONAGUA y UACH, 2006)

CUENCA	MO (%)	TEXTURA			
		ARCILLAS (%)	LIMOS (%)	ARENAS (%)	CLASE TEXTURAL PREDOMINANTE
Huixtla	2.6	10.4	29.4	60.2	Migajón arenoso
Huehuetán	4.8	17.9	29.6	52.5	Migajón arenoso
Coatán	3.3	12.2	27.1	60.7	Migajón arenoso

Con las coordenadas geográficas de los sitios de muestreo de suelo, determinados con equipo GPS navegador, se definieron las áreas de influencia de cada uno y se elaboraron los mapas de valores de K , uno para cada Cuenca.

Cuadro 4.10. Valores del factor K de la EUPS para las tres cuencas de estudio

CUENCA HUIXTLA		CUENCA HUEHUETÁN		CUENCA COATÁN	
SITIO	K	SITIO	K	SITIO	K
Puente Material	0.039	Llano Grande	0.044	La Paz	0.026
Vado Ancho	0.033	Guadalupe	0.038	Entre Tuxchama y Loma Bonita	0.032
La Ceiba	0.031	Guadalupe Norte	0.035	Aquiles Serdán Norte	0.039
Santa Amalia	0.024	Chanjul	0.043	Vega Molinas y Carrizal Norte	0.041
Huixtla 1	0.060	Santa Fe Chininse	0.035	Entre Bijahua y Toquián Grande	0.030
Subcuenca 1	0.053	Campo Mexiquito	0.039	Vega Malacate Norte	0.062
El Progreso	0.028	Argovia 1	0.017	Plan Chanjale	0.056
Cuauhtémoc	0.036	Argovia 2	0.023	Plan Salchiji	0.040
Nueva Independencia	0.041	Cantón Mexiquillo	0.033	Manguito Norte	0.032
Ampliación Villahermosa	0.043	Nueva Reforma	0.040	Nuevo Chespal Norte	0.039
Huixtla 3	0.024	Zaragoza	0.024	Nuevo Chespal	0.037
Caracoles	0.021	Andalucía	0.015	La Vega de Coatán	0.010
Mango	0.036	Altamira	0.019	Unión Roja Norte	0.036
Loma Bonita	0.010	Cantón el Triunfo 1	0.023	La Providencia	0.016
Barrio Nuevo	0.043	Cantón el Triunfo 2	0.023	Providencia Norte	0.023
Aserradero	0.035	Acapulco, Hgo.	0.023	Manguito	0.023
Ojo de Agua	0.016	Fracción Sta. Elena	0.021	Chaparrón Sur	0.008
Nueva Esperancita	0.054	Guadalupe	0.038	Planta potabilizadora norte	0.064
PROMEDIO	0.035	PROMEDIO	0.028	PROMEDIO	0.035

4.3.1.4. Determinación del factor topográfico

El insumo principal para la determinación del factor topográfico LS , fue el modelo digital de elevaciones (MDE) integrado con información del INEGI y la adquirida con la empresa Sistemas de Información Geográfica S. A. (SIGSA) para toda la zona de estudio, con la que se obtuvo la configuración del terreno con curvas de nivel cada 10 m. Esta información en formato digital, se desplegó en la extensión Soil and Water Assessment Tool (SWAT) del software Arc View y en él se identificaron por cada subcuenca la distancia L promedio, que se representó con una línea a la que se le calculó su magnitud, misma que se relacionó a cada subcuenca, tal como se muestra en la figura 4.34.

Conocido el valor de la longitud de la pendiente L y de la pendiente S de la ladera

4. MATERIALES Y MÉTODOS

considerada como representativa de cada subcuena, se obtuvo el valor del factor topográfico empleando consecutivamente las expresiones 2.67, 2.66 y 2.65, el cual se almacenó en el mismo software (como lo muestra la figura 4.35) para aplicarlo en el cálculo posterior de la P_s con la TAM.

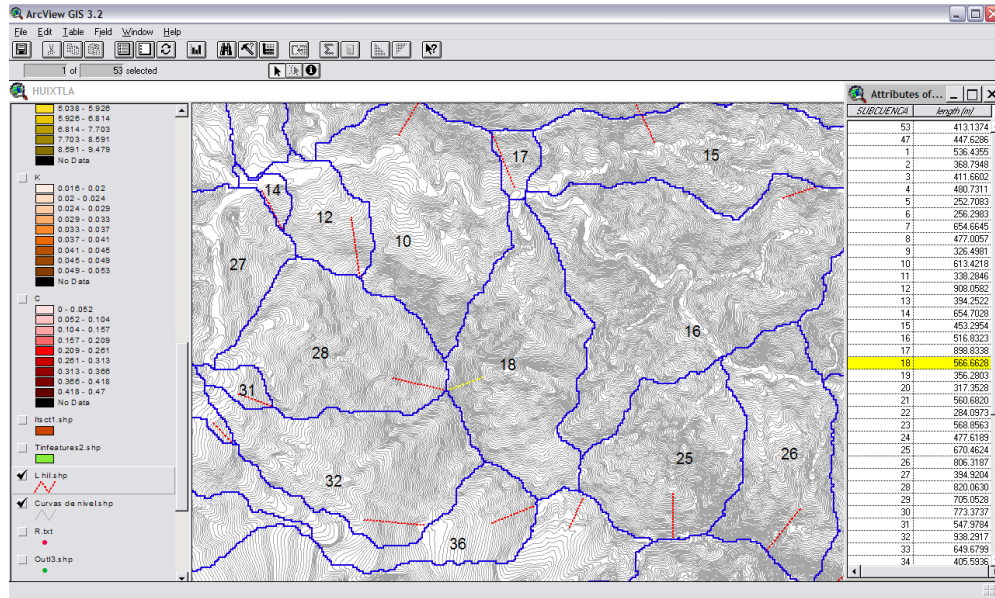


Figura 4.34. Empleo del modelo digital de elevaciones para la determinación de la longitud L_i y la pendiente S_i de la ladera para el cálculo del factor LS

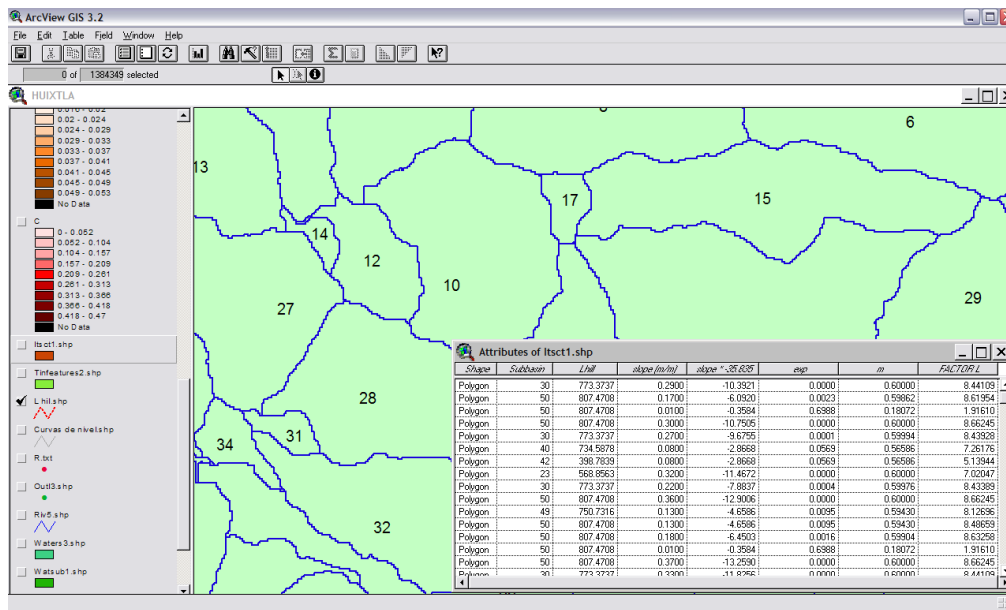


Figura 4.35. Cálculo y almacenamiento del factor LS como mapa con las herramientas de ArcView para su empleo en el cálculo del P_s con la TAM

El valor del ángulo α_h de la expresión 2.66, se obtuvo a partir de una red de triángulos irregulares (TIN por sus siglas en el idioma inglés) obtenida en el mismo MDE, y empleando en el software ArcMap 9.1, generando también un mapa de pendientes con rangos de elevación cada m. La figura 4.36 muestra el mapa del factor L para la cuenca Coatán y en el cuadro 4.11 se presentan el número de datos determinados para cada cuenca y los valores mínimo, promedio y máximo de los factores L , S y LS para las tres cuencas.

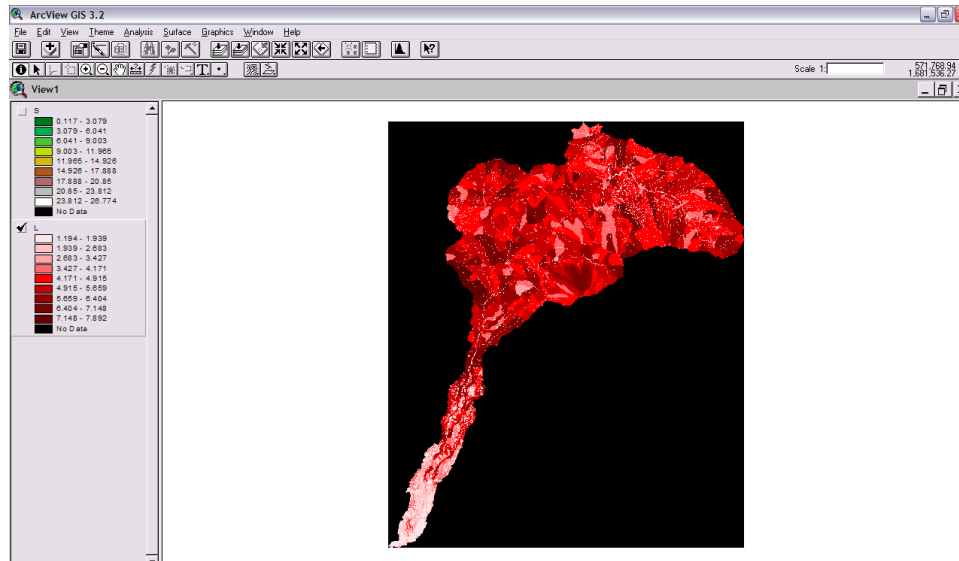


Figura 4.36. Mapa del factor L para la cuenca Coatán empleado en el álgebra de mapas para el cálculo de la P_s

Cuadro 4.11. Valores estadísticos de los factores L , S y LS determinados para las tres cuencas de estudio

PARÁMETRO	INDICADOR	CUENCA HUIXTLA	CUENCA HUEHUETÁN	CUENCA COATÁN
	NÚM. DATOS	325	156	504
L	Mínimo	1.11	0.89	1.61
	Promedio	4.28	4.34	4.73
	Máximo	6.28	6.42	7.70
S	Mínimo	0.12	0.16	0.25
	Promedio	6.12	6.66	6.04
	Máximo	10.96	13.79	12.58
LS	Mínimo	0.13	0.14	0.40
	Promedio	26.18	28.88	28.53
	Máximo	68.83	88.53	96.87

4.3.1.5. Vegetación y uso del suelo

La determinación del tipo de cobertura y la definición del uso del suelo en las cuencas se tomó del trabajo desarrollado de manera conjunta CONAGUA y UACH (2006) para definir en valor del factor *C* de la EUPS; para ello se emplearon imágenes del satélite LANDSAT 4 de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) de noviembre de 1990, mostrada en la figura 4.37, que corresponde a la misma fecha final de análisis pero 15 años antes de ocurrencia del huracán Stan; las imágenes del satélite francés SPOT, para febrero de 2005, que es una fecha anterior pero cercana a la ocurrencia de dicho fenómeno y cuya configuración se muestra en la figura 4.38; y las imágenes de este mismo satélite de noviembre de 2005, mostradas en la figura 4.39, que es posterior a la presencia del Stan, pero en la misma temporada que las de LANDSAT de 1990. En esta figura se muestra también la ubicación de las áreas de estudio de las tres cuencas sobre la imagen de satélite.

Para todas las imágenes de satélite, el análisis se hizo por la técnica de clasificación supervisada empleando el software comercial Idrisi Kilimanjaro, para lo cual se definieron y analizaron en cada cuenca áreas de entrenamiento para calibrar las definiciones de cobertura vegetal y uso de suelo, que se hizo mediante la determinación de las firmas espectrales de cada una de las clases definidas en ellas, y se usaron para asignar los píxeles del archivo de la imagen a cada una de las clases muestreadas, para luego calcular el Índice de Vegetación de Diferencias Normalizadas (*NDVI*) empleando la expresión (2.75).

CONAGUA y UACH (2006), reporta que, resultado del trabajo descrito, se identificaron y diferenciaron las 13 clases de uso del suelo que se listan en el cuadro 2.12 y que de ellas, la clase 5 SMSC/CP no existió en la Cuenca Huixtla, ni en la Cuenca Huehuetán, en la que además no se presenta la clase 6 SBC/VS y la clase 4 SMSC/VS no se encontró en la Cuenca Coatán. La superficie incluida como sin clasificar (S/CLASIFICAR) en la Cuenca Coatán, es aquella para la que no se tuvo imagen de satélite pero que corresponde a la porción de la República de Guatemala.

A manera de ejemplo, en el cuadro 4.12, obtenido de la misma fuente recién referida, se muestran las superficies y el porcentaje de ocupación de cada uso del suelo determinados para las cuencas en estudio, correspondientes a noviembre de 2005 y en el PLANO 13 DE 28 USO DE SUELO DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN y COATÁN, PARA NOVIEMBRE DE 2005, se muestran de manera gráfica estos resultados. Datos idénticos se obtuvieron para noviembre de 1990 y febrero de 2005 y se registran en los planos 11 DE 28 USO DE SUELO DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 1990 y 12 DE 28 USO DE SUELO DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA FEBRERO DE 2005, respectivamente.

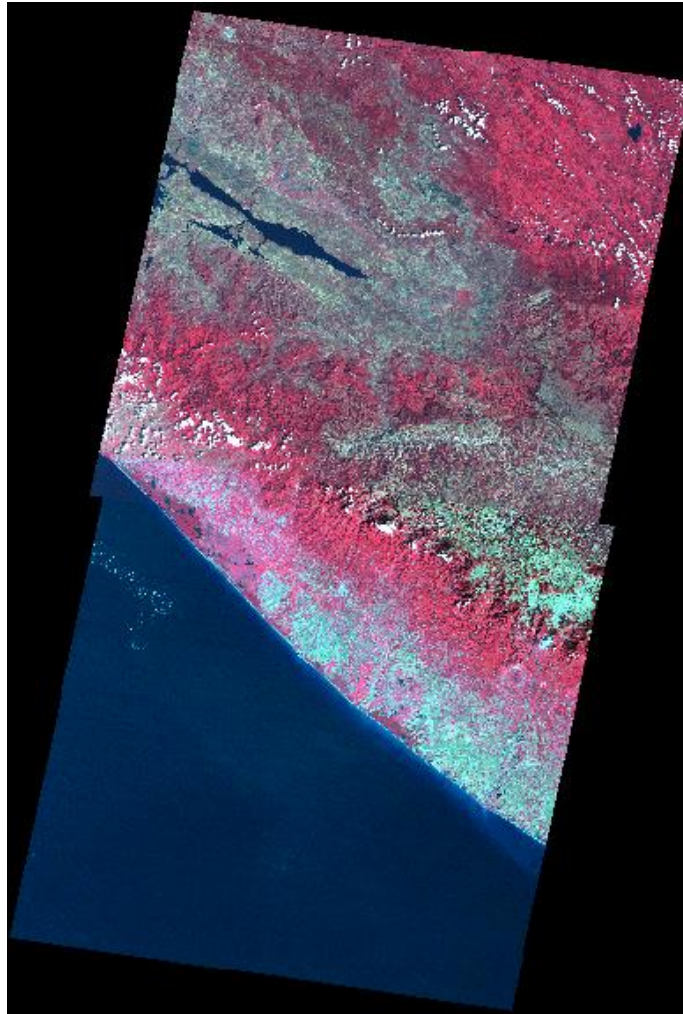


Figura 4.37. Visualización de las imágenes del satélite Landsat 4 de la NASA de noviembre de 1990 empleada para la determinación del parámetro C de la EUPS

El valor de este parámetro C, se determinó a partir de las clases de uso del suelo definidas para las cuencas en estudio y aplicando los valores propuestos por Arellano (2006) y que se exponen en el cuadro 4.13, que aplican para todas las cuencas según el tipo de uso del suelo que tengan; en el mapa del factor se asoció el valor de C al uso del suelo.

4.3.1.6. Definición del factor P

Con base en su definición y considerando el conocimiento amplio de las cuencas de estudio, así como el reciente (para las fechas consideradas en el estudio) acontecimiento del ciclón tropical Stan que se analiza, este factor se tomó como 1 para todas las condiciones y para las tres cuencas, que implica que no existen prácticas de conservación del suelo.

4. MATERIALES Y MÉTODOS



Figura 4.38. Denominación y ubicación de las imágenes del satélite francés Spot empleadas para determinar el uso del suelo de las cuencas

4.3.1.7. Estimación de la Tasas de Erosión

Dado que la fuente de información de datos empleados para la obtención de los factores R y K son puntuales, ya que se obtuvieron de estaciones climáticas y sitios de muestreo respectivamente, fue necesario en principio graficar mediante sus coordenadas UTM su ubicación y generarlos en formato .grd o tipo ráster de una sola banda. Habiendo generado un mapa para cada factor, se empleó la herramienta **Map Calculador** de la extensión **Spatial Analyst** de ArcView, para multiplicar en una sola operación todos los factores, obteniendo como mapas de salida del tipo .grd con los valores de tasa de erosión P_s . Esta operación se repitió para cada uno de los escenarios definidos.

Los valores de P_s obtenidos, se clasificaron de acuerdo a la propuesta de la FAO expuesta en las tablas 2.16 y 2.17 y son los que se presentan para los cuatro escenarios en los cuadros 4.14, 4.15 y 4.16 para las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, respectivamente. Y con estos resultados se elaboraron los planos 14 DE 28 TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 1990, 15 DE 28 TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA FEBRERO DE 2005 y 16 DE 28 TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 2005, en los que se muestra la distribución geográfica de la tasa se erosión para los escenarios correspondientes.

Cuadro 4.12. Clases de uso del suelo presentes en la Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, en noviembre de 2005

CLASE DE USO		CUENCA HUIXTLA		CUENCA HUEHUETÁN		CUENCA COATÁN	
ID	CLAVE	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
1	BP	368.67	1.04	477.39	1.55	1,354.06	2.93
2	BPQ	1,392.94	3.93	2,019.46	6.54	1,106.49	2.40
3	BQP	4,498.51	12.69	2,674.69	8.66	10,896.30	23.60
4	SMSC/VS	13,526.99	38.15	9,427.21	30.52	0.00	0.00
5	SMSC/CP	0.00	0.00	0.00	0.00	13,635.92	29.53
6	SBC/VS	5,214.79	14.71	0.00	0.00	1,076.39	2.33
7	PAST-RAS	2,428.46	6.85	3,771.35	12.21	8,642.98	18.72
8	S-DESN	1,447.82	4.08	183.77	0.59	2,226.85	4.82
9	UA-SDESC	344.36	0.97	1,071.73	3.47	302.41	0.65
10	UA-CP	3,214.82	9.07	9,494.26	30.74	4,169.53	9.03
11	AUyPOB	1,775.48	5.01	670.09	2.17	1,504.79	3.26
12	VC	831.99	2.35	784.00	2.54	306.95	0.66
13	C-AGUA	411.07	1.16	314.67	1.02	666.49	1.44
	S/CLASIFICAR	0.00	0.00	0.00	0.00	285.96	0.62
TOTAL		35,455.90	100.00	30,888.62	100.00	46,175.12	100.00

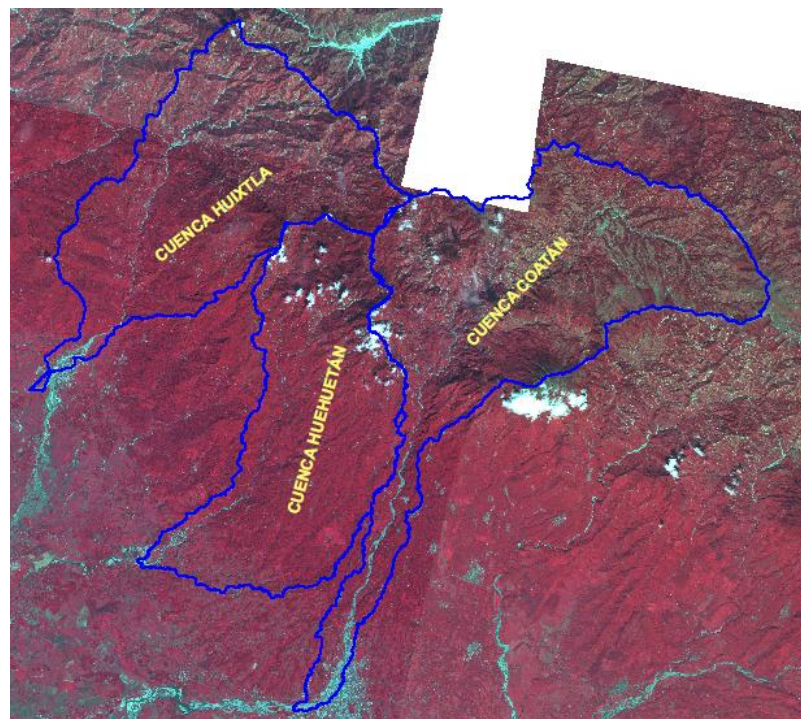


Figura 4.39. Visualización del mosaico de imágenes del satélite francés SPOT de noviembre de 2005 empleadas para determinar el factor C de la EUPS y delimitación de las áreas de estudio de las tres cuencas

4. MATERIALES Y MÉTODOS

La discusión de los resultados obtenidos se presenta en el apartado 5.1, en el que se expone el artículo ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA PROVOCADA POR EL HURACÁN STAN EN LAS CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS, MÉXICO (Pérez, *et al.*, 2012) y en el capítulo 6. ANÁLISIS CONJUNTO DE RESULTADOS.

Cuadro 4.13. Valores del factor C de la EUPS aplicables a las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatlán con base en los tipos de uso del suelo determinados para cada una

ID	CLAVE	DESCRIPCIÓN	VALOR DE C
1	BP	Bosque de pino	0.001
2	BPQ	Bosque de pino-encino	0.004
3	BQP	Bosque de encino-pino	0.004
4	SMSC/VS	Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria	0.003
5	SMSC/CP	Selva mediana subcaducifolia con cultivos permanentes	0.003
6	SBC/VS	Selva baja caducifolia con vegetación secundaria	0.002
7	PAST-RAS	Pastizal rasante	0.025
8	S-DESN	Suelos desnudos	0.470
9	UA-SDESC	Suelos en descanso con alguna cobertura	0.470
10	UA-CP	Uso agrícola- cultivos permanentes (mango, caña café)	0.038
11	AUyPOB	Áreas urbanas y pobladas	0.000
12	VC	Vías de comunicación	0.000
13	C_AGUA	Corrientes y cuerpos de agua	0.000

Cuadro 4.14. Tasa de erosión para los cuatro escenarios analizados en la Cuenca Huixtla

RANGO ($\text{t}\times\text{ha}^{-1}\text{año}^{-1}$)	ESCENARIO 0:		ESCENARIO 1:		ESCENARIO 2:		ESCENARIO 3:	
	FEB DE 1990		FEB DE 1990		FEB DE 2005		NOV DE 2005	
	ÁREA		ÁREA		ÁREA		ÁREA	
	(km^2)	(%)	(km^2)	(%)	(km^2)	(%)	(km^2)	(%)
00→05	30.84	8.73	28.69	8.12	18.41	5.21	38.61	10.93
05→10	3.52	1.00	2.39	0.68	2.50	0.71	1.75	0.50
10→50	48.77	13.81	20.71	5.86	18.61	5.27	28.71	8.13
50→200	169.45	47.97	124.83	35.34	108.85	30.82	138.04	39.08
200→500	61.49	17.41	111.05	31.44	94.02	26.62	76.83	21.75
500→1,000	23.48	6.65	31.59	8.94	39.12	11.08	20.72	5.87
> 1,000	15.67	4.44	33.96	9.61	71.71	20.30	48.56	13.75
SUMA	353.22	100.00	353.22	100.00	353.22	100.00	353.22	100.00

Cuadro 4.15. Tasa de erosión para los cuatro escenarios analizados en la Cuenca Huehuetán

RANGO	ESCENARIO 0:		ESCENARIO 1:		ESCENARIO 2:		ESCENARIO 3:	
	FEB DE 1990		FEB DE 1990		FEB DE 2005		NOV DE 2005	
	ÁREA		ÁREA		ÁREA		ÁREA	
(txha ⁻¹ año ⁻¹)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
00→05	41.96	13.21	37.74	11.88	29.79	9.38	37.73	11.88
05→10	15.98	5.03	13.72	4.32	16.11	5.07	13.72	4.32
10→50	43.83	13.80	37.41	11.78	32.64	10.28	40.17	12.65
50→200	90.56	28.52	85.79	27.01	78.82	24.82	64.65	20.36
200→500	63.09	19.87	66.27	20.87	63.41	19.97	57.47	18.10
500→1,000	25.89	8.15	32.35	10.19	34.58	10.89	39.07	12.30
> 1,000	36.27	11.42	44.30	13.95	62.23	19.60	64.77	20.39
SUMA	317.58	100.00	317.58	100.00	317.58	100.00	317.58	100.00

Cuadro 4.16. Tasa de erosión para los cuatro escenarios analizados en la Cuenca Coatlán

RANGO	ESCENARIO 0:		ESCENARIO 1:		ESCENARIO 2:		ESCENARIO 3:	
	FEB DE 1990		FEB DE 1990		FEB DE 2005		NOV DE 2005	
	ÁREA		ÁREA		ÁREA		ÁREA	
(txha ⁻¹ año ⁻¹)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
00→05	27.95	6.06	27.89	6.05	33.47	7.26	39.12	8.48
05→10	5.20	1.13	4.39	0.95	5.03	1.09	5.07	1.10
10→50	41.08	8.91	38.87	8.43	27.36	5.93	27.01	5.86
50→200	122.01	26.45	116.31	25.21	88.10	19.10	113.92	24.70
200→500	107.48	23.30	111.69	24.21	114.93	24.91	137.77	29.87
500→1,000	32.33	7.01	35.51	7.70	62.40	13.53	60.20	13.05
> 1,000	125.24	27.15	126.63	27.45	130.00	28.18	78.20	16.95
SUMA	461.29	100.00	461.29	100.00	461.29	100.00	461.29	100.00

4.3.2. CALIBRACIÓN DEL NÚMERO DE CURVA

4.3.2.1. Análisis de la precipitación en la Cuenca Huixtla

Primeramente se realizó el análisis del comportamiento histórico, anual y espacial de la precipitación en la Cuenca Huixtla, para tener claridad de su consistencia y sus

tendencias espaciales, considerando que los escurrimientos y, por lo tanto el N_c depende fundamentalmente de la precipitación.

Para el efecto se emplearon los datos de las estaciones meteorológicas del SMN y de las fincas cafetaleras ubicadas en el interior y aledañas a la superficie de la cuenca y que se listan en el cuadro 4.17, en el que se registran sus nombres, clave, ubicación a partir de sus coordenada UTM y elevación sobre el nivel medio del mar, el número de años con datos y la magnitud de la precipitación media anual (P_{ma}) para cada estación.

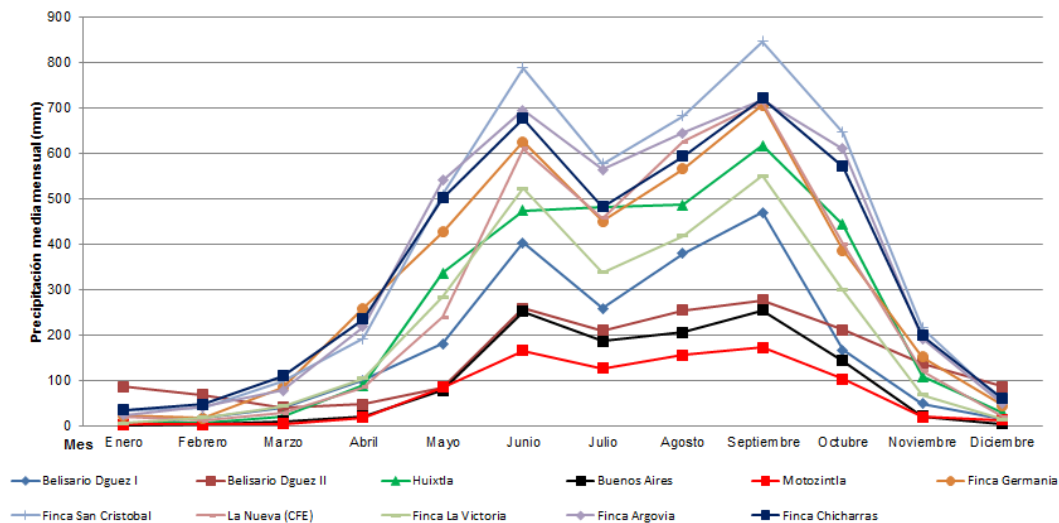
Cuadro 4.17. Características principales de las estaciones meteorológicas empleadas para el análisis de la precipitación de la Cuenca Huixtla

IDENTIF. DE LA ESTACIÓN		Coordenadas UTM			PERIODO DE DATOS		P_{ma} (mm)
NÚM.	NOMBRE	X	Y	Z	DE-A	AÑOS	
7077	HUIXTLA	555,181.223	1,674,028.933	40.00	1981-2010	29	3,099.50
7371	BELISARIO DOMÍNGUEZ II	569,782.772	1,691,612.216	850.00	1990-1999	9	1,769.30
7333	BUENOS AIRES	578,628.069	1,695,235.414	1,720.00	1980-2009	29	1,188.60
7119	MOTUZINTLA	580,703.210	1,698,745.407	1,210.00	1981-2010	29	873.10
7014	BELISARIO DOMÍNGUEZ I	568,885.363	1,692,531.333	731.00	1971-2000	29	1,958.20
7396	FINCA GERMANIA	570,265.173	1,679,937.731	1,214.00	1971-2000	29	3,741.40
7394	FINCA SAN CRISTOBAL	568,448.298	1,678,826.233	1,050.00	1981-2010	29	4,826.10
7095	LA NUEVA CFE	566,230.155	1,682,384.067	240.00	1962-1972	10	3,331.50
7395	FINCA LA VICTORIA	562,181.605	1,690,238.763	989.00	1981-2010	29	2,670.30
7012	FINCA ARGOVIA	575,301.914	1,672,456.151	620.00	1981-2010	29	4,375.70
7057	FINCA CHICHARRAS	581,418.240	1,673,183.178	1,328.00	1981-2010	29	4,233.30

Un análisis del comportamiento de la precipitación media mensual, de todos los años disponibles y para todas las estaciones incluidas se hace en la gráfica 4.1, en la que se muestra, que a pesar de la magnitud de los valores (más altos que en otras regiones), y de las diferencias entre unas y otras estaciones consideradas, las tendencia de la precipitación a lo largo del año es muy similar a la de otras zonas del país; es decir, que se tienen valores bajos en el invierno (diciembre, enero y febrero) y hasta marzo inclusive, siendo la temporada de lluvias de entre mayo y octubre, con máximos valores entre junio y septiembre, pero con una caída (que podría asimilarse a la sequía intraestival o canícula de las regiones áridas y semiáridas que dominan en país), sólo que aquí entre los meses de julio y agosto.

El análisis histórico de los datos de precipitación se hizo para los valores totales anuales de las 11 estaciones consideradas, graficándolos como se presenta en la gráfica 4.2, en la que además de los valores disponibles, se adicionó la gráfica de tendencias lineal. Las

gráficas muestran una clara tendencia en aumento de la precipitación de todas las estaciones, que al extrapolar los valores en los 47 años analizados implica valores del orden de 1,000 mm; ello implica también sin duda, más escurrimiento y explica el mayor poder erosivo del agua. Esto además indica que los parámetros que se emplean para evaluar el escurrimiento como el coeficiente de escurrimiento y el número de curva, deben evaluarse en el tiempo, o generar un esquema o modelo que permita actualizar su valor para estas variaciones de la precipitación, independientemente de las que tengan por efecto de las variaciones de los demás parámetros y del fenómeno erosivo.

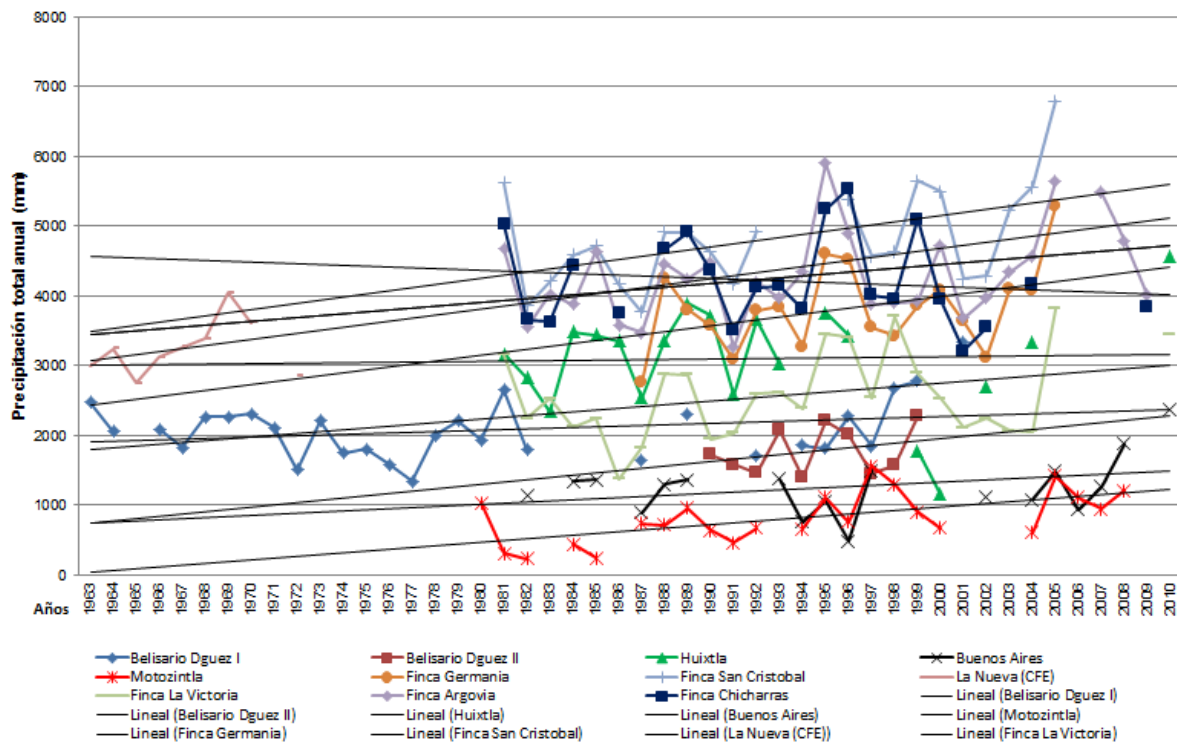


Gráfica 4.1. Comportamiento de la precipitación media mensual a lo largo del año en la Cuenca Huixtla

Para el análisis espacial, se consideraron los promedios anuales de todos los años para los que se tuvo información para todas y cada una de las estaciones, y se hizo la interpolación con el Método de Kriging empleando la extensión correspondiente del software Arc GIS, con lo que se obtuvo el PLANO 17 DE 28 PLANO DE ISOYETAS PARA LA CUENCA HUIXTLA.

De análisis de los valores de la precipitación media anual expuestos en el cuadro 4.17, y reforzado por el comportamiento de la variable mostrada gráficamente en el PLANO 17 DE 20, se puede observar que los valores menores de precipitación se presentan en la estación Motozintla seguido de la estación Buenos Aires, ambas ubicadas en la parte de sotavento de la Sierra Madre de Chiapas, aunque la segunda prácticamente en el parteaguas continental y de la cuenca, lo que muestra que, contra lo esperado y lo que a menudo se supone, en esta parte de la cuenca se tienen los valores mínimos y que aumentan a medida que se desciende hacia la población de Belisario Domínguez, en cuyo caso los valores son del orden de 1,773 y 1960 mm, e incrementándose hacia la

estación Victoria que, no obstante, estar a mayor elevación ya presenta valores de 2,670 mm, lo cual coincide completamente con lo reportado por López (2012).



Gráfica 4.2. Comportamiento histórico de la precipitación total anual en la Cuenca Huixtla

Si se parte de la zona más baja, topográficamente, de la cuenca analizada, representada por la estación Huixtla, ubicada en la cota media de la Ciudad de Huixtla, se tienen valores altos de precipitación, del orden de 3,100 mm y que crecen rápidamente hacia las cotas más altas, en principio sobre el cauce del Río Huixtla, pero sobre todo cuando se sigue el recorrido hacia la Finca La Nueva CFE, la Finca Germania y terminar en la estación de la Finca San Cristóbal, que teniendo la cota más alta de la zona, (sin exceder la cota más alta de la cuenca donde se localiza la estación Buenos Aires), se alcanza el máximo de la precipitación media anual con un valor medio del tiempo analizado de 4,530.70 mm.

Este análisis confirma lo expuesto por Arellano (2012), quien asevera que en cuencas costeras como las del Soconusco, que afirma que la configuración del relieve topográfico es el principal generador de la variabilidad espacial de la precipitación, de forma tal forma que, para el conocimiento de la variabilidad espacial de eventos extremos de lluvia y su influencia en la respuesta hidrológica de los procesos de lluvia-escurrimiento es fundamental en los estudios de riesgos de inundaciones.

4.3.2.2. Información de las estaciones de monitoreo

Para la estimación del número de curva a partir de datos medidos en campo, se ocuparon los registros de precipitación y escurrimiento determinados de los pluviógrafos y del aforador con limnógrafo instalados en los sitios de medición, en las cuatro nanocuenas, del proyecto de MONITOREO DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN, CHIAPAS, desarrollado bajo convenio de colaboración entre el Organismo de Cuenca Frontera Sur (OCFS) de la Comisión Nacional del Agua y la Universidad Autónoma Chapingo a través de su Departamento de Irrigación, en 2010 (CONAGUA Y UACH, 2010) y MONITOREO DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EROSIVOS EN LAS CUENCAS DE LOS RÍOS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN, EN LA COSTA DE CHIAPAS, desarrollado en el mismo esquema entre ambas Instituciones en 2011 (CONAGUA y UACH, 2010).

En el cuadro 4.18, se registran los datos relativos a la ubicación geográfica de los sitios de monitoreo en las 4 nanocuenas de estudios, así como el número de eventos para los que se dispuso de información y que fueron analizados, para cada una; se incluye asimismo la magnitud de la precipitación media anual (*Pma*, en mm); y, a manera de muestra para el caso de la Nanocuenca Rosita, en el cuadro 4.19 se presenta la forma como se sistematizó la información de campo para para todas ellas para su análisis.

La denominación de las variables y sus unidades, que se emplean en el cuadro 4.18 y en el análisis posterior se exponen en el cuadro 4.20. Así como los datos, los valores empleados u obtenidos para describir la metodología empleada para el análisis se muestran con detalle para la Nanocuenca Rosita, en tanto que los correspondientes a las demás nanocuenas se exponen en el Anexo 1. DATOS DE CAMPO Y RESULTANTES DEL ANÁLISIS PARA LAS NANOCUENCAS DE ESTUDIO.

Cuadro 4.18. Denominación y principales características de las sitios de medición pluviográfica e hidrométrica de las nanocuenas de estudio

NANO-CUENCA	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA				EVENTOS REGISTRADOS		<i>Pma</i> (mm)
	MUNICIPIO	LONGITUD ° ' "	LATITUD ° ' "	ALTITUD msnm	CANTIDAD	PERIODO	
Rosita	Huixtla	015 09 43	092 25 53	116	20	21MAY al 15SEP 2010	3,194
Brasil	B. Domínguez	014 45 32	092 23 36	741	4	30JUN al 30SEP 2010	1,774
Hannover	Tuzantán	015 10 34	092 23 00	613	83	01AGO al 31OCT 2011	4,694
Berriozábal	Motozintla	015 15 37	092 17 18	1,889	27	01AGO al 31AGO 2011	1,390

A partir de los pluviogramas obtenidos de los registros de campo, para cada evento, como el que se ilustra como ejemplo en la figura 4.39, para el evento del 20 de agosto de

4. MATERIALES Y MÉTODOS

2010 en la Nanocuenca Rosita, se determinó la lámina precipitada L_p para cada evento analizado.

Análogamente, y para cada uno de los limnigramas que se generaron para los eventos de escurrimiento correspondientes a los eventos de precipitación considerados, se determinó el gasto máximo $Q_{máx}$, y determinando el área bajo la curva de las gráficas así generadas, se obtuvieron los volúmenes de escurrimiento (V_e); a su vez, dividiendo este valor por el área de la nanocuenca (A_c) correspondiente y reportado en el cuadro 4.3, se calculó la lámina escurrida L_e aplicando la expresión 4.2. En la figura 4.40, se expone como muestra el limnigrama del evento del 10 de septiembre de 2010 para la Nanocuenca Rosita.

$$L_e = \frac{V_e}{A_c} \quad (4.2)$$

En el cuadro 4.19 para el caso de la Nanocuenca Rosita, el tiempo total T_t , se obtuvo de sumar el tiempo pico T_p y el tiempo de recesión T_r de acuerdo con la expresión 4.3.

$$T_t = T_p + T_r \quad (4.3)$$

En las gráficas que se exponen en la figura 4.42 se muestra el comportamiento simultáneo de la lámina precipitada (con sus valores debidamente ordenados por magnitud) y la lámina escurrida respectiva para las cuatro nanocuecas estudiadas.

Para las nanocuecas Rosita, Hannover y Berriozábal, se observa un comportamiento con una clara tendencia de incremento del escurrimiento con el aumento de la precipitación y un comportamiento directo y de tipo exponencial, no obstante con algunos valores que se salen de la tendencia general, y que suponen errores en la medición; en el caso de la Nanocuenca Brasil, si bien con un comportamiento directamente creciente de ambas variables, se observa una tendencia de disminución de los escurrimientos con el aumento de la precipitación en el último valor; lo cual sin embargo se debe, sin duda al reducido número de datos; se presume por lo tanto, que con un mayor número de datos la tendencia general se observaría como en los demás casos.

En las gráficas de la figura 4.43, por otra parte se expone la dependencia y correlación entre estas dos variables, y con la ayuda del Microsoft office Excel, se determinó que el tipo de expresión que mejor se ajusta para determinar la L_e a partir de la L_p es la polinómica o polinomial cuya forma precisa se incluye en el cuadro 4.21, con sus respectivos parámetros de correlación (R^2), el cual resultó poco significativo para las Nanocuecas Rosita, Hannover y Berriozábal, con 0.45, 0.62 y 0.49, respectivamente; y la más grande y prácticamente de 1.0 para la Nanocuenca Brasil, que se explica, nuevamente por el escaso número de pares de valores.

Cuadro 4.19. Valores calculados del gasto, volumen, lámina escurrida y lámina precipitada para la Nanocuenca Rosita

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
NÚM. DE EVENTO	FECHA	$Q_{máx}$	H_i	H_t	T_p	T_r	T_t	V_e	L_e	L_p
	(dd.mm.aa)	(L/s)	(h:min)	(h:min)	(min)	(min)	(min)	(m ³)	(mm)	(mm)
1	01.07.10	189.60	20:17	03:17	27	393	420	532.80	11.41	27.00
2	09.07.10	85.40	22:25	01:55	75	135	210	240.85	5.16	16.80
3	13.07.10	326.67	19:00	03:30	231	279	510	1,427.50	30.57	59.40
4	21.07.10	51.33	20:07	03:55	57	411	468	183.22	3.92	42.30
5	27.07.10	11.78	20:45	22:30	45	60	105	25.93	0.56	14.50
6	30.07.10	91.00	19:57	00:15	24	234	258	209.11	4.48	15.60
7	04.08.10	185.07	01:40	09:10	45	405	450	753.08	16.13	54.60
8	05.08.10	33.09	21:30	23:15	24	81	105	79.58	1.70	21.50
9	07.08.10	25.48	23:44	01:20	54	42	96	69.44	1.49	36.80
10	09.08.10	212.00	16:24	17:15	18	33	51	286.32	6.13	18.30
11	10.08.10	241.90	22:51	00:06	15	60	75	152.46	3.26	47.70
12	11.08.10	14.72	13:45	14:24	15	24	39	15.99	0.34	35.50
13	17.08.10	10.22	16:15	16:51	24	12	36	8.40	0.18	21.60
14	18.08.10	185.07	15:33	17:15	42	60	102	274.24	5.87	40.40
15	19.08.10	4.59	21:39	22:03	12	12	24	1.65	0.04	16.10
16	22.08.10	138.65	16:39	17:30	9	42	51	145.11	3.11	37.80
17	01.09.10	38.08	19:45	20:30	12	33	45	36.55	0.78	30.60
18	11.09.10	51.33	16:48	17:30	18	24	42	50.05	1.07	31.00
19	12.09.10	133.30	16:24	18:00	12	84	96	265.09	5.68	29.10
20	14.09.10	39.95	19:05	19:35	24	6	30	28.77	0.62	27.30
	Promedio	103.46			39.15	121.50	160.65	239.31	5.12	31.20
	Máximo	326.67			231.00	411.00	510.00	1,427.50	30.57	59.40
	Mínimo	4.59			9.00	6.00	24.00	1.65	0.04	14.50

Es más relevante referir que el tipo de expresión, representa una forma parabólica cóncava e implica que para magnitudes pequeñas de precipitación, el escurrimiento es decreciente, lo cual es perfectamente compatible con todas las referencias relacionadas, en particular con lo expresado por (Arellano, 2012), que las abstracciones son mayores, representadas mayormente por la infiltración, que significa una reducción del

4. MATERIALES Y MÉTODOS

escurrimiento; ese comportamiento cambia a partir de eventos con magnitudes del orden de 25 mm de precipitación.

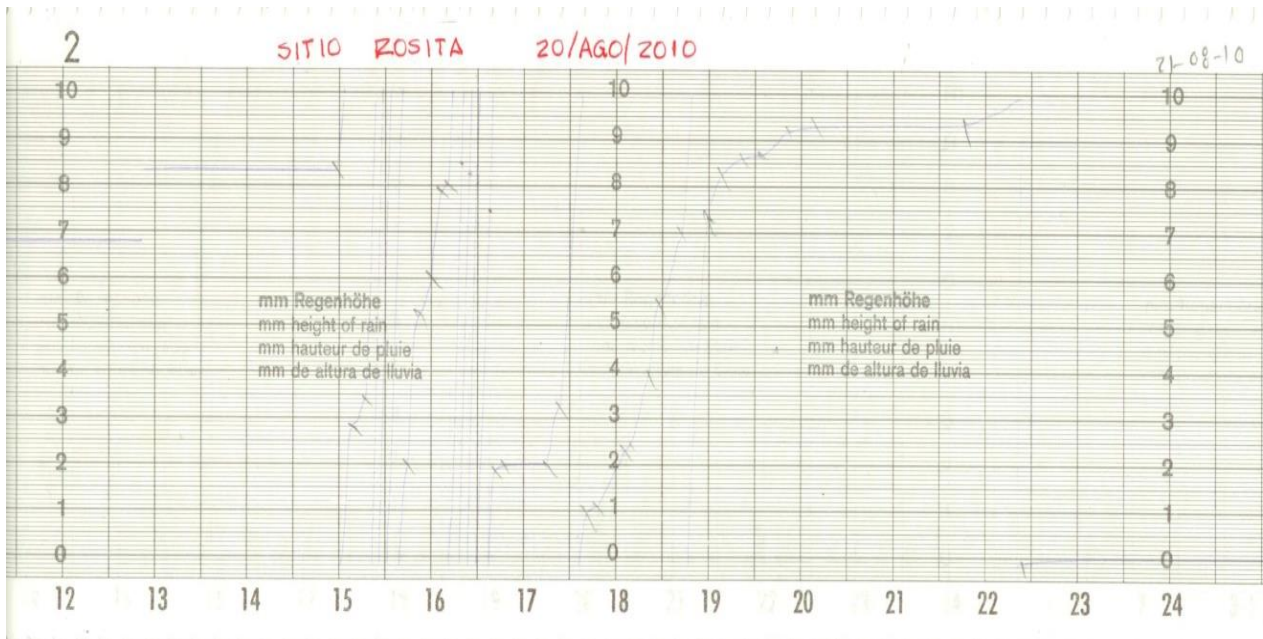


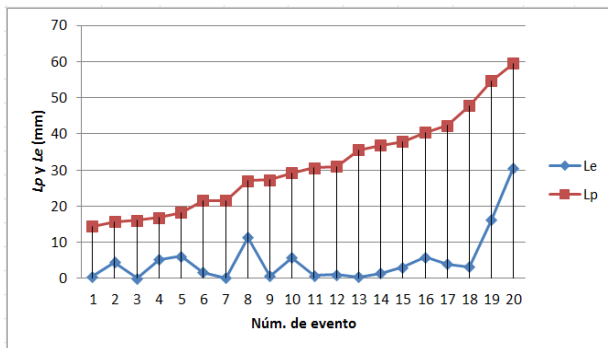
Figura 4.40. Muestra de pluviograma (del evento de 20 de agosto) para la nanocuenca Rosita que se procesaron para obtener las láminas precipitadas



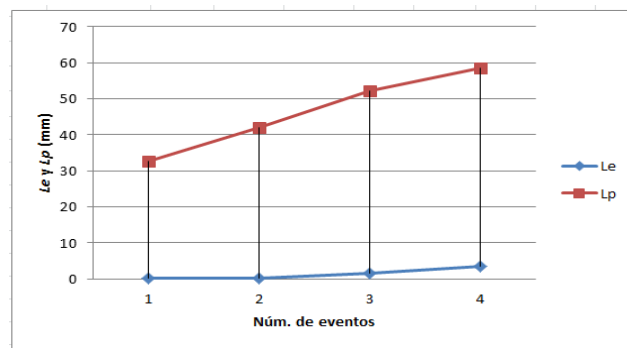
Figura 4.41. Muestra de un limnigrama en la nanocuenca Finca Brasil que se procesó para obtener las láminas escurridas

Cuadro 4.20. Denominación, símbolo y unidad de las variables empleadas en el cuadro 4.19 y en el análisis de los datos reportados en él

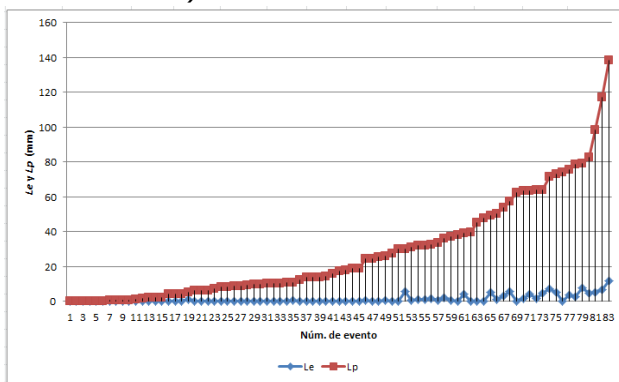
VARIABLE	DESCRIPCIÓN	UNIDAD
$Q_{máx}$	Gasto máximo escurrido	L/s
H_i	Hora de inicio de la tormenta	h:min
H_t	Hora de término de la tormenta	h:min
T_p	Tiempo pico	min
T_r	Tiempo de recesión	min
T_t	Tiempo total	h
V_e	Volumen escurrido	m ³
L_e	Lámina escurrida	mm
L_p	Lámina precipitada	mm
C_e	Coefficiente de escurrimiento	%
ND	Dato no disponible	



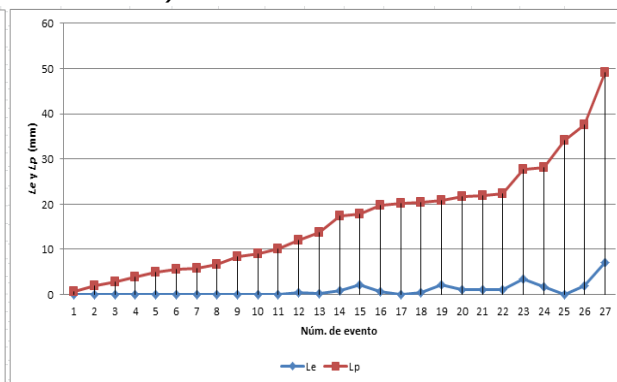
a) Nanocuenca Rosita



b) Nanocuenca Finca Brasil



c) Nanocuenca Hannover



d) Nanocuenca Berriozábal

Figura 4.42. Comportamiento simultáneo de la lámina precipitada (L_p) y de la lámina escurrida (L_e) para las cuatro nanocuenclas estudiadas

4. MATERIALES Y MÉTODOS

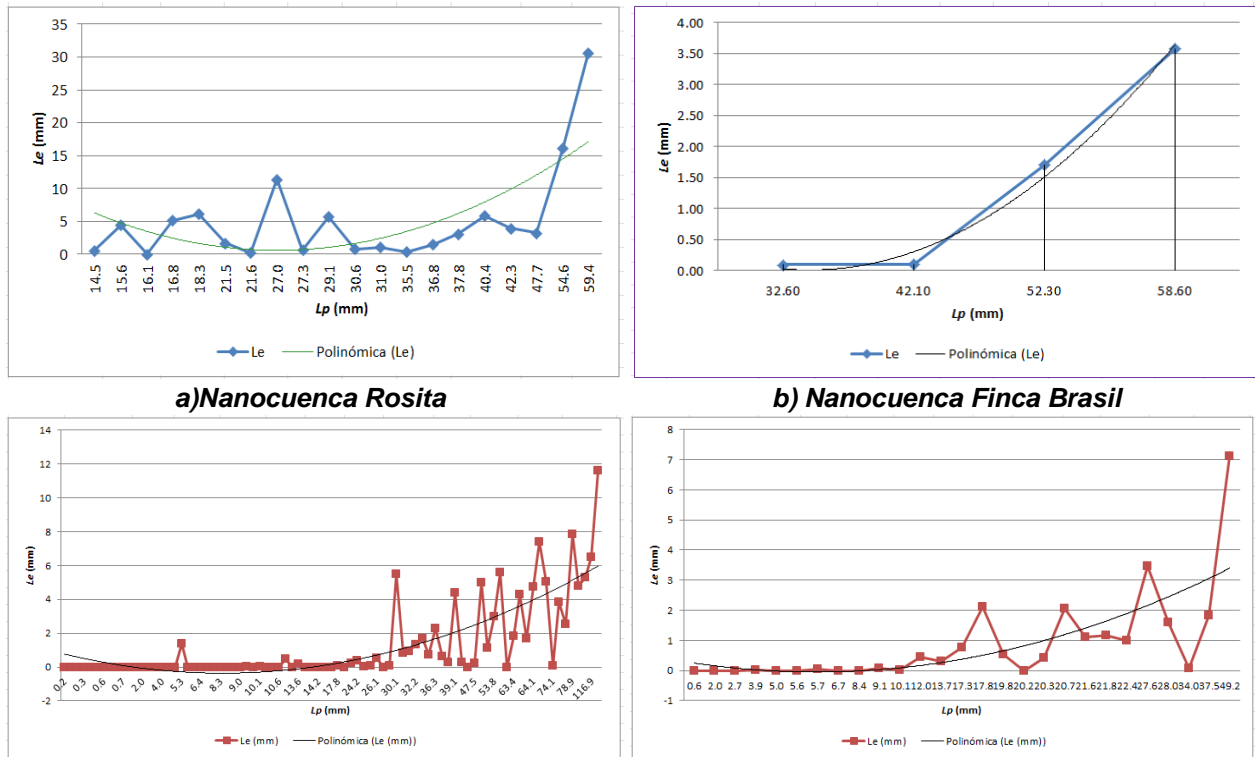


Figura 4.43. Correlación de la lámina escurrida (Le) y la lámina precipitada (Lp) para las cuatro nanocuencas estudiadas

Cuadro 4.21. Expresiones del tipo polinomial y grado de correlación entre la lámina escurrida (Le) y la lámina precipitada (Lp) para las cuatro nanocuencas estudiadas

NANOCUENCA	EXPRESIÓN	COEF. DE CORRELACIÓN	NÚM. DE EXPRESIÓN
Rosita	$Le = 0.115Lp^2 - 1.843Lp + 7.973$	$R^2 = 0.45$	(4.4)
Brasil	$Le = 0.461Lp^2 - 1.115Lp + 0.676$	$R^2 = 0.99$	(4.5)
Hannover	$Le = 0.002Lp^2 - 0.097Lp + 0.861$	$R^2 = 0.62$	(4.6)
Berriozábal	$Le = 0.008Lp^2 - 0.119Lp + 0.361$	$R^2 = 0.49$	(4.7)

4.3.2.3. Determinación del número de curva de los datos de campo

Aplicando la expresión 2.56, deducida por Hawkins (1993) para la determinación o calibración en campo de los Números de Curva, se calculó el parámetro de retención S_r ,

sustituyendo en ella, la precipitación media Pm por la lámina precipitada Lp de la columna (11) del cuadro 4.19 y la lámina Q por la lámina escurrida Le de la columna 10 de los cuadros 4.19 y 4.20, para quedar como expresión 4.8.

$$Sr = 5 \left[Lp + 2Le - (4Le^2 + 5Lp \times Le)^{0.5} \right] \quad (4.8)$$

Aplicando los valores de Sr para cada evento, en la expresión 2.30, se obtuvieron los valores del número de curva Nc , para cada uno, mismos que se tabulan en el cuadro 4.22 para la Nanocuenca Rosita, que se sigue como ejemplo; en este cuadro, como en los siguientes relacionados con los eventos listados en el cuadro 4.19, se dejaron los números consecutivos de la columna (1) que los identifica, se repiten los requeridos (en este caso los de Le [columna 10] y Lp [columna 11]) para los cálculos que se muestran y los respectivos resultados obtenidos en cada uno. Estos valores, se consideran como los reales o base para la calibración ya que se calcularon con datos de campo. Los cuadros con los datos y cálculos correspondientes para las nanocuecas Brasil, Hannover y Berriozábal, se incluyen en el Anexo.

En el cuadro 4.23, se muestran los valores máximo, promedio y mínimo del Nc para las cuatro Nanocuecas analizadas. De los valores de este cuadro, se puede decir que para el caso de la Nanocuenca Rosita, los Nc , varían de 64.2 a 93.0 que implica una variación muy amplia de 28.8, con media de 78.8; para la Nanocuenca Finca Brasil, la variación es mínima con 6.3 unidades, entre los valores de 63.7 y 57.4, con un promedio de 60.4; para la Nanocuenca Hannover la variación es de 57.2 unidades (entre 42.4 y 99.6) con una media de 76.2; en tanto que para la Nanocuenca Berriozábal, la variación es entre 62.5 y 98.8 con 36.3 unidades, con una media 83.6.

Por otra parte, para encontrar la asociación entre el Nc y la Lp se generaron las gráficas que se incluyen en la figura 4.44 y las ecuaciones de correlación que se listan en el cuadro 4.24 para las cuatro nanocuecas.

Todas las expresiones resultaron ser, nuevamente polinomiales y la que mejor correlación tuvo fue la de Hannover con 0.94, seguida de Berriozábal y; la de menor R^2 fue la de Rosita con 0.41, que sin embargo, observando la gráfica, se puede concluir que resulta de la variabilidad de los valores medidos respecto a los estimados por la función, porque el comportamiento general es adecuadamente descrito por la función polinomial generada.

En contraste, no obstante el valor aceptable de $R^2 = 0.78$ para Finca Brasil, la forma de la gráfica genera incertidumbre para aplicar la función determinada; ello sin duda se debe al escaso número de datos por lo que se obtienen grandes valores de R^2 y a los ajustes gráficos que se observan para Hannover y Berriozábal, que tienen el mayor número de eventos analizados.

Cuadro 4.22. Valores calculados del número de curva N_c a partir de datos de campo para la Nanocuenca Rosita

(1)	(10)	(11)	(13)	(14)
NÚM. DE EVENTO	L_e	L_p	S_r	N_c
	(mm)	(mm)	(adim)	(adim)
1	11.41	27.00	22.11	92.0
2	5.16	16.80	19.43	92.9
3	30.57	59.40	36.64	87.4
4	3.92	42.30	101.46	71.5
5	0.56	14.50	45.85	84.7
6	4.48	15.60	19.16	93.0
7	16.13	54.60	65.39	79.5
8	1.70	21.50	54.75	82.3
9	1.49	36.80	114.84	68.9
10	6.13	18.30	19.45	92.9
11	3.26	47.70	127.86	66.5
12	0.34	35.50	141.79	64.2
13	0.18	21.60	87.69	74.3
14	5.87	40.40	78.78	76.3
15	0.04	16.10	72.41	77.8
16	3.11	37.80	94.98	72.8
17	0.78	30.60	105.56	70.6
18	1.07	31.00	100.39	71.7
19	5.68	29.10	47.76	84.2
20	0.62	27.30	96.40	72.5

4.3.2.4. Determinación y ajuste del número de curva de las tablas del SCS

A. Determinación del N_{c2}

A partir de las definiciones de las características de cubierta vegetal, concentrada en el cuadro 4.25, el uso del suelo, la condición hidrológica y el grupo hidrológico de los suelos de las nanocuenca, definidas en el tema 4.2.2, y sintetizadas en el cuadro 4.26 y de la tabla 2.6 o 2.7 se determinaron los valores de tablas que corresponden con el N_{c2} , para las cuatro Nanocuenca.

Cuadro 4.23. Valores estadísticos de los calculados del número de curva N_c a partir de datos de campo para las cuatro nanocuenas estudiadas

NANOCUENCA	(1)	(10)	(11)	(13)	(14)
	ESTADÍSTICO	L_e	L_p	S_r	N_c
		(mm)	(mm)	(adim)	(adim)
Rosita	Máximo	30.6	59.4	141.8	93.0
	Promedio	5.1	31.2	72.6	75.7
	Mínimo	0.0	14.5	19.2	64.2
Brasil	Máximo	3.6	58.6	188.5	63.7
	Promedio	1.4	46.4	166.9	60.4
	Mínimo	0.1	32.6	144.5	57.4
Hannover	Máximo	11.6	138.5	345.7	99.6
	Promedio	1.3	28.6	97.7	76.2
	Mínimo	0.0	0.2	1.0	42.4
Barriozábal	Máximo	7.1	49.2	152.3	98.8
	Promedio	0.9	16.4	53.2	83.6
	Mínimo	0.0	0.6	3.0	62.5

Cuadro 4.24. Expresiones del tipo polinomial y grado de correlación entre el Número de Curva N_c y la lámina precipitada L_p , para las 4 nanocuenas estudiadas

NANOCUENCA	EXPRESIÓN	COEF. DE CORRELACIÓN	NÚM.
Rosita	$N_c = 0.115L_p^2 - 3.224L_p + 96.200$	$R^2 = 0.41$	(4.9)
Brasil	$N_c = 0.1884L_p^2 - 10.043L_p + 71.407$	$R^2 = 0.78$	(4.10)
Hannover	$N_c = 0.002L_p^2 - 0.514L_p + 102.030$	$R^2 = 0.94$	(4.11)
Berriozábal	$N_c = 0.004L_p^2 - 1.105L_p + 97.928$	$R^2 = 0.82$	(4.12)

De dichas condiciones, resultó complicado definir el grupo hidrológico, que se ubica entre los B y C, pero, considerando los definidos por Castillo (2010), Juárez *et al.* (2010) y Arellano (2012) para la región, se adoptó la condición C, para Rosita y Brasil, resultando los valores de N_c compatibles con los propuestos por Campos (2010); en el cuadro 2.8,

4. MATERIALES Y MÉTODOS

para bosque de condición normal o *Et* media Normal o *Et* media y grupo hidrológico C, para el que corresponde con N_c de 70 para Finca Brasil. Los valores resultantes para las cuatro nanocuenas se listan en la última columna del cuadro 4.24 y se denominó N_{c2} .

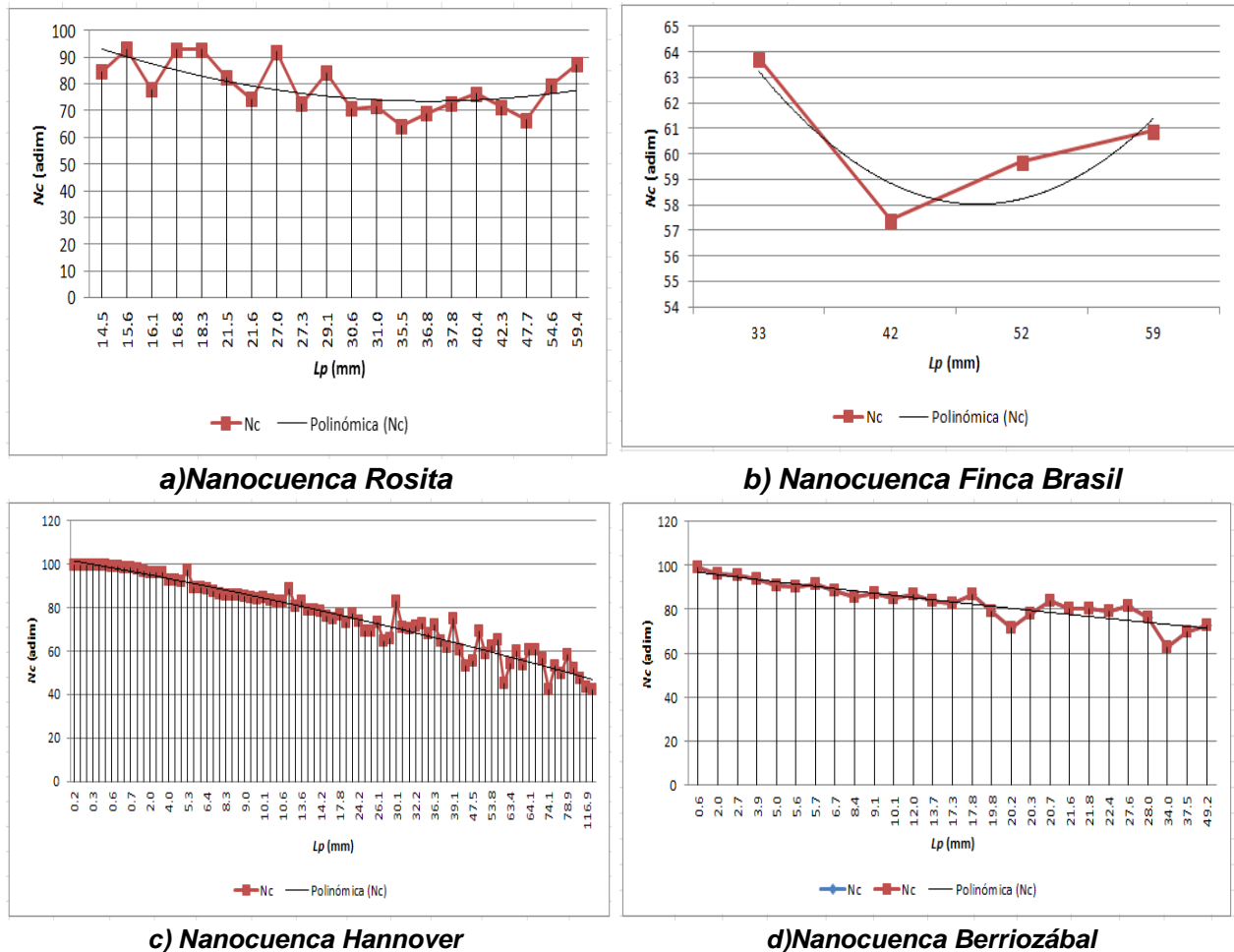


Figura 4.43. Correlación entre el número de curva (N_c) y la lámina precipitada (L_p) para las cuatro nanocuenas estudiadas

B. Corrección por humedad antecedente

Para el ajuste del N_c para cada evento y para las cuatro nanocuenas, por la condición de humedad antecedente (HA) se empleó la expresión 2.36 (del SCS) para el cálculo de N_{c1} y la 2.37 (también del SCS) para la N_{c3} , según correspondió y considerando como N_{c2} , la obtenida de tablas y determinada en el inciso anterior. Previamente, se definió la existencia de humedad antecedente de los cinco días previos a la ocurrencia de cada evento, (HA_5) y su magnitud, la cual se expone en la columna 16 del cuadro 4.25 calculando N_{c1} cuando HA_5 resultó menor de 50 mm y la N_{c3} cuando resultó mayor de 50 mm. Con la finalidad de comparar los resultados que generan, se evaluó también la N_{c1} o

Nc_3 según correspondió, aplicando las expresiones de 2.38 y 2.39, propuestas por Chow *et al.*, citados por Muzik (2002) y la 2.40 y 2.41, reportadas por Dal-Ré (2003), respectivamente.

Cuadro 4.25. Tipo de cubierta vegetal definida para las nanocuenca para definir sus correspondientes números de curva a partir de la tabla 2.6 o 2.7

NANOCUENCA	CUBIERTA VEGETAL	CUBIERTA DE ACUERDO CON EL CUADRO 2.6/ 2.7
Rosita	Pastizales altos con arbustos (acahual) en un 86.6 % y bosque de especies diversas en las zonas aledañas al cauce (13.4 %)	Tierras forestales, césped o huertos siempre verdes o deciduos
Brasil	Tierras forestales siempre verdes o deciduos, con fase inferior baja pero con arroyo y cobertura completa	Bosque bueno: protegido del pastoreo de manera que el suelo siempre está cubierto de arroyo y arbustos
Hannover	Café bajo sombra	Bosque espeso con alta evapotranspiración para condiciones hidrológicas de suelo entre C y D
Berriozábal	Maíz sembrado en surco y en buenas condiciones hidrológicas en un 56 % de su superficie y de tipo acahual en el restante 44 % de la superficie	Surcos continuos

Cuadro 4.26. Determinación del número de curva de tablas (Nc_2) para las nanocuenca a partir de sus características y de las tablas del SCS y Arellano (2012)

NANOCUENCA	USO DEL SUELO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	GRUPO HIDROLÓGICO	Nc_2 (Adim)
Rosita	Pastizal con bosque	Buena	Entre B y C	72
Brasil	Bosque ralo de cedro	Buena	C	70
Hannover	Café en sombra	Buena	B y C	63 Arellano (2012)
Berriozábal	Acahual (44.0 %)	Buena	B y C $\Rightarrow Nc_2 = 63$	71
	Maíz (56.0 %)	Buena	B $\Rightarrow Nc_2 = 78$	

Continuando con el ejemplo, los resultados de estos cálculos para la Nanocuenca Rosita, se incluyen en el cuadro 4.27 y los estadísticos para los eventos analizados de las 4 nanocuenca en el cuadro 4.28; los resultados correspondientes a las nanocuenca Brasil, Hannover y Berriozábal se incluyen en los cuadros A.7, A.8 y A.9, respectivamente del Anexo. En estos cuadros, T_a es el tiempo transcurrido entre eventos analizados en

4. MATERIALES Y MÉTODOS

días, y HA_5 es la magnitud de la humedad antecedente correspondiente al Ta respectivo; cuando Ta resultó menor de 5 días y/o la HA resultó menor de 50 mm, se calculó Nc_1 , y en caso contrario se calculó Nc_3 con las tres fórmulas indicadas. La columna 17 de dichos cuadros, registra el valor del Nc de tablas (denominado Nc_2) y en la 18, se anota si, se calculó el Nc_1 o el Nc_3 según la circunstancia definida en el párrafo anterior; y en las columnas 19, 20 y 21 los valores de Nc_1 , calculados con las expresiones 2.36, 2.38 o 2.40 o los de Nc_3 , obtenidos con las expresiones 2.37, 2.39 o 2.40, según correspondió, de acuerdo con los descrito en los párrafos anteriores.

Cuadro 4.27. Cálculo de la corrección del Nc por la condición de humedad antecedente para la Nanocuenca Rosita

(1)	(2)	(11)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
NÚM. DE EVENTO	FECHA (dd.mm.aa)	L_p (mm)	Nc (adim)	Ta (día)	HA_5 (mm)	Nc_2 (adim)	Nc_1 o Nc_3			
							DEFINI- CIÓN	SCS	Chow	Dal-Ré
								(adim)	(adim)	(adim)
1	01.07.10	27.0	92.0	0	0.0	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
2	09.07.10	16.8	92.9	9	27.0	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
3	13.07.10	59.4	87.4	4	16.8	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
4	21.07.10	42.3	71.5	8	59.4	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
5	27.07.10	14.5	84.7	6	42.3	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
6	30.07.10	15.6	93.0	3	14.5	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
7	04.08.10	54.6	79.5	5	15.6	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
8	05.08.10	21.5	82.3	1	54.6	72	$Nc_3=$	86.9	85.5	85.8
9	07.08.10	36.8	68.9	2	76.1	72	$Nc_3=$	86.9	85.5	85.8
10	09.08.10	18.3	92.9	1	262.0	72	$Nc_3=$	86.9	85.5	85.8
11	10.08.10	47.7	66.5	1	225.7	72	$Nc_3=$	86.9	85.5	85.8
12	11.08.10	35.5	64.2	1	233.5	72	$Nc_3=$	86.9	85.5	85.8
13	17.08.10	21.6	74.3	6	0.0	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
14	18.08.10	40.4	76.3	1	21.6	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
15	19.08.10	16.1	77.8	1	62.0	72	$Nc_3=$	86.9	85.5	85.8
16	22.08.10	37.8	72.8	2	200.2	72	$Nc_3=$	86.9	85.5	85.8
17	01.09.10	30.6	70.6	9	0.0	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
18	11.09.10	31.0	71.7	10	0.0	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
19	12.09.10	29.1	84.2	1	31.0	72	$Nc_1=$	53.4	51.9	53.0
20	14.09.10	27.3	72.5	2	60.1	72	$Nc_3=$	86.9	85.5	85.8

En el cuadro 4.28, se exponen, para las cuatro nanocuenas, los valores de Nc_1 (que coincidió con el mínimo) o Nc_3 (que correspondió con el máximo) y el valor medio que considera todos los casos en que se calculó uno y otro, de ahí que no coincida con los valores promedio de los extremos.

Cuadro 4.28. Valores extremos y medios de la corrección del Nc por la condición de humedad antecedente para las cuatro Nanocuenas estudiadas

(1)	(2)	(11)	(14)	(15)	(16)	(17)	(19)	(20)	(21)
NANO-CUENCA	VARIABLE	L_p	Nc	T_a	HA_5	Nc_2	Nc_1 o Nc_3		
	(dd.mm.aa)	(mm)	(adim)	(día)	(mm)	(adim)	SCS	Chow	Dal-Ré
							(adim)	(adim)	(adim)
Rosita	Nc_3 (Máximo)	59.4	93.0	10.0	112.9	72.0	86.9	85.5	85.8
	Media	31.2	78.8	3.8	41.7	72.0	68.5	67.0	67.7
	Nc_1 (Mínimo)	14.5	64.2	0.0	0.0	72.0	53.4	51.9	53.0
Brasil	Nc_3 (Máximo)	58.6	63.7	6.00	100.70	70.0	85.7	84.3	84.5
	Media	46.4	60.4	2.25	61.28	70.0	77.0	75.6	76.0
	Nc_1 (Mínimo)	32.6	57.4	0.00	42.10	70.0	51.2	49.5	50.6
Hannover	Nc_3 (Máximo)	138.5	99.6	6.0	322.4	63.0	80.8	79.7	80.0
	Media	28.6	76.2	1.1	126.0	63.0	74.1	72.8	73.2
	Nc_1 (Mínimo)	0.2	42.4	0.0	0.0	63.0	43.6	41.7	42.7
Berriozábal	Nc_3 (Máximo)	49.2	98.8	3.0	117.0	71.4	86.6	85.2	85.4
	Media	16.4	83.6	1.1	60.0	71.4	75.3	73.8	74.3
	Nc_1 (Mínimo)	0.6	62.5	0.0	0.0	71.4	52.7	51.2	52.3

Resalta de inmediato en estos cuadros que, debido a que tanto Nc_1 como el Nc_3 , dependen únicamente de Nc_2 y no propiamente de la HA , para todos los casos, sólo se distingue un valor de Nc_1 y uno para Nc_3 para cada nanocuenca y son valores diferentes para las tres fórmulas empleadas; pero es de notar que en los promedios de los tres son muy similares, siendo más idénticos entre sí, los resultados de las expresiones de Chow (columna 20) y las reportadas por Dal-Ré (columna 21); las mayores diferencias entre ecuaciones se dan entre la del SCS y Chow con 0.5 unidades para Nc_3 y 0.6 unidades para Nc_1 ; las menores diferencias resultaron entre la expresión atribuida a Chow y la reportada por Dal-Ré, de 0.1 unidades en promedio para Nc_3 y 0.4 unidades para Nc_1 ; por otra parte, las variaciones entre los extremos máximo-mínimo ($Nc_3 - Nc_1$) en promedio es de 34.7, siendo la mayor de 38.0 para la Nanocuenca Hannover calculada con la expresión de Chow.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Así, como conclusión se tiene que, a partir de los datos de las cuatro nanocuenas, se puede asumir que las tres expresiones empleadas, calculan adecuadamente o al menos similarmente, la corrección por humedad antecedente.

C. Corrección por pendiente

Como los valores de la pendiente de las nanocuenas son mucho mayores de 5% para la que se recomienda emplear el Nc_2 de tablas, con $Sc = 23.84 \%$ para la Nanocuenca Rosita, $Sc = 41.24 \%$ para la Finca Brasil, $Sc = 23.76 \%$ para la Hannover y $Sc = 33.15 \%$ para la Berriozábal, se hizo el cálculo de la corrección del Nc por pendiente, aplicando la expresión 2.45, para obtener la NC_{2S} , no obstante que se verificó que sólo aplica para valores de Sc de hasta 40.0 % aproximadamente, según se discute en el tema 4.3.5.

Como esta expresión sólo considera el Nc_3 para el cálculo y no presenta opción para cuando se tiene Nc_1 por corrección debida a humedad antecedente, cuando éste fue el caso, se empleó la expresión 2.45 sustituyendo Nc_3 por Nc_1 para calcular el NC_{2S} para los casos en que la humedad antecedente fue menor de 60 mm y se calculó el Nc_1 ; los valores obtenidos para ambos casos, se reportan en la columna 24 del cuadro 4.29 para el ejemplo con la Nanocuenca Rosita; no obstante, para este caso, se calculó también el NC_{2S} aplicando tal cual la expresión 2.45, obteniéndose los valores que se listan en la columna 23 de dicho cuadro para los casos en que aplica; y para fines comparativos y continuar con el ejercicio de su valoración, se calcularon también los valores de NC_{2S} a partir de los valores de Nc_1 o Nc_3 con las expresiones propuestas por Chow y Dal-Ré, cuyos resultados se muestran en las columnas 25 y 26, respectivamente del cuadro referido.

Los resultados detallados correspondientes para las nanocuenas Brasil, Hannover y Berriozábal, se exponen en los cuadros A.10, A.11 y A.12 del Anexo, respectivamente y los valores, máximo, medio y mínimo de cada columna de los cuadros para las cuatro nanocuenas se exponen en el cuadro 4.30.

Del análisis de la parte de las correcciones por pendiente de dicho cuadro, se observa que los valores obtenidos son completamente similares para las tres expresiones empleadas para calcular Nc_1 , considerando que la expresión del SCS se emplea Nc_1 en lugar de Nc_3 (con diferencias de entre -0.4 y +0.6 unidades), pero los valores asociados a las tres expresiones, resultan menores en 10.4, 12.0, 12.6 y 10.8 unidades respecto de los valores obtenidos la expresión del SCS aplicando Nc_3 para la corrección, y para las nanocuenas Rosita, Brasil, Hannover y Berriozábal, respectivamente.

4.3.2.5. Determinación y ajuste del número de curva de las tablas del SCS

Por último, se calcularon los valores de números de curva corregidos por humedad antecedente y por pendiente Nc_{1S} o Nc_{3S} , (es decir, los valores finales de Nc que deben

compararse con los obtenidos de campo), empleando las expresiones 2.46 o 2.47, según se calculó Nc_1 o Nc_3 como valor corregido por humedad antecedente, respectivamente; los resultados correspondientes se listan en las columnas 27 y 28 del mismo cuadro 4.29 para la Nanocuenca Rosita y los estadísticos (máximo, medio y mínimo) para las cuatro nanocuecas, en las columnas equivalentes del cuadro 4.30. Y para completar el ejemplo con los valores de Nc_{2S} calculados con las expresiones propuestas por Chow y Dal-Ré, se calcularon también los valores correspondientes de Nc_{1S} y Nc_{3S} , con las expresiones 2.38 y 2.39, para el primero y 2.40 y 2.41 para el segundo, respectivamente, sustituyendo Nc_2 por Nc_{2S} ; los valores resultantes se reportan en las columnas 29 y 30 de ambos cuadros, según corresponde.

Cuadro 4.29. Valores de Nc corregidos por pendiente ($Sc = 23.87\%$) y por humedad antecedente para la Nanocuenca Rosita

(1)	(18)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)
NÚM. DE EVENTO	Nc_1 o Nc_3	Nc_{2S}				Nc_{1S} o Nc_{3S}			
	DEFINICIÓN	Nc_{2S3}	SCS	Chow	Dal-Ré	SCS_3	SCS	Chow	Dal-Ré
		adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)
1	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	44.7	46.1
2	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	44.7	46.1
3	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	44.7	46.1
4	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	76.6	76.2	76.2		89.7	88.0	88.2
5	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	46.6	47.0
6	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	46.6	47.0
7	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	46.6	47.0
8	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	76.6	76.2	76.2		89.7	88.0	88.2
9	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	76.6	76.2	76.2		89.7	88.0	88.2
10	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	76.6	76.2	76.2		89.7	88.0	88.2
11	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	76.6	76.2	76.2		89.7	88.0	88.2
12	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	76.6	76.2	76.2		89.7	88.0	88.2
13	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	46.6	47.0
14	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	46.6	47.0
15	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	76.6	76.2	76.2		89.7	88.0	88.2
16	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	76.6	76.2	76.2		89.7	88.0	88.2
17	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	46.6	47.0
18	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	46.6	47.0
19	$Nc_1=$	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	46.6	47.0
20	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	76.6	76.2	76.2		89.7	75.0	75.1

Cuadro 4.30. Valores promedios de los N_c corregidos por pendiente y por humedad antecedente para las cuatro Nanocuenas estudiadas

(1)	(2)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)
NANOCUENCA	VARIABLE	N_{c2s}				N_{c1s} o N_{c3s}			
		N_{c2s3}	SCS	Chow	Dal-Ré	SCS_3	SCS	Chow	Dal-Ré
		(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)
Rosita	N_{c3} (Máximo)	76.6	76.6	76.2	76.2	75.4	89.7	88.0	88.2
	Media	76.6	70.9	70.5	70.7	75.4	66.3	64.2	65.1
	N_{c1} (Mínimo)	76.6	66.3	65.8	66.2	75.4	47.1	44.7	46.1
Brasil	N_{c3} (Máximo)	75.2	75.2	74.7	74.8	74.0	89.7	88.0	88.2
	Media	75.2	72.3	71.9	72.0	74.0	73.2	71.2	71.9
	N_{c1} (Mínimo)	75.2	63.8	63.2	63.6	74.0	47.1	44.7	46.1
Hannover	N_{c3} (Máximo)	68.8	68.9	68.6	68.6	67.5	84.8	83.3	83.5
	Media	68.8	66.7	66.3	66.4	67.5	76.3	61.7	61.8
	N_{c1} (Mínimo)	68.8	56.5	55.9	56.3	67.5	37.1	34.9	36.2
Berriozábal	N_{c3} (Máximo)	76.3	76.3	75.9	76.0	75.2	89.5	87.9	88.1
	Media	76.3	76.3	72.7	72.2	75.2	75.0	73.1	73.8
	N_{c1} (Mínimo)	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.0

En las gráficas de la figura 4.45 se muestran los valores obtenidos de corregir los N_c de tablas por humedad antecedente con las expresiones de las tres referencias analizadas y por pendiente, para las cuatro nanocuenas estudiadas, y en el cuadro 4.31 se listan los errores o diferencias entre los valores promedio de tablas y corregidos por ambos conceptos con respecto a los valores obtenidos con los datos de campo, para las 4 nanocuenas, de las que se derivan el análisis y conclusiones que siguen. Dichas diferencias, que también se pueden traducir como errores para los valores de N_c de todos los eventos analizados y para las 4 nanocuenas se incluyen en el Anexo, en los cuadros A.13, A.14, A.15 y A.16.

De las gráficas y de los cuadros correspondientes de las diferencias, se observan comportamientos diferentes para cada Nanocuenca. Es pertinente referir que las gráficas están construidas con los valores ordenados de lámina precipitada (L_p) que es la variable inicial y que fue medida en campo, de ahí que, a pesar de la variabilidad, de los datos, se observen ciertas tendencias.

Para el caso de la Nanocuenca Rosita, los valores de N_c varían de 64.2 a 93.0 y los que más cercanos se comportan son los calculados con la fórmula del SCS cuando se calcula

la corrección por humedad antecedente empleando la Nc_3 , es decir cuando se tiene y se considera humedad antecedente mayor de 50 mm, que es lo más común en el área. Para la Nanocuenca Brasil, la variación del Nc es de 57.4 a 63.7 y aunque con un sólo valor calculado con la fórmula del SCS, es el que menor diferencia ofrece seguido del obtenido con la expresión de Dal-Ré. Para la Nanocuenca Hannover, a pesar de gran variación entre los valores extremos (57.2 unidades), los menores errores se presentaron también para cuando se emplea el Nc_3 en la fórmula del SCS para la corrección por humedad antecedente. Por último, en el caso de la Nanocuenca Berriozábal, con una variación entre los extremos de los Nc de 36.6, para cuando se emplea la expresión del SCS pero se emplea en el cálculo el Nc_1 en lugar del Nc_3 , lo cual se puede atribuir a que en esta Nanocuenca en donde se tiene la menor precipitación, y en consecuencia se tendrá menos escurrimiento.

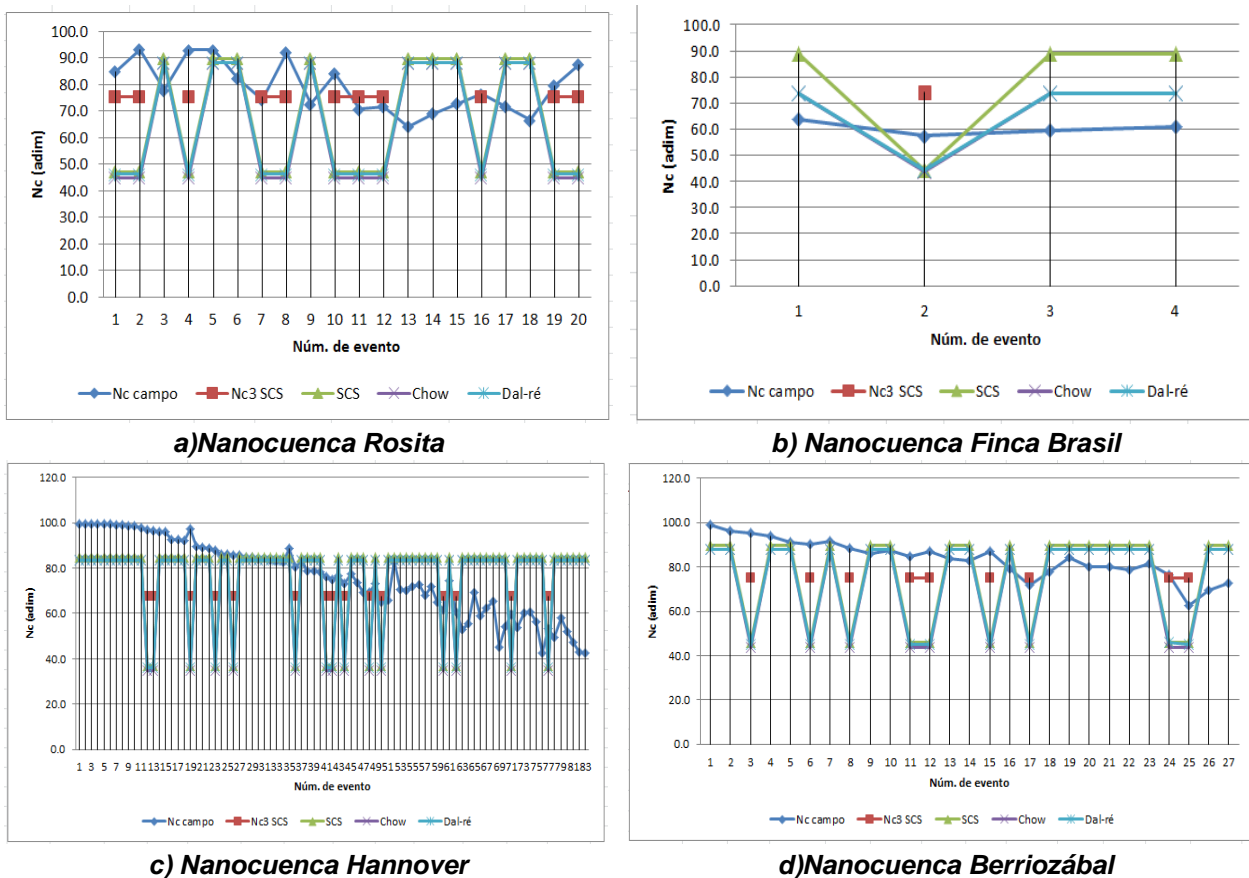


Figura 4.45. Comportamiento de los Nc calculados con datos de campo y los de tablas, corregidos por humedad antecedente por las fórmulas del SCS, Chow y Dal-Ré y por pendiente para las cuatro Nanocuecas

En relación a las diferencias de los promedios reportados en el cuadro 4.31, cuando el Nc se corrigió por humedad antecedente menor de 50 mm y corregido por pendiente empleando tal cual la expresión 2.45 (con Nc_3 no obstante no haber habido humedad

4. MATERIALES Y MÉTODOS

anterior o haber estado fuera de rango) la diferencia fue de -3.4 para la Nanocuenca Rosita, que es el menor de todos los errores, por lo que se puede concluir que para una condición como la de esta nanocuenca, el valor de tablas se debe incrementar en ese valor, después de corregirlo por humedad anterior (usando la expresión 2.47) y por pendiente; lo mismo ocurre con las Nanocuecas Hannover y Berriozábal, en cuyo caso las correcciones, si se sigue este algoritmo de cálculo, se deben sumar 8.7 y 8.4 unidades, respectivamente, a los valores de las tablas del SCS una vez corregidos por *HA* y *Sc*.

Cuadro 4.31. Valores promedios de los *Nc* corregidos por pendiente y por humedad anterior para las cuatro Nanocuecas estudiadas y su comparativo con los valores obtenidos con datos de campo

NANOCUENCA	VARIABLE	<i>Nc</i> _{CAMPO} (adim)	SCS ₃		SCS		Chow		Dal-ré	
			<i>Nc</i> (adim)	ΔNc (adim)	<i>Nc</i> (adim)	ΔNc (adim)	<i>Nc</i> (adim)	ΔNc (adim)	<i>Nc</i> (adim)	ΔNc (adim)
Rosita	<i>Nc</i> ₃ (Máximo)	78.8	75.4	-3.4	89.7	10.9	88.0	9.2	88.2	9.4
	Media				66.3	-12.5	64.2	-14.6	65.1	-13.7
	<i>Nc</i> ₁ (Mínimo)				47.1	-31.7	44.7	-34.1	46.1	-32.7
Brasil	<i>Nc</i> ₃ (Máximo)	60.4	74.0	13.6	89.7	29.3	88.0	27.6	88.2	27.8
	Media				73.2	12.8	71.2	10.8	71.9	11.5
	<i>Nc</i> ₁ (Mínimo)				47.1	-13.3	44.7	-15.7	46.1	-14.3
Hannover	<i>Nc</i> ₃ (Máximo)	76.2	67.5	-8.7	84.8	8.6	83.3	7.1	83.5	7.3
	Media				76.3	0.1	61.7	-14.5	61.8	-14.4
	<i>Nc</i> ₁ (Mínimo)				37.1	-39.1	34.9	-41.3	36.2	-40.0
Berriozábal	<i>Nc</i> ₃ (Máximo)	83.6	75.2	-8.4	89.5	5.9	87.9	4.3	88.1	4.5
	Media				75.0	-8.6	73.1	-10.5	73.8	-9.8
	<i>Nc</i> ₁ (Mínimo)				46.1	-37.5	43.6	-40.0	45.0	-38.6

Cuando la humedad anterior es mayor que 50 mm para los 5 días previos, la corrección por este concepto se hace con la expresión del SCS, y la correspondiente a la pendiente se hace con la expresión 2.45; el valor de *Nc* resultante se sobreestima en 10.9 unidades; en cambio, si la corrección por *HA*, se hace con las expresiones de Chow y Dal-Ré, la diferencia entre sí es de 0.2 unidades y con respecto al promedio de datos de campo, de 9.2 y 9.4 unidades, respectivamente, para la Nanocuenca Hannover, estas diferencias son 8.6, 7.1 y 7.3, para las expresiones del SCS, de Chow y de Dal-Ré, respectivamente; y para el caso de la Nanocuenca Berriozábal, estas diferencias son de

5.9, 4.3 y 4.5, respectivamente, para las expresiones usadas; es decir que con estos valores se deben corregir, disminuyendo, los de tablas una vez corregidos por HA y Sc .

Y para el caso de la Nanocuenca Finca Brasil, para cuando se calculó la corrección por humedad antecedente sin cumplir con el rango, se tuvo una diferencia de 13.6 unidades entre el valor de Nc obtenido con datos de campo, igual a 60.4; en cambio el comportamiento de los errores o diferencias no son similares a los que se obtuvieron en las otras tres nanocuecas, para cuando se calcularon la Nc_1 (para $HA_5 < \text{de } 50 \text{ mm}$) o la Nc_3 (para $HA_5 \text{ mayor de } 50 \text{ mm}$), según lo recomienda la literatura, pues las menores diferencias son de 12.8, 10.8 y 11.5, respectivamente, para cuando se emplean los valores medios; aunque es pertinente referir que los valores reportados por las tres expresiones son muy similares entre sí. Esto lleva a concluir que, el reducido número de eventos que se analizaron para esta Nanocuenca, le da escasa fortaleza a los resultados obtenidos y que implica que no se puedan generalizar.

4.3.3. ANÁLISIS DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

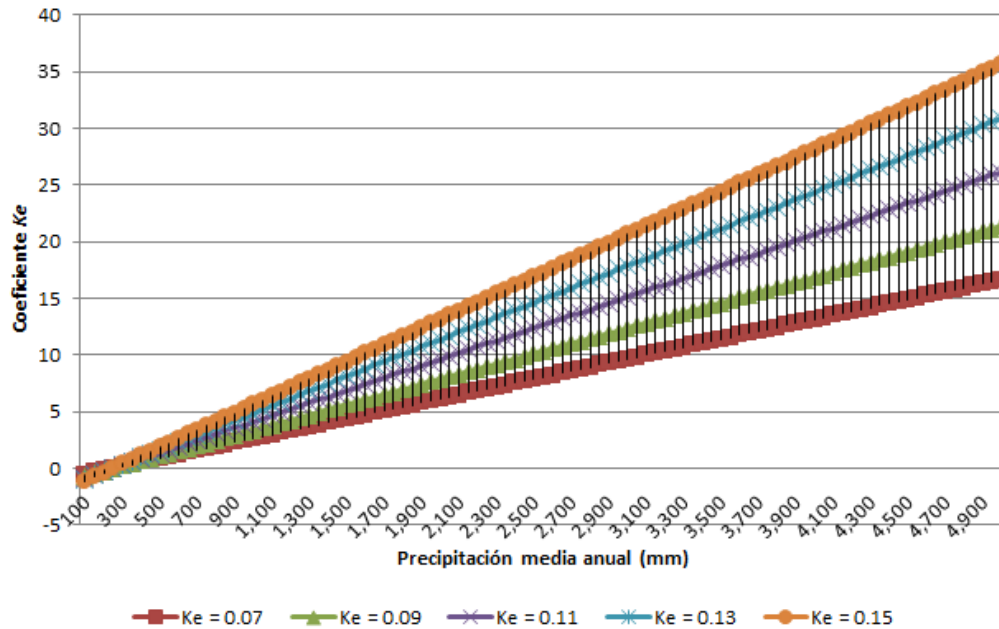
4.3.3.1. Análisis de las disposiciones normativas

En la publicación de la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2002), se establece que los límites de aplicabilidad de las fórmulas 2.28 y 2.29 son los valores de 350 y 2,150 mm de precipitación media anual (Pma en dichas fórmulas); sin embargo, lamentablemente no se explica ni se muestra por qué, ni refiere el origen de las expresiones ni de sus implicaciones. Por otra parte, los valores de Ke definidos en la tabla, van desde 0.07 hasta 0.34 aunque no hay una explicación de los tipos de cobertura que hacen posible su distribución dentro de los tipos de suelo, pues no siempre siguen la misma tendencia.

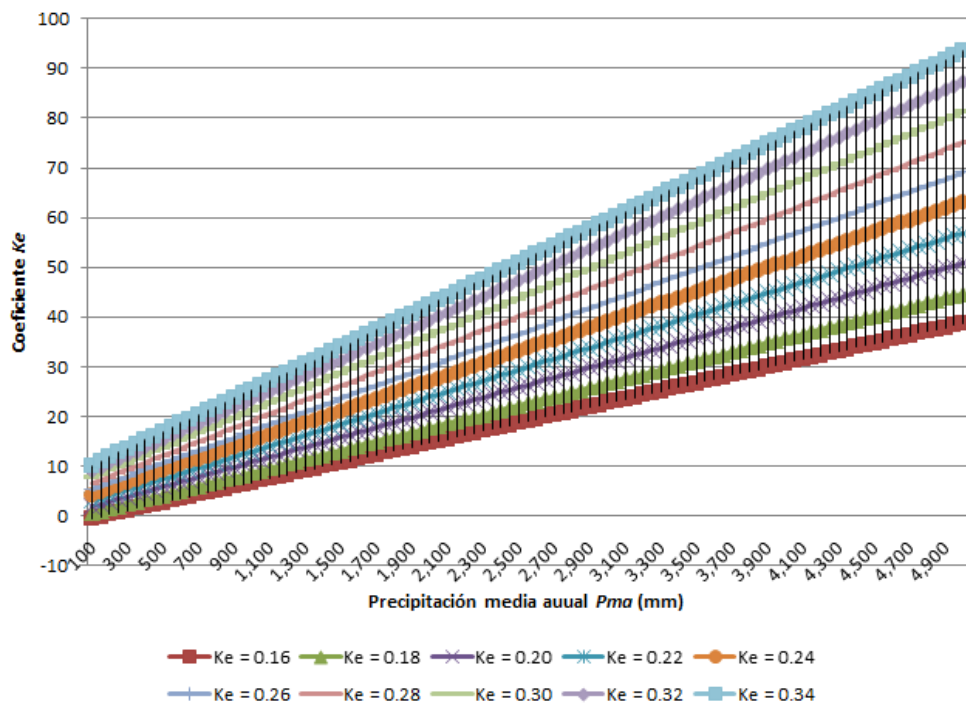
Evidentemente que las expresiones referidas son ecuaciones de líneas rectas del tipo $Ce = f(Pm)$ que se explicitan una vez definido el valor de Ke . También es evidente que a mayor valor de Ke , mayor Ce para un mismo valor de Pma como se muestra en las gráficas 4.3 y 4.4, correspondientes a las expresiones 2.28 y 2.29, respectivamente y para un rango de entre 100 y 5,000 mm, las cuales se construyeron para mostrar que, por su estructura, pueden perfectamente aplicarse en un rango mayor que el definido, pudiendo ser el límite mínimo de 250 mm para eliminar valores negativos y considerando que los sitios en la República Mexicana en los que llueva menos que este valor son quizá los desiertos, que son zonas con poco interés.

En cambio los límites superiores, pueden ser como la estación Finca Hannover, del área de la Cuenca Huixtla, con $Pma = 4,694 \text{ mm}$. El valor máximo de Ce arrojado por la expresión 2.29 se refiere a este orden de valor de Pma , con Ke igual a 0.33, que corresponde a caminos en tipo de suelo impermeable (Tipo C) y es de 85 % y es

perfectamente posible, máxime si se le agrega la condición de fuertes pendientes con valores mayores al 100%.



Gráfica 4.3. Comportamiento gráfico de la expresión 2.28 para el cálculo de C_e atendiendo la NOM CNA 011 para diversos valores de K_e menores e igual a 0.15



Gráfica 4.4. Comportamiento gráfico de la expresión 2.28 para el cálculo de C_e atendiendo la NOM CNA 011 para diversos valores de K_e mayores a 0.15

4.3.3.2. Valores reales a partir de datos de campo

A partir de los mismos datos del cuadro 4.19 para la Nanocuenca Rosita y los cuadros A.1, A.2 y A.3 para las Nanocuecas Brasil, Hannover y Barriozábal del Anexo, respectivamente, y aplicando la expresión 2.25 entre Le (columna 10) y Lp (columna 11) se obtuvo el coeficiente de escurrimiento Ce , que es el valor que se tomará como real y correcto para el análisis, toda vez que está calculado con datos medidos en campo y que se muestran en la columna 12 del cuadro 4.32 para la Nanocuenca Rosita, de acuerdo con el cual el coeficiente de escurrimiento medido (Cem) para ésta es 14.57 %. El cálculo correspondiente del Cem para las Nanocuecas Brasil, Hannover y Barriozábal, se muestran en los cuadros A.17, A.18 y A.19, del Anexo 1, de los que se obtuvieron los valores de 2.47 %, 4.8 % y 4.6 %, respectivamente. De entrada los valores, del Ce son muy pequeños, y sólo se explica por las densas coberturas y los suelos arenosos y por lo tanto, permeables que prevalecen en la zona. Estos valores se emplearán para su comparación con los resultantes de aplicar el procedimiento de la Norma Mexicana NOM CNA 011, lo cual se justifica porque por este último método no se puede calcular el Ce para cada evento sino para valores de precipitación media anual y para toda la cuenca.

Para verificar la validez y aplicabilidad de la expresión 2.55 que relaciona Ce y Nc , en la que la lámina escurrida Le se obtuvo con la expresión 2.34, se calculó Ce resultando los mismos valores de la columna 12.

4.3.3.3. Valores con base en la NOM-011-CNA-2000

Se calculó el Ce , con el procedimiento descrito en el tema 2.3.3.4, basado en la **Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua** y considerando la discusión y análisis del tema anterior.

A. Para la Nanocuenca Rosita

Para la Nanocuenca Brasil se empleó la precipitación media anual correspondiente a la estación meteorológica Huixtla que es de 3,093.5 mm. Se contempló asimismo, que la Cuenca tiene dos tipos de cobertura o uso del suelo que son:

- Un 13.4 % con cobertura de bosque con más del 75 % de cobertura y tipo de suelo A, de modo que se definió su Ke en 0.07, que al aplicar la expresión 2.28 para el cálculo de la Cep , se obtuvo 10.0 %.
- Un 86.6 % con cobertura de pastizal con más del 75 % de cobertura y tipo de suelo A, de modo que se definió su Ke en 0.14, que al calcular la Cep con la expresión 2.28 se obtuvo un valor de 19.9 %.

Cuadro 4.32. Coeficiente de escurrimiento medido C_m , calculado con los datos de campo de lámina escurrida L_e y lámina precipitada L_p para la Nanocuenca Rosita

(1)	(10)	(11)	(12)
NÚM. DE EVENTO	L_e	L_p	C_e
	(mm)	(mm)	(%)
1	11.41	27.00	42.26
2	5.16	16.80	30.70
3	30.57	59.40	51.46
4	3.92	42.30	9.28
5	0.56	14.50	3.83
6	4.48	15.60	28.70
7	16.13	54.60	29.53
8	1.70	21.50	7.93
9	1.49	36.80	4.04
10	6.93	149.10	4.64
11	6.13	18.30	33.50
12	3.26	47.70	6.84
13	0.34	35.50	0.96
14	0.18	21.60	0.83
15	5.87	40.40	14.54
16	0.04	16.10	0.22
17	18.66	122.10	15.28
18	3.11	37.80	8.22
19	0.78	30.60	2.56
20	1.07	31.00	3.46
21	5.68	29.10	19.51
22	0.62	27.30	2.26
Media	5.82	40.69	14.57
Máxima	30.57	149.10	51.46
Mínima	0.04	14.50	0.22

Los resultados son los que se muestran en el cuadro 4.33, del que se observa que hay una diferencia de 4.0 % del valor obtenido con el procedimiento de la Norma NOM-CNA-011 de 18.6 % y el medido en campo de 14.6 %. El valor calculado es el menor que se puede obtener con el procedimiento de la norma mexicana, y es que en él no se considera la pendiente del terreno, con lo cual éste sería aún mayor.

En el cuadro 4.33, Ac es el área de la Nanocuenca, en m^2 ; Pma es la precipitación media anual de la cuenca, en mm; Ke es el factor que depende del tipo de suelo y del uso del suelo, sin dimensiones; Cep , es el coeficiente de escurrimiento parcial correspondiente a cada parte de la Nanocuenca, en %; Cec , es el coeficiente de escurrimiento calculado por el procedimiento de la NOM para la Nanocuenca, en %; Cem , es el coeficiente de escurrimiento medido u obtenido con la definición y datos de campo, en %; y ΔCe es la diferencia entre los valores medido y calculado del Ce ($Cec-Cem$), en %.

B. Para la Nanocuenca Finca Brasil

Para el caso de la Nanocuenca Finca Brasil se consideró la precipitación media anual de 1,773.5 mm correspondiente a la estación meteorológica Belisario Domínguez 1, y que el tipo de suelo es A (permeables), y el uso de suelo de bosque con cobertura de más del 75 % con lo que se definió un valor de $Ke = 0.07$ que al ser menor de 0.15 implicó el uso de la expresión 2.28 para el cálculo del Cep , que resultó igual a 5.3 %, según se muestra en el cuadro 4.31, y que por lo tanto, es mayor en 2.8 % que el valor real o medido definido en 2.5 %.

Cuadro 4.33. Cálculo del Coeficiente de Escurrimiento Ce con las definiciones de la NOM CNA 011 para las cuatro Nanocuecas estudiadas

NANO-CUENCA	Ac		Pma	TIPO DE SUELO	USO DEL SUELO	Ke	Cep	Cec	Cem	ΔCe
	(m^2)	(%)								
Rosita	40,702	86.6	3,093.5	A	Pastizales	0.14	19.9	17.2		
	6,298	13.4	3,093.5	A	Bosque	0.07	10.0	1.3		
	47,000	100.0						18.6	14.6	4.0
Finca Brasil	12,300	100.0	1,774.5	A	Bosque	0.07	5.3	5.3	2.5	2.8
Hannover	11,067	100.0	4,694.0	A	Café en sombra	0.12	26.7	26.7	4.8	21.9
Berriozábal	9,355	56.0	1,390.0	A	Maíz 50 - 75 % cobertura	0.20	14.7	8.3		
	7,350	44.0	1,390.0	A	Pastizales (Acahual)	0.14	8.0	3.5		
	16,705	100.0						11.8	4.6	7.2

C. Para la Nanocuenca Hannover

Para la Nanocuenca Hannover se consideró la Pma de 4,694 mm obtenida de la estación meteorológica de la Finca del mismo nombre, y que es la mayor de la zona; que el tipo de suelo es A (permeables); y el uso de suelo de café con sombra con lo que se definió un valor de $Ke = 0.12$ que al ser menor de 0.15 implicó el uso de la expresión 2.28 para el cálculo del Cep , que resultó igual a 26.7 % y se incluye en el cuadro 4.33, y que por lo tanto, es mayor en 21.9 % que el valor real o medido definido en 4.8 %.

D. Para la Nanocuenca Berriozábal

Para la Nanocuenca Berriozábal se aplicó la precipitación media anual de 1,390 mm y los dos tipos de cobertura o uso del suelo, siguientes:

- Un 56.0 % de la superficie con cobertura de maíz cobertura de entre 50 y 75 % y tipo de suelo A, de modo que se definió su Ke en 0.20 y se aplicó la expresión 2.29 para calcular la Cep que resultó de 14.7 %.
- Un 44.0 % con cobertura de pastizal o acahual y tipo de suelo A, por lo que de la tabla 2.4 se determinó su Ke en 0.14 y se aplicó la expresión 2.28 para calcular la Cep que resultó igual a 8.0 %.

El valor del Cec que se incluye en el cuadro 4.33, es de 11.8, que comparado con el valor real o medido que es de 4.6 % implica una diferencia de 7.2 %

E. Comparación con los valores de campo y su ajuste

En un intento por buscar la aplicación del Método de la Norma a la región costera de Chiapas, y asumiendo que los valores obtenidos de campo, son correctos, se planteó un ajuste al valor del Ke obtenido de la tabla 2.4, para tener los valores propuestos en el cuadro 4.34, con los que, como se muestra en la dos últimas columnas, se obtienen valores de Ce idénticos a los de campo y la diferencia se hace nula.

Cuadro 4.34. Cálculo del Coeficiente de Esguerrimiento Ce con las definiciones de la NOM CNA 011 con correcciones propuestas de Ke para la obtención de los valores esperados

NANO-CUENCA	Ac		Pma (mm)	TIPO DE SUELO	USO DEL SUELO	Ke	Cep	Cec	Cem	ΔCe
	(m ²)	(%)				(adim)	(%)	(%)	(%)	(%)
Rosita	40,702	86.6	3,093.5	A	Pastizales	0.109	15.5	13.4		
	6,298	13.4	3,093.5	A	Bosque	0.060	8.5	1.1		
	47,000	100.0						14.6	14.6	0.0
Finca Brasil	12,300	100.0	1,774.5	A	Bosque	0.033	2.5	2.5	2.5	0.0
Hannover	11,067	100.0	4,694.0	A	Café en sombra	0.022	4.9	4.9	4.8	0.1
Berriozábal	9,355	56.0	1,390.0	A	Maíz 50 - 75 % cobertura	0.107	3.2	1.8		
	7,350	44.0	1,390.0	A	Pastizales (Acahual)	0.110	6.3	2.8		
	16,705	100.0						4.6	4.6	0.0

4.3.4. VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO CON EL MÉTODO DE N_c Y USANDO SIG, TAM Y NÚMEROS DE BASE 10

4.3.4.1. Planteamiento del modelo

La finalidad de este análisis es el de precisar una metodología que haga posible la determinación del volumen de escurrimiento en una cuenca, empleando la expresión 2.34 que involucra los conceptos de número de curva (definido por la expresión 2.30) y el parámetro de retención (expresión 2.31).

Se parte de que los **elementos de los que depende el número de curva**, y finalmente el escurrimiento, según se detalló en el tema 2.4.1 (**la cubierta vegetal, el uso del suelo, la condición hidrológica del suelo, el grupo hidrológico de suelo y la condición de humedad antecedente**) son espacialmente variables, de modo que no es adecuado considerar sus valores como únicos o como promedios de los que corresponden a las áreas que componen o integran una cuenca, como las subcuencas o nanocuenas, si bien una descomposición a este nivel es mucho mejor, en principio que considerarla en su conjunto.

Lo anterior, no obstante que, los componentes referidos, así como la precipitación y la pendiente, -elementos principales en la estimación del escurrimiento y ampliamente relacionados entre sí-, se definen por áreas parciales de una cuenca; la primera según el área de influencia de las estaciones meteorológicas donde se mide y expuestas, ya sea como polígonos o isoyetas; y la segunda, según su magnitud, variante con el tránsito de las partes altas a las bajas de la cuenca.

Se plantea **definir el valor del Parámetro de Retención S_r , del Número de Curva N_c y de la magnitud del Escurrimiento, dado como lámina L_e** en la expresión 2.34 **y como volumen (Vec)**, derivado del ciclón tropical Stán ocurrido del 1 al 6 de octubre de 2005, a nivel de una celda o píxel (que se usa indistintamente) en un mapa en formato ráster, generando para ello un mapa para cada uno de los componentes o elementos de los que depende y referidos en el segundo párrafo del tema. Para el efecto, se genera un sistema de información geográfica, aplicando la técnica de álgebra de mapas (TAM) descrita en el apartado 2.7, y utilizando el algoritmo matemático, aquí definido para el caso y denominado **números de base 10**.

El trabajo se desarrolla para cada una de las subcuencas definidas por CONAGUA y UACH (2006) para la Cuenca Huixtla y que se caracterizan en el PLANO 20 DE 28 SUBCUENCAS DE LA CUENCA HUIXTLA Y SUS SUPERFICIES; dicha cuenca fue descrita y caracterizada en los temas 4.1 y 4.2 y se retoma información ya expuesta y comentada en ellos, aunque se precisa, aquí la manipulación adicional que se le hace

para su empleo en el caso. En el cuadro 4.35, se exponen la denominación de las 53 subcuencas generadas y sus superficies Asc.

Cuadro 4.35. Subcuencas en que se dividió la Cuenca Huixtla y para las que se determinó el volumen de escurrimiento por los Modelos Distribuido y Agregado

DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA		Asc	DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA		Asc
NÚM.	NOMBRE	(ha)	NÚM.	NOMBRE	(ha)
1	El Retiro	1,047.08	28	Peña Flor	541.99
2	Loma Bonita	470.78	29	Santa Lucía Etzumú	615.79
3	Chevolcán	845.96	30	Lindavista	751.78
4	Río Agua Fría	946.03	31	La Antigua	45.39
5	Tolimán Uno	263.94	32	Bélgica	563.35
6	Río Ojo de Agua	1,192.90	33	Nueva Victoria	405.29
7	Concepción Villaflores	930.48	34	El Paraiso	77.73
8	Ampliación Villahermosa	596.23	35	Solo Dios	15.64
9	El Pozolero	760.09	36	La Florida	419.94
10	Doce de Diciembre	665.20	37	España	630.54
11	Río Toquián	548.07	38	Santa Tera de Jesús	550.48
12	Cueva Faldeada	184.33	39	Nuevo Paraiso	119.64
13	Arroyo la Juchita	406.36	40	El Vergel	750.17
14	Blanema	33.68	41	El Parral	8.40
15	Nueva Reforma	652.87	42	La Verbena	210.68
16	Río Agua Zarca	1,139.65	43	Santa Elena	1,086.93
17	Villa Hermosa	55.84	44	San Lucas Manacal	442.19
18	Nueva Independencia	608.82	45	Río Pedregoso	1,056.11
19	Río Ecumú	440.13	46	Chapingo	1,172.44
20	Justo Sierra	1,043.24	47	Río Cangrejero	973.99
21	Santa Clara	305.66	48	Vado Ancho	299.14
22	La Libertad	221.41	49	31 de Diciembre	979.62
23	San Lucas	1,310.12	50	Río Negro	3,597.73
24	Río Checulé	1,337.11	51	La Lucha	178.16
25	Libertad Calera	476.32	52	Nueva Tenochtitlan	265.19
26	Llano Grande	496.96	53	Huixtla	2,112.92
27	El consuelo	676.91	SUMA		35,527.40
			PROMEDIO		670.33

Para el cálculo final del N_c y del Le , se emplean los Modelos Distribuido y Agregado, descritos por Dal-Ré (2003), Todini (1988); y Bedient *et al.*, (2012) y expuesto en el tema 2.7.2.

Para incluir en el análisis de la metodología ejemplificada, la pendiente de la cuenca, que Neitsch, *et al.* (2001), recomienda considerar para corregir el N_c , obtenido de tablas, empleando la expresión 2.45 desarrollada por Williams (1995), cuando su magnitud es mayor del 5 %, lo cual es lo más frecuente en las cuencas costeras de Chiapas al presentar valores inclusive mayores de 100 % en muchas áreas de la parte alta de ellas, al final de este apartado se hace una propuesta para ese fin.

El software fundamental para la manipulación de la información, su operativización y la generación de los resultados, que de hecho conforman un sistema de información geográfica, fue el Arc Map versión 10 de ESRI.

4.3.4.2. El algoritmo de número de base 10

En analogía con la técnica de números primos empleada por Dal-Ré (2003), para el uso de SIG en el cálculo del N_c , se propone el **algoritmo de números de base 10** o de múltiplos de 10 (denotado como variable por NB_{10}), para la denominación cuantitativa de los diversos componentes de los elementos para su cálculo.

Se trata de emplear la condición decimal o de base 10 utilizada en la numeración arábica, designando los números de un sólo dígito (del 1 al 9) para una característica que no sea superior a 9; la de los múltiplos de 10 (10, 20, ..., 90) para otra característica cuyos componentes tampoco sea mayor de 9; los múltiplos de 100 (100, 200, ..., 900) para la siguiente característica con la misma condición; y (para el caso) para la característica con mayores componentes (hasta 99), se emplean los múltiplos de 1,000, (1000, 2000, 3000, ... , 99000).

Definido cada valor de base 10 asignado a cada componente de los elementos o características consideradas en el análisis, se suman en la línea deseada para obtener un solo número para cada combinación de ellos, la cual se asocia al número de curva que le corresponde según se haya definido previamente.

4.3.4.3. Generación de la capa de Uso del Suelo

Se emplearon las clases del suelo relacionadas en el cuadro 4.13 y el plano 13 DE 28 USO DE SUELO DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 2005. Dado que este elemento del N_c , no sólo es el principal, sino que es el que mayores componentes tiene (13), se definió asignarle los números múltiplos de 1000, tal como se presenta en el cuadro 4.36.

Cuadro 4.36. Definición del número de base 10, múltiplos de 1000 al elemento de Uso de Suelo para la determinación del N_c para la Cuenca Huixtla

USO DEL SUELO			NB_{10}
ID	CLAVE	DESCRIPCIÓN	
1	BP	Bosque de pino	1000
2	BPQ	Bosque de pino-encino	2000
3	BQP	Bosque de encino-pino	3000
4	SMSC/VS	Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria	4000
5	SMSC/CP	Selva mediana subcaducifolia con cultivos permanentes	5000
5	SBC/VS	Selva baja caducifolia con vegetación secundaria	5000
6	PAST-RAS	Pastizal rasante	6000
7	S-DESN	Suelos desnudos	7000
8	UA-SDESC	Suelos en descanso con alguna cobertura	8000
9	UA-CP	Uso agrícola- cultivos permanentes (mango, caña café)	9000
10	AUyPOB	Áreas urbanas y pobladas	10000
11	VC	Vías de comunicación	11000
12	C_AGUA	Corrientes y cuerpos de agua	12000

Con esta codificación, partiendo del plano referido en el párrafo anterior, y empleando el comando RECLASSIFY del software Arc Map, se elaboró como la capa USO SUELO el plano 21 DE 28 PLANO CODIFICADO DE USO DEL SUELO DE LA CUENCA HUIXTLA.

4.3.4.4. Generación de la capa de Condición Hidrológica

Se complementó la definición y descripción de los componentes del elemento de condición hidrológica descritos en los temas 2.4.1.4 y 2.4.1.5 para pradera y bosques, que en general es **buena**, **regular** y **pobre**, para todas y cada uno de los usos de suelos, definido en el tema anterior y siguiendo el mismo criterio empleado por McCuen (2005), Campos (2010), Rivera (2010) y Arellano (2012).

Todas estas definiciones se integraron a las existentes, generando el cuadro 4.37, en el que además se muestran los números de base 10, múltiplos de 100. Con la codificación de este elemento para el cálculo del N_c , se elaboró el plano 22 DE 28 PLANO CODIFICADO DE CONDICIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA HUIXTLA.

4.3.4.5. Generación de la capa del Grupo Hidrológico

Esta capa, se conformó al considerar la definición de los grupos hidrológicos, expuesta por Campos (2007 y 2010) y analizada en el tema 2.4.1.1. asignándole los números de base 10 múltiplos de 10, como se expone en el cuadro 4.38.

Cuadro 4.37. Definición del número de base 10, con múltiplos de 100 a los elementos de la Condición Hidrológica para la determinación del Nc para la Cuenca Huixtla

CONDICIÓN HIDROLÓGICA		NB₁₀
Clases de bosque		
Bueno: protegido del pastoreo de manera que el suelo siempre está cubierto de arroyo y arbustos.		100
Regular: tiene poco pastoreo, pero no se queman; pueden tener escaso mantillo o arroyo y, generalmente están protegidos del pastoreo.		200
Pobre: Tiene excesivo pastoreo, árboles pequeños, y el arroyo se destruye regularmente por incendio.		300
Clases de pradera		
Buena: tiene pastoreo ligero y las plantas cubren más del 75 % del área.		100
Regular: no tiene pastoreo excesivo y las plantas cubren del 50 % al 75 % de la superficie.		200
Pobre: tienen pastoreo excesivo y las plantas o vegetación cubren menos del 50 % del área.		300
Terrenos agrícolas o cultivos permanentes		
Buenos: Cultivos o árboles de cobertura completa, como praderas, alfalfas, cereales y completamente desarrollados		100
Regulares: Cultivos establecidos en surcos, árboles grandes y con espacios entre matas, y/o en crecimiento que implica áreas descubiertas		200
Pobres: Cultivos de escasa cobertura por el tipo de especie o por su escaso crecimiento o estado de salud precaria, que implica amplias áreas desprotegidas.		300
Terrenos agrícolas no cultivados o en pastoreo		
Buenos: tiene pastoreo ligero y restos de cosecha o malas hierbas que cubren más del 50 % del área.		100
Regulares: pastoreo intermedio y restos de cosecha o malas hierbas que cubren del 25 % al 50 % de la superficie.		200
Pobres: tienen pastoreo excesivo y restos de cosecha o malas hierbas cubren menos del 25 % del área.		300
Suelos desnudos		
Pobre. Sin ningún tipo de cobertura y laboreo.		300
Uso urbano		
Bueno. Con amplias áreas planas y/o sin construir (más del 50 %) y calles sin revestir que son permeables o limitan el escurrimiento.		100
Regular. Con áreas con pendientes suaves o planas y/o con áreas sin construir (entre el 25 y el 50 %) y calles sin revestir o con revestimiento de grava, tezontle o adoquín que reducen la permeabilidad pero permiten la infiltración y reducen el escurrimiento.		200
Pobre. Con áreas con pendientes fuertes y/o con áreas sin construir menores del 25 % y calles revestidas con arcilla, asfalto o concreto que por completo la permeabilidad y propician el escurrimiento.		300

Carreteras y caminos	
Terracería. Caminos sin revestir o revestidos con grava, o tezontle, que reduce la permeabilidad pero permite aun la infiltración.	200
Pavimento. Caminos revestidos con arcilla, asfalto, concreto o mampostería junteada, que reducen por completo la permeabilidad del terreno.	300
cuerpos de agua	
Buena. Superficies con agua estancada o con flujo que facilitan el escurrimiento.	100

Cuadro 4.38. Definición del número de base 10, con múltiplos de 10 para el elemento de la Grupos Hidrológicos del suelo para la Cuenca Huixtla

GRUPO HIDROLÓGICO		NB₁₀
A	(Bajo potencial de escurrimiento): Suelos que tienen alta velocidad de infiltración cuando están mojados; consisten principalmente de arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo; estos suelos tienen altas velocidades de transmisión, con valores mayores de 7.6 mm/h.	10
B	Suelos con moderada velocidad de infiltración cuando están mojados; consisten principalmente de suelos con cantidades moderadas de texturas finas a gruesas, con drenaje medio y algo profundos; son básicamente suelos arenosos, que tienen moderadas velocidades de transmisión de agua (de 3.8 a 7.6 mm/h).	20
C	Suelos que tienen baja velocidad de infiltración; consisten básicamente de arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo; estos suelos tienen bajas velocidades de transmisión del agua (de 1.3 a 3.8 mm/h).	30
D	(Alto potencial de escurrimiento). Suelos que tienen baja velocidad de infiltración cuando están mojados; consisten principalmente de suelos arcillosos con alto poder de hinchamiento, con nivel freático alto y permanente, con estratos arcillosos cerca de la superficie, o bien, suelos someros sobre horizontes impermeables; tienen muy bajas velocidades de transmisión del agua (de 0.0 a 1.3 mm/h).	40

Y con la codificación de este elemento de cálculo del *Nc* para los números de base 10 indicados, se generó el plano 23 DE 28 PLANO CODIFICADO PARA EL GRUPO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA HUIXTLA.

4.3.4.6. Relación entre el número de base 10 y el *Nc*

Integrando los números de base 10 generados para los tres elementos del *Nc* (uso del suelo, condición hidrológica y grupo hidrológico), descritos en los tres incisos anteriores,

e integrándolos con los valores de N_c tomados de Rivera (2007) adecuados y complementados con los propuestos por Dal-Ré (2003), Campos (2007) y Aparicio (2012), se generó el cuadro 4.39, en el que se presenta la asociación de los NB_{10} y los N_c .

Cuadro 4.39. Definición de los números de base 10 y sus correspondientes números de curva considerando uso del suelo, condición hidrológica y grupo hidrológico

USO DEL SUELO		CONDICIÓN HIDROLÓGICA		GRUPO HIDROLÓGICO							
				A: $NB_{10}=10$		B: $NB_{10}=20$		C: $NB_{10}=30$		D: $NB_{10}=40$	
CLAVE	NB_{10}	DENOMINACIÓN	NB_{10}	NB_{10F}	N_c	NB_{10F}	N_c	NB_{10F}	N_c	NB_{10F}	N_c
BP	1000	Bueno	100	1110	30	1120	41	1130	61	1140	71
		Regular	200	1210	36	1220	58	1230	73	1240	80
		Pobre	300	1310	56	1320	75	1330	85	1340	89
BPQ	2000	Bueno	100	2110	30	2120	41	2130	61	2140	71
		Regular	200	2210	36	2220	58	2230	73	2240	80
		Pobre	300	2310	45	2320	75	2330	85	2340	89
BQP	3000	Bueno	100	3110	25	3120	30	3130	41	3140	48
		Regular	200	3210	36	3220	48	3230	57	3240	63
		Pobre	300	3310	45	3320	66	3330	74	3340	79
SMSC/VS	4000	Bueno	100	4110	32	4120	58	4130	72	4140	79
		Regular	200	4210	43	4220	65	4230	76	4240	82
		Pobre	300	4310	57	4320	73	4330	82	4340	86
SMSC/CP	5000	Bueno	100	5110	32	5120	58	5130	72	5140	79
		Regular	200	5210	43	5220	65	5230	76	5240	82
		Pobre	300	5310	57	5320	73	5330	82	5340	86
SBC/VS	6000	Bueno	100	6110	30	6120	48	6130	65	6140	73
		Regular	200	6210	36	6220	60	6230	73	6240	79
		Pobre	300	6310	45	6320	66	6330	77	6340	83
PAST-RAS	7000	Buenos	100	7110	39	7120	61	7130	74	7140	80
		Regulares	200	7210	49	7220	69	7230	79	7240	84
		Pobres	300	7310	68	7320	79	7330	86	7340	89
S-DESN	8000	Pobre	300	8310	77	8320	86	8330	91	8340	94
UA-SDESC	9000	Buenos	100	9110	39	9120	61	9130	74	9140	80
		Regulares	200	9210	49	9220	69	9230	79	9240	84
		Pobres	300	9310	68	9320	79	9330	86	9340	89
UA-CP	10000	Buenos	100	10110	32	10120	58	10130	72	10140	79
		Regulares	200	10210	43	10220	65	10230	76	10240	82

		Pobres	300	10310	57	10320	73	10330	82	10340	86
AUyPOB	11000	Bueno	100	11110	39	11120	61	11130	74	11140	80
		Regular	200	11210	49	11220	69	11230	79	11240	84
		Pobre	300	11310	68	11320	79	11330	86	11340	89
VC	12000	Terracería	200	12210	72	12220	82	12230	87	12240	89
		Pavimento	300	12310	83	12320	89	12330	92	12340	93
C_AGUA	13000	Buena	100	13110	92	13120	92	13130	92	13140	92

Empleando la técnica de álgebra de mapas, se generó la capa de la suma de las capas correspondiente a Uso del suelo, Condición hidrológica y Grupo hidrológico, denominada NÚMERO DE CURVA, cuyos valores son los NB_{10} que se asociaron a los correspondientes Nc obtenidos de tablas por lo que se consideraron Nc_2 , siguiendo el algoritmo ejemplificado en el párrafo anterior. El plano generado se denominó PLANO 24 DE 28 NÚMEROS DE CURVA PARA LA CUENCA HUIXTLA DETERMINADOS POR SIG, NB_{10} Y TAM y en cada una de sus celdas contiene el Nc obtenido.

4.3.4.7. El mapa de precipitación de la Tormenta Tropical Stan de tipo ráster

Con los datos de precipitación del ciclón tropical Stan (Pr) ocurrida los días 1 al 6 de octubre de 2005 obtenida de las estaciones meteorológicas Buenos aires, Motozintla, Finca Germania, Finca San Cristóbal, Finca La Victoria, Finca Argovia, Finca Chicharras, Villa Comaltitlán, Unión Juárez, Huehuetán y El Porvenir, ubicadas al interior o en las cercanías de la Cuenca Huixtla y que se exponen en el cuadro 4.40, se elaboró un plano de isoyetas de la Cuenca y para este evento, en el SIG, una capa denominada PRECIPITACIÓN CODIFICADA y el PLANO 25 DE 28 PLANO DE PRECIPITACIÓN DEL HURACÁN STAN DE LA CUENCA HUIXTLA, cuyos valores a nivel de píxel se aplicaron para calcular con el Modelo Distribuido el Sr y el Le , en cada subcuenca.

4.3.4.8. Determinación del volumen de escurrimiento Ve , por el Método Distribuido

En el cuadro 4.41, se registran los valores de precipitación diaria de los últimos cinco días del mes de septiembre en las mismas estaciones meteorológicas referidas, la cual fue considerada como humedad antecedente (HA_5), para corregir el Nc_2 y obtener la Nc_3 aplicando la expresión 2.37, según lo sugiere Neitsch, *et al.*, (2001). Con los valores de Nc_3 , que se emplearon a su vez para el cálculo de Sr , se elaboró el PLANO 26 DE 28, NÚMEROS DE CURVA CORREGIDOS POR HUMEDAD ANTECEDENTE Nc PARA LA CUENCA HUIXTLA.

Posteriormente, para cada celda de los mapas ráster, se determinó el valor del parámetro de retención Sr , aplicando la expresión 2.31 con lo que se generó el PLANO 27 DE 28 PARÁMETRO DE RETENCIÓN PARA LA CUENCA HUIXTLA.

Cuadro 4.40. Magnitud de la precipitación del ciclón tropical Stan tomados para el cálculo de la lámina escurrida y el volumen escurrido

ESTACIÓN	PRECIPITACIÓN CICLÓN TROPICAL STAN (P_r , en mm)						
	oct-01	oct-02	oct-03	oct-04	oct-05	oct-06	SUMA
Buenos aires	0.0	0.0	95.0	180.7	160.0	105.0	540.7
Motuzintla	0.0	0.0	100.0	43.0	320.0	55.0	518.0
Finca Germania	2.1	3.4	116.0	320.0	434.0	161.0	1,036.5
Finca San Cristóbal	24.0	21.0	148.0	470.0	447.0	182.0	1,292.0
Finca La Victoria	0.0	9.0	146.0	409.0	340.0	150.0	1,054.0
Finca Argovia	84.0	21.0	74.0	373.0	320.0	109.0	981.0
Finca Chicharras	43.3	0.0	143.0	242.0	144.5	144.5	717.3
Villa Comaltitlán	28.0	2.5	101.0	273.0	212.0	172.0	788.5
Unión Juárez	8.0	32.0	142.0	350.0	330.0	118.0	980.0
Huehuetán	121.2	0.9	311.0	158.0	113.5	154.6	859.2
El Porvenir	28.0	29.5	375.0	348.0	165.0	124.0	1,069.5
PROMEDIO	30.8	10.8	159.2	287.9	271.5	134.1	894.2

Cuadro 4.41. Magnitud de la precipitación de los cinco días previos al ciclón tropical Stan considerados como humedad antecedente (HA_5) para corregir el N_c

ESTACIÓN	HUMEDAD ANTECEDENTE (HA_5 , mm)					
	sep-26	sep-27	sep-28	sep-29	sep-30	SUMA
Buenos aires	3.0	3.3	9.0	0.0	18.0	33.3
Motuzintla	3.0	2.0	2.0	11.0	9.0	27.0
Finca Germania	14.0	28.3	26.0	40.0	9.5	117.8
Finca San Cristóbal	74.0	48.0	87.0	34.0	11.0	254.0
Finca La Victoria	0.0	0.0	21.0	32.0	2.0	55.0
Finca Argovia	32.0	18.0	35.0	22.0	15.0	122.0
Finca Chicharras	0.0	10.7	24.8	42.0	15.5	93.0
Villa Comaltitlán	1.0	73.5	61.5	61.0	29.0	226.0
Unión Juárez	3.0	22.5	18.0	16.0	2.0	61.5
Huehuetán	0.0	42.1	21.5	65.3	18.0	146.9
El Porvenir	0.0	10.0	20.0	14.0	15.0	59.0
PROMEDIO	11.8	23.5	29.6	30.7	13.1	108.7

Posteriormente y también para cada celda, se determinó la magnitud de la lámina escurrida generada con la expresión 2.34; multiplicando el valor de Le (en m) y el área de la celda ($10\text{ m} \times 10\text{ m} = 100\text{ m}^2$), se generó el volumen de escurrimiento en una celda; y con los valores de todas las celdas, se generó el PLANO 28 DE 28 ESCURRIMIENTO DETERMINADO POR EL MÉTODO DISTRIBUIDO EMPLEANDO GIS, TAM Y N_c . La

suma de todos estos valores para cada subcuenca arrojó su volumen de escurrimiento *Ves*, derivado de la precipitación del ciclón tropical Stan.

Los resultados de todo el proceso se muestran en el cuadro 4.42 para las 53 subcuencas de la Cuenca Huixtla, en el que sólo se han incluido los números de éstas; los valores listados de los números de Base 10, de los *Nc*, de *Sr*, de *Le*, son los promedios obtenidos para las celdas de cada subcuenca, pero no se emplearon para los cálculos. De la sumatoria de los valores *Ves* listados en la última columna resultó en el *Ve* de la Cuenca Huixtla, que fue de 301,229,025.17 m³ = 301.229 Mm³.

Cuadro 4.42. Cálculo de la lámina escurrida *Le* y del volumen escurrido en las subcuencas (*Ves*) de la Cuenca Huixtla por el Modelo Distribuido

SUBCUENCA	NB _{10US}	NB _{10CH}	NB _{10GH}	NC ₂	NC ₃	Sr	Le	Ves
NÚM.	(adim)			(adim)		(adim)	(m)	(m ³)
1	5,000	200	30	72	86	45.6	0.82	8,511,613.44
2	5,000	200	30	72	86	47.6	0.76	3,541,767.17
3	5,000	200	30	72	86	47.1	0.69	5,810,887.17
4	6,000	200	30	73	87	43.7	0.62	5,794,059.91
5	6,000	200	30	73	87	41.1	0.76	1,982,158.89
6	5,000	100	30	65	80	69.2	0.62	7,389,548.44
7	5,000	200	30	70	85	47.6	0.82	7,603,740.20
8	5,000	200	30	68	83	60.9	0.79	4,649,311.31
9	6,000	200	30	70	85	50.3	0.88	6,645,924.70
10	5,000	100	30	70	84	54.2	0.87	5,762,991.21
11	6,000	200	20	67	82	59.7	0.89	4,891,000.10
12	5,000	100	30	72	87	42.5	0.91	1,670,089.37
13	5,000	100	20	60	78	77.7	0.91	3,653,076.43
14	6,000	200	20	70	85	51.2	0.92	312,053.64
15	5,000	200	30	70	85	51.6	0.74	4,817,473.33
16	5,000	200	30	70	84	55.6	0.77	8,805,328.14
17	6,000	200	30	75	89	35.3	0.85	472,010.25
18	5,000	100	30	63	79	78.6	0.83	5,017,843.07
19	5,000	200	30	69	84	54.7	0.59	2,585,488.56
20	5,000	100	30	64	80	78.8	0.64	6,642,349.16
21	6,000	200	30	72	86	47.5	0.68	2,076,758.35
22	6,000	200	30	71	84	53.7	0.71	1,550,606.27
23	5,000	100	30	61	77	85.6	0.73	9,499,274.04
24	5,000	100	30	58	75	97.7	0.73	9,733,295.46
25	4,000	100	30	61	77	87.2	0.78	3,705,044.47

26	5,000	100	30	62	78	83.1	0.75	3,750,837.25
27	5,000	100	20	63	78	67.6	0.93	6,311,858.99
28	5,000	100	30	69	84	53.2	0.92	4,959,544.84
29	6,000	200	30	71	85	50.1	0.71	4,377,741.13
30	5,000	100	30	64	79	77.3	0.74	5,576,975.17
31	5,000	100	30	73	87	37.5	0.96	440,579.53
32	5,000	100	30	68	84	54.6	0.93	5,185,107.24
33	6,000	200	20	61	78	73.8	0.95	3,834,393.13
34	6,000	200	20	68	83	54.1	0.96	750,630.53
35	7,000	300	20	66	82	57.8	0.97	154,798.12
36	5,000	100	30	66	82	59.0	0.92	3,834,484.09
37	6,000	100	20	58	76	81.2	0.93	5,877,052.36
38	5,000	100	20	58	74	82.0	0.91	5,030,497.78
39	6,000	100	20	62	79	69.7	0.97	1,164,768.10
40	6,000	200	20	63	80	67.4	0.96	7,190,770.60
41	7,000	300	20	68	83	54.9	0.99	83,835.59
42	5,000	100	30	72	87	39.3	0.99	2,099,396.02
43	5,000	100	30	69	84	51.9	0.95	10,264,901.60
44	5,000	100	30	72	87	40.2	1.02	4,504,324.53
45	5,000	100	20	57	75	85.3	0.90	9,524,130.56
46	5,000	100	20	66	82	57.9	0.99	11,511,234.35
47	5,000	100	20	58	77	79.1	0.90	8,689,515.86
48	6,000	100	30	72	86	41.8	1.04	3,098,326.26
49	5,000	100	30	72	87	39.9	1.05	10,298,263.51
50	5,000	100	30	68	83	55.4	0.98	35,325,100.67
51	5,000	100	20	60	78	71.5	0.96	1,679,630.35
52	5,000	100	30	73	88	36.3	1.07	2,824,259.18
53	7,000	300	20	70	85	48.1	0.94	19,762,374.79
SUMA						3,134.39	45.61	301,229,025.17
PROM.				67.11	82.49	59.14	0.86	5,683,566.51

4.3.4.9. Determinación del volumen de escurrimiento V_e , por el Método Agregado

La determinación se hizo para cada Subcuenca, partiendo de los mismos valores de los número de base promedio, para Uso del suelo (NB_{10US}), para Condición hidrológica (NB_{10CH}) y para Grupo hidrológico (NB_{10GH}), listados en las columnas 2 a 4 del cuadro 4.42, y se determinó el Nc_2 del cuadro 4.39; posteriormente, se calculó el Nc_3 empleando la expresión 2.37 cuyo valor se empleó en la expresión 2.31 para obtener el S_r , y éste a su vez, junto con la precipitación promedio (Pr) correspondiente al ciclón tropical Stan, en la expresión 2.35 para calcular la lámina escurrida Le . La Le , multiplicada por el área de

4. MATERIALES Y MÉTODOS

la subcuenca dio como resultado el volumen escurrido *Ves* para cada una. Todos los valores de los parámetros descritos en el proceso de cálculo y los resultados de lámina escurrida *Le* y del Volumen escurrido para cada subcuenca (*Ves*), para las 53 subcuencas de la Cuenca Huixtla, se exponen en el cuadro 4.43.

De la sumatoria de los *Ves*, mostrada en la penúltima columna se obtuvo el *Ve* para la Cuenca Huixtla por el Modelo Agregado, cuyo valor es $304,115,519.13 \text{ m}^3 = 304.115 \text{ Mm}^3$ e implica una diferencia con el Modelo Distribuido de 0.97 %, por lo que son prácticamente iguales y pueden usarse indistintamente.

Adicionalmente, en la columna final del cuadro 4.43 se muestran las diferencias porcentuales entre los valores de *Ves* obtenidos por el Modelo Distribuido y el Agregado, observándose que en promedio ésta es de 1.07 %, por lo que se concluye que los resultados por ambos métodos, son también prácticamente iguales.

Cuadro 4.43. Cálculo de la lámina escurrida *Le* y del volumen escurrido en las subcuencas (*Ves*) de la Cuenca Huixtla por el Método Agregado

SUBCUENCA	<i>NC</i> ₂	<i>NC</i> ₃	<i>Sr</i>	<i>Pm</i>	<i>Le</i>	<i>Ac</i>	<i>Ve</i>	Δ <i>vec</i>
NÚM.	(adim)	(adim)	(adim)	mm	(m)	(ha)	(m ³)	(%)
1	73	88	34.64	867.22	0.83	1,047.08	8,659,319.06	-1.74
2	73	88	34.64	809.41	0.77	470.78	3,621,613.87	-2.25
3	73	88	34.64	742.29	0.70	845.96	5,941,045.01	-2.24
4	79	91	25.12	662.73	0.63	946.03	5,993,186.43	-3.44
5	79	91	25.12	807.80	0.78	263.94	2,054,554.33	-3.65
6	65	82	55.76	693.85	0.63	1,192.90	7,529,017.89	-1.89
7	73	88	34.64	873.03	0.83	930.48	7,749,021.11	-1.91
8	73	88	34.64	859.57	0.82	596.23	4,885,260.88	-5.07
9	79	91	25.12	934.30	0.90	760.09	6,877,417.13	-3.48
10	65	82	55.76	926.87	0.86	665.20	5,741,758.32	0.37
11	69	85	44.82	959.62	0.91	548.07	4,975,653.71	-1.73
12	65	82	55.76	961.55	0.90	184.33	1,654,790.15	0.92
13	48	68	119.53	992.40	0.86	406.36	3,503,213.77	4.10
14	69	85	44.82	976.09	0.92	33.68	311,299.93	0.24
15	73	88	34.64	795.07	0.75	652.87	4,928,936.36	-2.31
16	73	88	34.64	833.60	0.79	1,139.65	9,042,316.08	-2.69
17	79	91	25.12	885.61	0.86	55.84	478,080.70	-1.29
18	65	82	55.76	913.10	0.85	608.82	5,171,552.80	-3.06
19	73	88	34.64	649.81	0.61	440.13	2,684,868.07	-3.84
20	65	82	55.76	718.52	0.66	1,043.24	6,840,382.63	-2.98
21	79	91	25.12	730.80	0.70	305.66	2,144,190.69	-3.25

22	79	91	25.12	763.58	0.73	221.41	1,625,681.22	-4.84
23	65	82	55.76	820.18	0.76	1,310.12	9,915,872.48	-4.39
24	65	82	55.76	832.78	0.77	1,337.11	10,287,936.60	-5.70
25	72	87	37.95	877.89	0.83	476.32	3,972,181.06	-7.21
26	65	82	55.76	841.76	0.78	496.96	3,868,137.74	-3.13
27	48	68	119.53	1,007.52	0.88	676.91	5,936,745.27	5.94
28	65	82	55.76	974.67	0.91	541.99	4,936,513.42	0.46
29	79	91	25.12	766.49	0.74	615.79	4,539,278.86	-3.69
30	65	82	55.76	826.89	0.76	751.78	5,740,214.84	-2.93
31	65	82	55.76	1,007.39	0.94	45.39	428,226.41	2.80
32	65	82	55.76	986.10	0.92	563.35	5,195,263.36	-0.20
33	69	85	44.82	1,034.54	0.98	405.29	3,982,496.16	-3.86
34	69	85	44.82	1,020.25	0.97	77.73	752,709.47	-0.28
35	86	95	13.37	1,030.84	1.01	15.64	158,741.23	-2.55
36	65	82	55.76	990.31	0.93	419.94	3,890,351.65	-1.46
37	61	79	67.52	1,025.42	0.95	630.54	5,981,432.00	-1.78
38	48	68	119.53	1,006.13	0.88	550.48	4,820,346.77	4.18
39	61	79	67.52	1,044.73	0.97	119.64	1,157,943.31	0.59
40	69	85	44.82	1,038.98	0.99	750.17	7,404,635.66	-2.97
41	86	95	13.37	1,052.42	1.04	8.40	87,069.86	-3.86
42	65	82	55.76	1,038.72	0.97	210.68	2,053,460.70	2.19
43	65	82	55.76	1,003.88	0.94	1,086.93	10,216,464.50	0.47
44	65	82	55.76	1,065.45	1.00	442.19	4,427,839.55	1.70
45	48	68	119.53	998.05	0.87	1,056.11	9,163,637.04	3.79
46	48	68	119.53	1,051.23	0.92	1,172.44	10,789,408.57	6.27
47	48	68	119.53	987.77	0.86	973.99	8,352,180.79	3.88
48	74	88	34.64	1,083.63	1.04	299.14	3,120,466.50	-0.71
49	65	82	55.76	1,100.55	1.04	979.62	10,152,364.11	1.42
50	65	82	55.76	1,046.32	0.98	3,597.73	35,339,146.25	-0.04
51	48	68	119.53	1,044.87	0.91	178.16	1,628,314.67	3.06
52	65	82	55.76	1,110.58	1.05	265.19	2,774,852.17	1.75
53	86	94	16.21	995.48	0.98	2,112.92	20,628,128.04	-4.38
SUMA				49,068.64	45.87	35,527.39	304,115,519.13	
PROMEDIO				925.82	0.87	670.33	5,738,028.66	-1.07

De estos resultados, se muestra que, los métodos Distribuido y Agregado para estimar el volumen de escurrimiento de la Cuenca Huixtla, empleando el concepto de número de curva, y las técnicas de sistemas de información geográfica, álgebra de mapas y números de base 10, dieron resultados muy similares y que por lo tanto se pueden aplicar indistintamente. Sin embargo, se puede afirmar, que por la forma de generar a

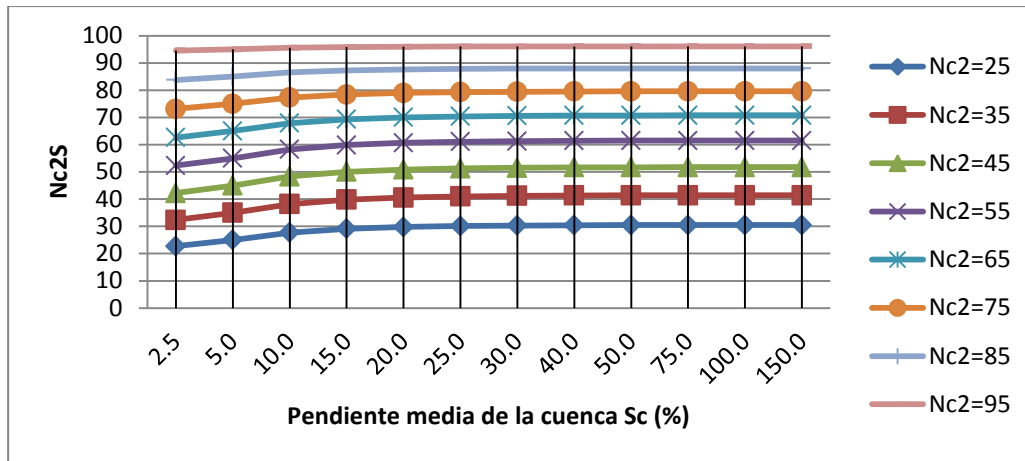
4. MATERIALES Y MÉTODOS

nivel de celda el cálculo de los parámetros y al final la magnitud del escurrimiento con el Método Distribuido, éste es el más confiable y su valor debe adoptarse para el escurrimiento de la cuenca, máxime si se considera lo expuesto por Arellano (2012) quien refiere que, los métodos distribuidos permiten estimar la variabilidad espacial de la lluvia y la heterogeneidad de las características hidrológicas de la cuenca, además de que, el método distribuido, permite aplicar el modelo y evaluar el efecto del cambio de uso del suelo así como de sus condiciones físicas en la distribución espacial y temporal del escurrimiento superficial.

4.3.5. PROPUESTA PARA CONSIDERAR LA PENDIENTE DE LA CUENCA EN LA DETERMINACIÓN DISTRIBUIDA DEL N_c

Se parte de que la pendiente del terreno en general y en una cuenca en particular, es de la mayor importancia para determinar la magnitud del escurrimiento; por tanto, su efecto conceptual y en el cálculo del N_c debe considerarse; sin embargo la expresión 2.45 desarrollada por Williams (1995) y citada por Neitsch, *et al.* (2001), que es la única encontrada en la literatura sobre el tema, no es consistente ni aplicable a las condiciones de la zona de estudio debido a las siguientes consideraciones. Como un detalle a la cita de Neitsch, *et al.* (2001), hay que precisar que el valor de la pendiente de la cuenca debe introducirse en la expresión en decimal y no en porcentaje como ellos lo indican.

- a) Se recomienda para corregir el valor de N_c de tablas para valores mayores de 5%, indicando que para valores menores no tiene impacto la pendiente, y por tanto no se requiere corregir por este concepto; sin embargo, revisando la estructura de la expresión, se ve que las mayores magnitudes de correcciones al N_c , se dan para valores pequeños de pendiente, haciéndose menores a medida que la pendiente crece, y tendiendo a ser nula para Sc del orden de 40 %, de modo que la gráfica es una curva que se hace asintótica a una recta horizontal, a partir de ese valor, como se aprecia en la graficación de la expresión mostrada en la gráfica 4.5 para algunos valores de N_c en el rango en que éste oscila y para varios valores de pendiente.
- b) El comportamiento de la expresión, no corresponde con la concepción del fenómeno de escurrimiento, que se asume variante y proporcional a la pendiente del terreno, debiendo ser, si no asintótica a una recta vertical, sí a una con pendiente positiva. De hecho, a mayor valor de la pendiente la componente vertical del fluido es creciente y la componente de la velocidad del flujo también debe crecer, el escurrimiento debe incrementarse así como su capacidad erosiva, y por tanto el valor de N_c . Por supuesto conviene y es necesario un análisis físico y matemático del fenómeno.
- c) En muchas partes del mundo, en México en particular dada su fisiografía y la topografía tan accidentadas, y con mayor especificidad en las cuencas costeras de Chiapas, donde las pendientes, con mucha frecuencia son mayores del 100 %, la expresión no tiene aplicabilidad.



Gráfica 4.5. Comportamiento de la expresión 2.45, desarrollada por Williams (1995) citada por Neitsch, et al. (2001) para calcular el efecto de la pendiente de la cuenca en el N_c

Se propone hacer una investigación sobre este tema para puntualizar y fundamentar el efecto de la pendiente en el N_c y, finalmente en el escurrimiento, generando una expresión para su cálculo. Una vez hecho lo anterior, se puede asignar un NB_{10} a la pendiente discretizándola, por ejemplo en los 9 rangos que se proponen en el cuadro 4.44, y generar planos codificados con este parámetro e integrarlo al modelo de SIG, TAM y NB_{10} para la determinación del N_c por el Método Distribuido en una cuenca.

Cuadro 4.44. Discretización de la pendiente de la cuenca (S_c), y valores propuestos del NB_{10} para el empleo este parámetro en el cálculo de la N_c por la TAM

S_c (%)		NB_{10}
RANGO	MEDIA	
0-5	2.5	1
5-10	7.5	2
10-20	15.0	3
20-30	25.0	4
30-50	40.0	5
50-75	62.5	6
75-100	87.5	7
100-125	115.0	8
125-150	137.5	9

5. RESULTADOS: ARTÍCULOS GENERADOS

5.1. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA PROVOCADA POR EL HURACÁN STAN EN LAS CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS, MÉXICO

Publicado en el número 2, volumen 30, trimestre abril-junio 2012, de la Revista TERRA LATINOAMERICANA, Órgano Científico de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. pp: 103-110.

Aquí se ha reeditado en el formato de la tesis, pero con el contenido textual publicado en la revista.

5.1.1. RESUMEN

Para evaluar la erosión hídrica provocada por las lluvias extremas del huracán Stan en octubre de 2005, en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, localizadas en Chiapas, México, se utilizó la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) mediante la técnica de álgebra de mapas. Se elaboraron mapas para cada uno de los factores de la EUPS para los años 1990 y 2005 (antes y después del huracán Stán) y se aplicó la EUPS a nivel de microcuencas. Para la clasificación de los resultados de pérdida de suelo se consideraron siete categorías de erosión hídrica: nula de 0 a 5, incipiente de 5 a 10, moderada 10 a 50, severa de 50 a 200, muy severa de 200 a 500, extrema de 500 a 1000 y muy extrema para valores mayores de 1000 $\text{Mg}\times\text{ha}^{-1}\times\text{año}^{-1}$.

Para noviembre de 2005, el mayor porcentaje de erosión hídrica se concentró en el rango de severa, para las cuencas de Huixtla y Huehuetán (con 39.08 y 20.36% de su área, respectivamente), mientras que para la cuenca del río Coatán el mayor porcentaje corresponde al rango muy severa (con 29.87% de su territorio). Poco más de la décima parte del territorio de las cuencas de estudio presentó tasas de pérdida de suelo muy extremas, con valores mayores de 1000 $\text{Mg}\times\text{ha}^{-1}\times\text{año}^{-1}$. Los resultados obtenidos están relacionados con las condiciones fisiográficas, topográficas y de suelos de las cuencas de estudio, pero particularmente de las condiciones de cobertura vegetal y magnitud de las lluvias extremas provocadas por el huracán Stan.

Palabras clave: erosión hídrica, EUPS, huracán Stan, Chiapas.

5.1.2. SUMMARY

To assess the water erosion resulting from the extreme rainfall caused by Hurricane Stan in October 2005, in the Huixtla, Huehuetán and Coatán river basins, located in the Mexican state of Chiapas, the Universal Soil Loss Equation (USLE) was applied using the map algebra technique. Maps were prepared for each of the USLE factors for the years 1990 and 2005 (before and after Hurricane Stan), and the USLE was applied at the sub-basin level. In order to classify the erosion results, seven water erosion categories were used: negligible, from 0 to 5; incipient, 5 to 10; moderate, 10 to 50; severe, 50 to 200; very severe, 200 to 500; extreme, 500 to 1000; and very extreme, for values above 1000 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$. In November 2005, the largest percentage was concentrated in the severe for the Huixtla and Huehuetán basin (with 39.08 and 20.36% of basin areas). As for the Coatán basin, the highest percentage of soil loss was in the very severe range (with 29.87% of its area belonging to this category). Just over one-tenth of the area covered in this study had soil loss rates in the very extreme range, with values above 1000 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$. The results obtained are related to the physiographic, topographic and soil conditions of the basins studied, but especially to the vegetation conditions and the magnitude of the extreme rainfall caused by hurricane Stan.

Index words: water erosion, USLE, hurricane Stan, Chiapas.

5.1.3. INTRODUCCIÓN

Los cambios en el uso del suelo y los procesos erosivos derivados de ellos tienen influencia en los procesos hidrológicos y biológicos de las cuencas y ecosistemas. La erosión hídrica es uno de los principales problemas ambientales en todo el mundo, particularmente en la modificación del paisaje de las cuencas costeras (Toledo, 2006). La erosión hídrica no sólo afecta la productividad de los terrenos, también tiene impacto aguas abajo a través de la sedimentación y la contaminación provocada por el arrastre de las partículas del suelo (Gómez *et al.*, 2007).

En este sentido, Röder *et al.* (2006), refiere que la disminución de la cobertura vegetal, podría hacer desaparecer la capa protectora del suelo y por consiguiente exponerlo aún más al efecto erosivo de la lluvia. Por una parte, la erosión hídrica baja la capacidad productiva del suelo, disminuye su fertilidad afectando la estabilidad fisiológica de las plantas, además de disgregar material consolidado; por otro lado, en zonas montañosas la erosión hídrica puede causar deslizamiento de suelos, generando sedimentación en el fondo de los valles, arrastre de sólidos y solubles que impactan negativamente los cuerpos de agua y su calidad.

Evidentemente todos estos problemas generan directa o indirectamente importantes daños económicos e incluso sociales, lo que justifica y fundamenta la realización de estudios, que sean la base en la toma de decisiones para el control de la erosión hídrica.

5. RESULTADOS. ARTÍCULOS GENERADOS

La erosión causada por la lluvia se calcula con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo EUPS (o USLE por sus siglas en inglés), desarrollada originalmente por Wischmeier y Smith (1978), (ecuación 1) y adaptada para su uso en México por Figueroa *et al.* (1991).

$$P_s = R \times K \times LS \times C \times P \quad (5.1)$$

Donde:

P_s es la pérdida de suelo en $Mg \times ha^{-1} \times año^{-1}$;
 R es el factor de erosividad de la lluvia en $MJ \times mm \times ha^{-1} \times h^{-1} \times año^{-1}$;
 K es el factor de erodabilidad del suelo en $MJ \times mm \times ha^{-1} \times h^{-1} \times año^{-1}$;
 LS es el factor de longitud y grado de la pendiente (adimensional);
 C es el factor del manejo de vegetación (adimensional); y
 P es el factor de prácticas de manejo (adimensional).

La erosividad, se refiere al potencial energético de las gotas de lluvia para desprender las partículas del suelo y provocar la erosión, la cual se mide con los índices de erosividad. Los índices de erosividad más importantes y de mayor aplicación son el de Wischmeier (EI_{30}), Hudson ($KE > 25$), Lal (Alm) y Fournier (F) modificado por Arnoldus. El factor R de la EUPS se calcula con la sumatoria de los índices EI_{30} de los eventos de lluvia durante el año. La estimación del factor R en México en función de la precipitación media anual (Pp , en mm) es diferente y es propuesto por Figueroa *et al.* (1991). Para la cuenca del río Huehuetán Chiapas, Baumann y Arellano (2003), proponen para calcular R la ecuación 5.2.

$$R = 14.523 Pp - 6601 \quad (5.2)$$

El factor de erodabilidad K , incorpora la susceptibilidad del suelo a la erosión. Los valores del factor K se calculan con la ecuación 3 propuesta por Wischmeier y Smith (1978), en la que M es el parámetro que depende del tamaño de las partículas del suelo; a es el contenido de materia orgánica (%) del suelo; b es un parámetro que depende de la estructura del suelo y c del tipo de permeabilidad o conductividad hidráulica del perfil del suelo.

$$K = 0.1317 \frac{2.1 \times 10^4 (12 - a) \times M^{1.14} \times 3.25(b - 2) + 2.5(c - 3)}{100} \quad (5.3)$$

El factor LS incorpora el efecto de la topografía de un terreno (longitud y pendiente) que afecta significativamente la pérdida de suelo por erosión hídrica. El factor topográfico LS se calcula con la ecuación 5.4, en la que Lh , es la longitud de la pendiente del terreno (m); m es un término exponencial (adimensional) y α_h , es el ángulo de la pendiente.

$$LS = \left(\frac{LI}{22.1}\right)^m (65.41 \times \text{sen}^2 \alpha_n + 4.56 \times \text{sen} \alpha_n + 0.065) \quad (5.4)$$

Para determinar la distribución espacial del parámetro C , es necesario conocer con detalle el uso actual del suelo, para lo que se recurre al uso de imágenes de satélite y su verificación en campo. Para la determinación del factor C según la cobertura vegetal se proponen 15 valores para diferentes usos del suelo en la Sierra Madre de Chiapas.

El factor P , representa el efecto de las prácticas de conservación de suelo y agua. El valor de P se encuentra entre 0 y 1 (adimensional). Para los propósitos de este trabajo, se considera $P = 1$; es decir, sin prácticas de conservación. Debido a su estructura, el modelo de la EUPS puede evaluarse mediante la técnica de álgebra de mapas, si se genera un plano base debidamente georeferenciado para cada uno de los parámetros de la ecuación. Dicha técnica consiste en la multiplicación de los valores de cada parámetro de la EUPS correspondientes al mismo pixel en el plano respectivo. Actualmente, el uso de esta técnica es más factible y sencillo con el empleo de las tecnologías que utilizan imágenes de satélite para determinar el uso del suelo, los Modelos de Elevación Digital (MED) para mostrar y analizar la topografía del terreno, y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la operación de la información y la generación de mapas de erosión hídrica a nivel de cuencas hidrográficas (Mellerowicz *et al.*, 1994).

La aplicación de la EUPS a nivel de cuencas hidrológicas, permite la estimación promedio anual de la pérdida de suelo para la planificación y jerarquización de áreas prioritarias que coadyuve a acciones para su reducción o mitigación a través de las prácticas de conservación de suelo y agua (Mellerowicz *et al.*, 1994; Kinnell, 2005; y Gómez *et al.*, 2007).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar el impacto del huracán Stán en la erosión hídrica de las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán del estado de Chiapas, aplicando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, mediante la técnica de Álgebra de Mapas.

5.1.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, son parte de la Región Hidrológica 023 Costa de Chiapas y se ubican en la región agrícola del Soconusco, Chiapas, en la frontera sur de México. El área de estudio presenta las siguientes coordenadas geográficas: en el extremo superior izquierdo $15^\circ 23' 15''$ N y $92^\circ 28' 49''$ O y el extremo inferior derecho $14^\circ 53' 36''$ N y $91^\circ 56' 59''$ O. Esta región se caracteriza por la presencia de suelos profundos de origen volcánico muy intemperizados, en laderas escarpadas de la cuenca superior y de aluvión en la planicie costera; las condiciones climáticas prevalecientes son del trópico húmedo con láminas anuales promedio de precipitación de 4,200 mm (Baumann y Arellano, 2003).

5. RESULTADOS. ARTÍCULOS GENERADOS

Se aplicó la EUPS mediante la técnica de Álgebra de Mapas, para estimar la pérdida de suelo por erosión hídrica en las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, del estado de Chiapas, México, afectadas por las lluvias del huracán Stán en octubre de 2005 para las condiciones de uso del suelo en febrero de 1990 y febrero de 2005 (antes del huracán Stán) y noviembre de 2005 (después del huracán Stan).

La caracterización de las cuencas se hizo utilizando el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) como una extensión del Arc View (ESRI, 2006) y empleando la información del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) obtenido del INEGI escala 1:10 000 y de la Facultad de Ingeniería de la UNAM (CONAGUA, 2006). Las superficies medidas para las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán fueron de 355.2739 km², 320.1571 km² y 462.0896 km², respectivamente; en ellas se definieron para su caracterización 53, 37 y 65 microcuencas.

El uso de suelo se determinó para 1990 con imágenes de satélite Landsat 4 TM y para 2005 con imágenes de satélite Spot, analizadas con el programa Idrisi Kilimanjaro (IDRISI, 2008) con la técnica de clasificación supervisada, definiendo áreas de entrenamiento en campo en las zonas de estudio con los siguientes tipos de vegetación: Selva Mediana Subcaducifolia, Bosque Pino-Encino, Bosque Encino-Pino, Uso Agrícola con Cultivos Permanentes como mango y café y, Suelo Desnudo, mediante la identificación de áreas de tamaño suficiente para que se pudieran visualizar en las imágenes satelitales. Con base en los tipos de uso del suelo dominantes en las cuencas de estudio, se determinaron 13 clases de uso del suelo. Se realizaron muestreos de suelos en 24, 17 y 18 sitios para las Cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, respectivamente, determinándose en el laboratorio los siguientes parámetros: textura, contenido de materia orgánica y porcentaje de arena fina para estimar el parámetro K , según la ecuación 5.3.

Se estimó el gasto pico provocado por las lluvias extremas del huracán Stan mediante el uso del modelo HEC-HMS (USACE, 2006) con base en los valores de lluvias registrados en los pluviógrafos ubicados en la Finca Argovia y Estación UNACH en la Cuenca del Río Huehuetán (CONAGUA, 2006). La simulación se hizo para febrero de 1990, febrero del 2005 y noviembre de 2005 para identificar el efecto de la cobertura vegetal en el caudal pico.

Para la estimación de la tasa de erosión, se determinaron los factores de la EUPS, tanto para 1990 como para 2005 (febrero y noviembre). El factor R se determinó con la ecuación 5.2 propuesta por Baumann y Arellano (2003), utilizando los datos de precipitación anual de 12 estaciones meteorológicas ubicadas en las cuencas en estudio; con los valores de R se elaboraron los planos de *isoerodentas* de cada cuenca. El parámetro K se calculó a partir de los datos del muestreo de suelos utilizando la ecuación 5.3. El factor LS se calculó con la aplicación de la ecuación 5.4 mediante el Modelo

Digital de Elevaciones (MDE) generado a partir de las cartas vectoriales utilizando los programas ArcView (ESRI, 2006) y ArcMap (ESRI, 2008), dividiendo las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán en 325, 156 y 504 áreas tributarias, respectivamente. El parámetro C , se determinó a partir de las clases de uso de suelo identificadas en las imágenes de satélite, previa verificación de su huella espectral en campo y aplicando los valores de C propuestos por CONAGUA (2006) para cada uso del suelo. El factor P , con fines de comparación entre escenarios se consideró igual a 1; es decir, sin prácticas de conservación de suelo y agua en las tres cuencas de estudio.

Con los resultados de cada uno de los parámetros de la EUPS, se generaron mapas con valores discretos o planos con isolíneas como el de *isoerodentas*, que se multiplicaron algebraicamente mediante el uso de la herramienta Map Calculator de la extensión Spatial Analyst de ArcView (ESRI, 2006), para obtener un mapa de tasas de erosión para cada cuenca y para cada uno de los cuatro escenarios analizados y definidos de la siguiente forma: escenario 0 con los valores de los parámetros C y R correspondientes a febrero de 1990; escenarios 1 al 3 con uso de las lluvias del huracán Stán en la estimación de R , con el parámetro C para el uso del suelo, de febrero de 1990 para el escenario 1, con el parámetro C para el uso del suelo de febrero de 2005 para el escenario 2 y con el parámetro C para el uso del suelo de noviembre de 2005 para el escenario 3. Para los cuatro escenarios, los parámetros K , LS y P fueron los mismos. Para la clasificación de los resultados de pérdida de suelo obtenidos se consideraron las siguientes categorías: nula de 0 a 5, incipiente de 5 a 10, moderada 10 a 50, severa de 50 a 200, muy severa de 200 a 500, extrema de 500 a 1000 y muy extrema para mayores de $1000 \text{ Mg} \times \text{ha}^{-1} \times \text{año}^{-1}$, respectivamente (CONAGUA, 2006).

5.1.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los escurrimientos pico estimados fueron de 2146.95, 2544.00 y 2794.80 $\text{m}^3 \times \text{s}^{-1}$, para los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, respectivamente, que son acordes a su precipitación y a las condiciones de cobertura y pendiente de los respectivos ríos y cuencas.

El uso de suelo en los escenarios de estudio fue: en 1990 para la Cuenca Huixtla predominaron la Selva Mediana Subcaducifolia (SMSC/VS) en un 45.69%, el Bosque Pino-Encino (BPQ) en un 13.38% y Uso Agrícola con Cultivos permanentes como mango y café (UA-CP) en un 10.35% para un total de 69.42% y que para después del huracán Stan, la cobertura se redujo al 18.27%. Para la Cuenca Huehuetán, en 1990, las clases de mayor cobertura fueron la SMSC/VS con un 37.84%, el UA-CP con un 23.44% y el Bosque Encino-Pino (BQP) con un 12.72% para un total del 74%; para febrero de 2005, estas clases habían cambiado sus coberturas a 28.67, 23.21 y 9.00%, respectivamente, con una reducción del 13%, particularmente afectada la SMSC/VS. Para la cuenca del río Coatán, las tres clases con mayor cobertura en 1990 fueron: SMSC/CP con 20.76%, suelo desnudo (S-DESN) con 20.69% y el BQP con 17.63% para un total de 59.08% de cobertura. En el 2005, el área de influencia de estas clases cambiaron a 7.35, 10.68 y

28.12%, respectivamente, para un total del 46.15% de cobertura. Las imágenes de la figura 5.1, muestran el uso del suelo, para la cuenca del Río Huehuetán, en febrero 1990, en febrero de 2005 y en noviembre de 2005, respectivamente, en los tres escenarios analizados, donde se aprecian las variaciones indicadas.

Los resultados de las tasas de pérdida de suelo por erosión hídrica para las tres cuencas estudiadas y los cuatro escenarios analizados se presentan en el cuadro 5.1 y en la figura 5.2. El mapa de erosión para el escenario 3, para la cuenca Huixtla (figura 5.2), es del tipo que se elaboraron para los 12 casos de estudio.

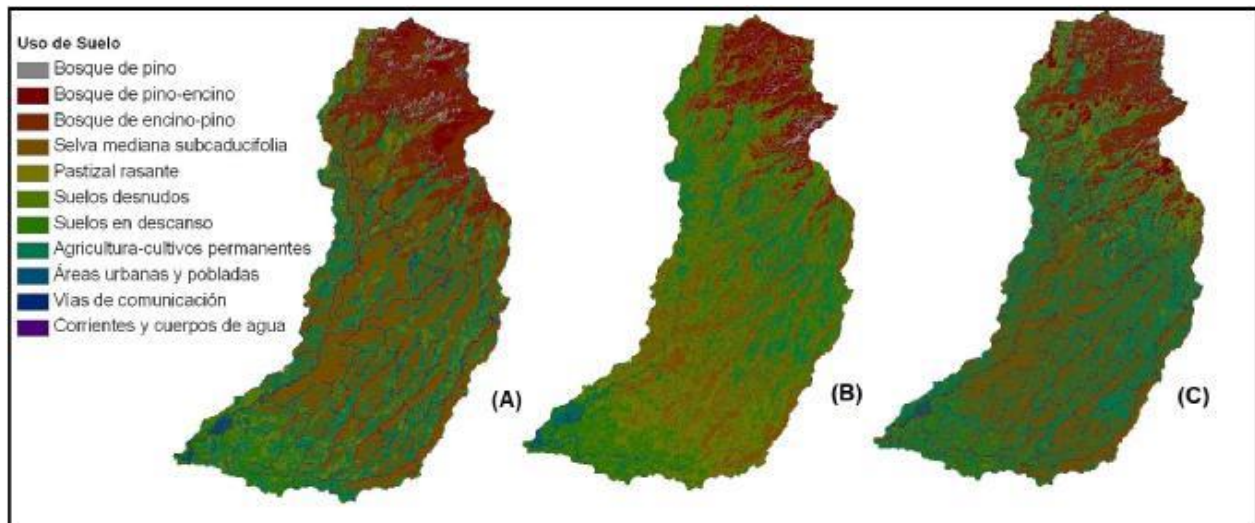


Figura 5.1. Uso de suelo en febrero de 1990 (A), febrero (B) y noviembre (C) de 2005 en la cuenca del Río Huehuetán, Chiapas.

Para la simulación correspondiente a noviembre de 2005, el menor porcentaje de superficie afectada por erosión corresponde a la categoría de erosión incipiente de (5 a 10 $\text{Mg}\times\text{ha}^{-1}\times\text{año}^{-1}$), con valores de 0.50% en Huixtla, 4.32% en Huehuetán y 1.10% para Coatán.

El mayor porcentaje de superficie afectada por erosión se concentra en el rango de severa de (50 a 200 $\text{Mg}\times\text{ha}^{-1}\times\text{año}^{-1}$), para las cuencas Huixtla y Huehuetán, con una marcada diferencia entre ellas: 39.08% en Huixtla y 20.36% en Huehuetán, mientras que en Coatán el mayor porcentaje se concentra en la categoría de muy severa de (200 a 500 $\text{Mg}\times\text{ha}^{-1}\times\text{año}^{-1}$) con un 29.87% de superficie afectada. Alrededor de una décima parte de las cuencas (10.93% para Huixtla, 11.88% para Huehuetán y 8.48% para Coatán), presentan una erosión nula (de 0 a 5 $\text{Mg}\times\text{ha}^{-1}\times\text{año}^{-1}$). Valores de pérdida de suelo mayores de 1000 $\text{Mg}\times\text{ha}^{-1}\times\text{año}^{-1}$ representan un 13.75, 20.39 y un 16.95% para las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, respectivamente.

Al comparar los cuatro escenarios (figura 5.3), se observa que el escenario 0 presenta una mayor superficie de afectación, con valores menores de $200 \text{ Mg} \times \text{ha}^{-1} \times \text{año}^{-1}$ y en general disminuye en las tres cuencas; este comportamiento, es más marcado en la cuenca Huixtla, donde en el escenario 0, un 28.5% de la cuenca presentó valores mayores de $200 \text{ Mg} \times \text{ha}^{-1} \times \text{año}^{-1}$ mientras que en el escenario 3 (después del huracán Stán), un 41.37% de la cuenca presenta ya valores de pérdida de suelo mayores de $200 \text{ Mg} \times \text{ha}^{-1} \times \text{año}^{-1}$ debido a los cambios en la cobertura vegetal (factor C) y el impacto de las lluvias extremas del huracán Stan (factor R). Los resultados de pérdida de suelo por erosión hídrica estimados en las cuencas de estudio, son análogas a los reportados por CONAGUA (2006) para las cuencas de la Sierra Madre de Chiapas.

Cuadro 5.1. Tasa de erosión por superficie afectada para los cuatro escenarios y para las tres cuencas

Tasa de erosión $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$	Cuenca	Escenario 0		Escenario 1		Escenario 2		Escenario 3	
		km^2	%	km^2	%	km^2	%	km^2	%
00-05	Huixtla	30.84	8.73	28.69	8.12	18.41	5.21	38.61	10.93
	Huehuetán	41.96	13.21	37.74	11.88	29.79	9.38	37.73	11.88
	Coatán	27.95	6.06	27.89	6.05	33.47	7.26	39.12	8.48
05-10	Huixtla	3.52	1.00	2.39	0.68	2.5	0.71	1.75	0.50
	Huehuetán	15.98	5.03	13.72	4.32	16.11	5.07	13.72	4.32
	Coatán	5.20	1.13	4.39	0.95	5.03	1.09	5.07	1.10
10-50	Huixtla	48.77	13.81	20.71	5.86	18.61	5.27	28.71	8.13
	Huehuetán	43.83	13.80	37.41	11.78	32.64	10.28	40.17	12.65
	Coatán	41.08	8.91	38.87	8.43	27.36	5.93	27.01	5.86
50-200	Huixtla	169.45	47.97	124.83	35.34	108.85	30.82	138.04	39.08
	Huehuetán	90.56	28.52	85.79	27.01	78.82	24.82	64.65	20.36
	Coatán	122.01	26.45	116.31	25.21	88.1	19.10	113.92	24.70
200-500	Huixtla	61.49	17.41	111.05	31.44	94.02	26.62	76.83	21.75
	Huehuetán	63.09	19.87	66.27	20.87	63.41	19.97	57.47	18.10
	Coatán	107.48	23.30	111.69	24.21	114.93	24.91	137.77	29.87
500-1000	Huixtla	23.48	6.65	31.59	8.94	39.12	11.08	20.72	5.87
	Huehuetán	25.89	8.15	32.35	10.19	34.58	10.89	39.07	12.30
	Coatán	32.33	7.01	35.51	7.70	62.4	13.53	60.2	13.05
> 1000	Huixtla	15.67	4.44	33.96	9.61	71.71	20.30	48.56	13.75
	Huehuetán	36.27	11.42	44.3	13.95	62.23	19.60	64.77	20.39
	Coatán	125.24	27.15	126.63	27.45	130	28.18	78.2	16.95
Totales	Huixtla	353.22	100.00	353.22	100.00	353.22	100.00	353.22	100.00
	Huehuetán	317.58	100.00	317.58	100.00	317.58	100.00	317.58	100.00
	Coatán	461.29	100.00	461.29	100.00	461.29	100.00	461.29	100.00

5.1.6. CONCLUSIONES

La técnica de Álgebra de Mapas, resultó una herramienta adecuada para la aplicación de la EUPS, en la estimación de la erosión hídrica al operar un mapa por cada factor de la ecuación.

Es necesaria una calibración *in situ* de los valores del factor *C* así como de la pérdida de suelo debido a la complejidad de los sistemas de cultivo de la región y a las condiciones propias de lluvia, suelos y topografía.

Las cuencas de los ríos Huixtla y Coatán presentan un comportamiento heterogéneo y análogo en la superficie afectada en diferentes categorías de pérdida de suelo; en contraste, la cuenca del río Huehuetán presenta un comportamiento más uniforme entre categorías y entre escenarios, lo cual corresponde a su configuración topográfica y fisiográfica, pero particularmente a las mejores condiciones de cobertura vegetal de la cuenca.

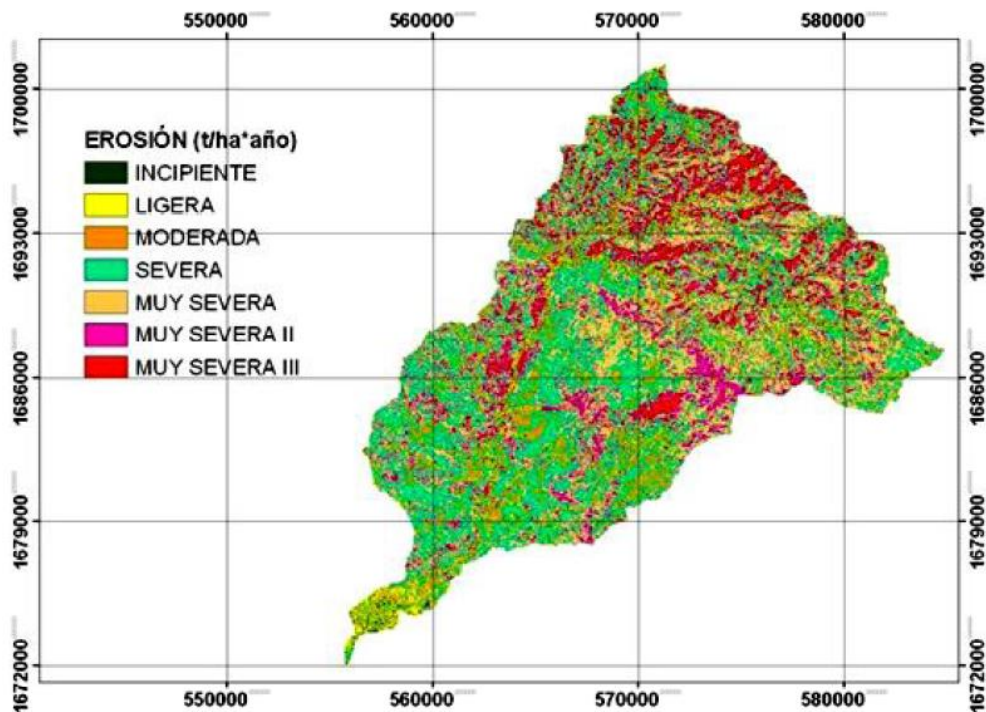


Figura 5.2. Mapa de erosión para el escenario 3 en la cuenca del Río Huixtla

5.1.7. LITERATURA CITADA

Baumann J. and J.L.L. Arellano-Monterrosas. 2003. Measuring rainfall erosivity characteristics and annual R-factors for adjustment of the USLE in a tropical climate.

pp. 69-74. In: D. Gabriels and W. Cornelis (eds.). 25 years of assessment of erosion-proceedings. Ghent, Belgium.

CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). 2006. Evaluación de los efectos del cambio de cobertura y de uso del suelo en la erosión hídrica y las relaciones precipitación-escurrimiento en las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán del estado de Chiapas. Informe final del Convenio de Colaboración Especifico núm. SGIH-FS-CHS-06-TT-193-RF-CC elaborado entre la Gerencia Regional Frontera Sur de la Comisión Nacional del Agua y la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.

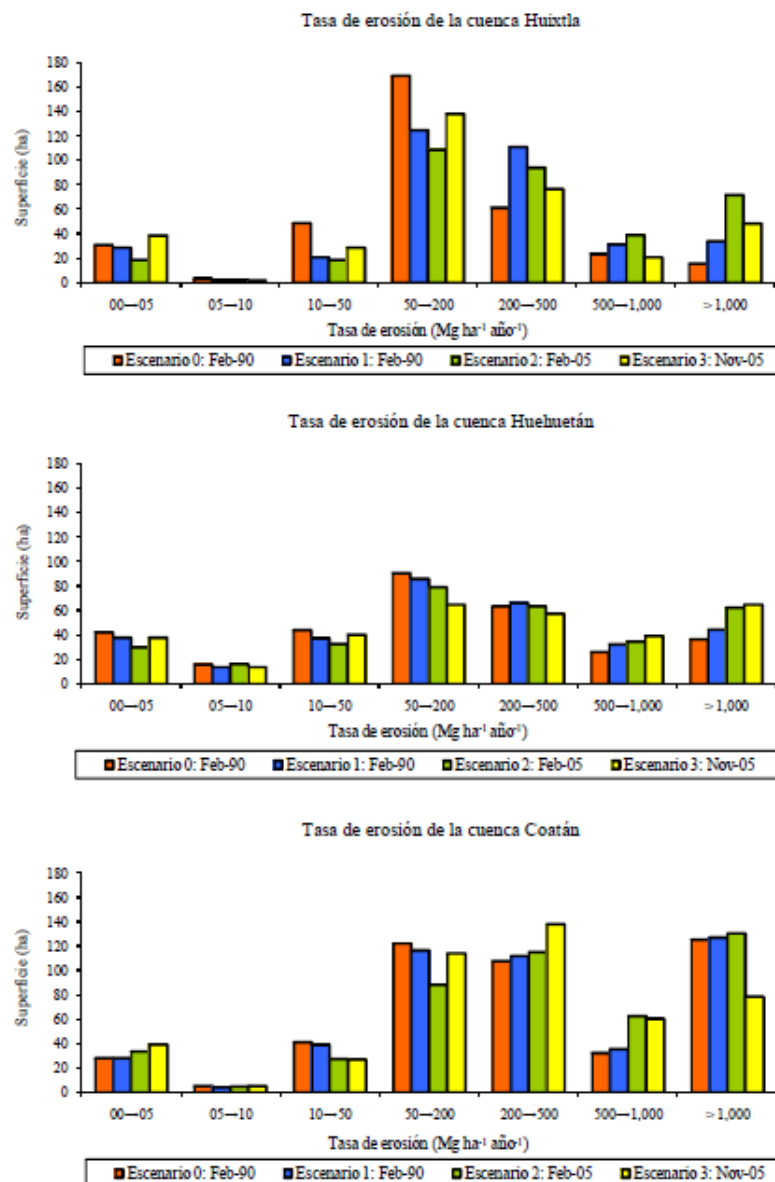


Figura 5.3. Distribución de las tasas de pérdida de suelo para las cuencas de los ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán.

- Eastman, R. 2006. IDRISI, Kilimanjaro edition. University George Perkins Marsh Institute at Clark University. Worcester, MA, USA.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2006. ArcView GIS 3.2. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, CA, USA.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute). 2008. ArcGIS 9/ArcMap version 9.3. Environmental Systems Research Institute, Inc. Redlands, CA, USA.
- Figuroa S., B., A. Amante O., H. G. Cortés T., J. Pimentel L., E. S. Osuna C., J. M. Rodríguez O. y F. J. Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. SARH-Colegio de Postgraduados. Montecillo, estado de México, México.
- Gómez Jiménez, I., R. Romero Calcerrada y J. M. Beneitez López. 2007. Consideración de la dinámica espacio-temporal para la definición de actuaciones defensivas contra la erosión. Rev. Int. Cien. Tec. Infor. Geográf. 7: 1-22.
- Kinnell, P. I. A. 2005. Why the universal soil loss equation and the revised version of it do not predict event erosion well. Hydrol. Proc. 19:851-854.
- Mellerowicz, K. T., H. W. Rees, T. L. Chow, and I. Ghanem. 1994. Soil conservation planning at the watershed level using the Universal Soil Loss Equation with GIS and microcomputer technologies: A case study. J. Soil Water Conserv. 49:194-200.
- Röder, J, R. Villavicencio García y P. Zarazúa Villaseñor. 2006. Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo «USLE» en SIG para estimar riesgo potencial de erosión en el área protegida «sierra de Quila». pp. 156-162. *In: XVII Semana de la Investigación Científica. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara. Guadalajara, Jalisco, México.*
- Toledo, Alejandro. 2006. Agua, hombre y paisaje. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, D. F.
- USACE (United States Army of Corps Engineers). 2006. Hydrologic modeling system HEC-HMS. User's manual. Version 3.1. Hydrologic Engineering Center. Davis, CA, USA.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses, a guide to conservation planning. Agriculture Handbook 537. United States Department of Agriculture. Science, and Education Administration. Washington, DC, USA.

5.2. AJUSTE DEL NÚMERO DE CURVA PARA TRES NANOCUENCAS INSTRUMENTADAS EN LA CUENCA DEL RÍO HUIXTLA, CHIAPAS, MÉXICO

Enviado y recibido para su publicación en la revista AGROCIENCIA, que es una revista científica auspiciada por el Colegio de Postgraduados. Aquí se incluye con el formato de edición de la Tesis, pero a la revista fue entregada conforme a sus normas de edición.

5.2.1. RESUMEN

Para emplear el concepto de número de curva N_c , en el cálculo del volúmenes de escurrimiento en cuencas tropicales, se identificaron los N_c de las tablas del Soil Conservation Service (SCS) del USDA, para las nanocuencas instrumentadas Rosita (con cobertura de pastizal con bosque), Hannover (café con sombra) y Berriozábal (acahual-maíz), ubicadas en la Cuenca del Río Huixtla, Chiapas, México, a partir de su Uso del Suelo, su Condición Hidrológica y su Grupo Hidrológico y se corrigieron por humedad antecedente (HA) empleando las expresiones del SCS, las propuestas por Chow y las reportadas por Dal-Ré y por pendiente y se compararon con los valores de N_c calculados a partir de datos medidos en campo de lámina precipitada (L_p) y lámina de escurrimiento (L_e).

Se obtuvo que las expresiones de Chow y las reportadas por Dal-Ré, calculan valores muy similares a los determinados por las expresiones del SCS al calcular la correcciones para las condiciones I y III de HA ; y, se concluyó que los valores de N_c obtenidos de las tablas del SCS para condiciones como las de la Nanocuenca Rosita, una vez corregidos por humedad antecedente y pendiente, deben adicionarse en 11, 9 y 9 unidades según se empleen las expresiones del SCS, de Chow o de Dal-Ré; en 9, 7 y 7, para el caso de la Nanocuenca Hannover y en 6, 4 y 5 unidades para la Nanocuenca Berriozábal, respectivamente.

Palabras clave: Ajuste, número de curva de escurrimiento, cuencas costeras, escurrimiento.

5.2.2. INTRODUCCIÓN

La estimación del volumen de escurrimiento (V_e) en una cuenca es un dato necesario para el diseño de la cortina de una presa para el almacenamiento de agua, para la generación de energía o para el control de avenidas, o para el proyecto de prácticas de conservación de suelo y agua o para la restauración de cuencas; el uso del coeficiente de escurrimiento (C_e) para su cálculo, definido en México en la Norma Oficial Mexicana NOM-CNA-011 (SEMARNAT, 2005), está limitado al rango de entre 350 y 2,150 mm de precipitación, por lo que no puede aplicarse a las condiciones que prevalecen en la Costa de Chiapas, donde frecuentemente se presentan valores mayores a 4,500 mm.

El uso del concepto de número de curva de escurrimiento N_c , definida por el Soil Conservation Service (SCS) del United States Agriculture Department (Mockus, 1949; Natural Resources Conservation Service, 2013; y Neitsch, *et al.*, 2001) a principios de la década de los 60 del siglo XX (Campos, 2002), dada por la expresión 5.5, para la estimación de V_e , algunos de cuyos valores se incluyen en el cuadro 5.2, reportados McCuen (2005) y Campos (2010) es una alternativa que se ha empleado por diversos autores y en muchos países, debido a que, predice el escurrimiento basado en datos de lluvia y características del suelo en cuencas donde no existen datos de aforo (Dal-Ré, 2003 y Arellano, 2012); sin embargo, no ha dado los resultados adecuados y esperados, debido que los valores definidos por el SCS, no son apropiados para zonas tropicales (Muzik, 1993) y a pesar de tener las ventajas de ser predictivo, estable y requerir un solo parámetro, tiene las desventajas de que los valores de escurrimiento obtenidos son muy sensibles ante un cambio de N_c , la falta información más detallada sobre su variación ante los diversos valores de humedad antecedente HA , la falta de precisión del método para diferentes coberturas, el desconocimiento de cómo el N_c se afecta por la escala espacial de aplicación y, que se desarrolló en condiciones específicas, por lo que no está regionalizado con base en la geología y clima y debe revisarse para cada región (Ponce and Hawkins, 1996). Al respecto, Ponce (1996), entrevistó a Mockus, uno de los autores del método, quien refirió que éste se generó para su aplicación en condiciones áridas con algunas limitaciones y para el promedio de varios eventos y no para eventos individuales.

$$N_c = \frac{25400}{S_r + 254} \quad (5.5)$$

En la expresión 5.6, S_r es el Parámetro de Retención, que depende de las condiciones del suelo, la cobertura vegetal y el manejo de los cultivos y se calcula con la expresión 2 (Neitsch, *et al.*, 2001) o bien la expresión 5.7, desarrollada por Hawkins (1993), y recomendada por él para la determinación o calibración en campo de los Números de Curva.

$$S_r = \frac{25400}{N_c} - 254 \quad (5.6)$$

$$S_r = 5 \left[Lp + 2Le - (4Le^2 + 5LpLe)^{0.5} \right] \quad (5.7)$$

En el Cuadro 1, la condición hidrológica se refiere a la situación que la cubierta vegetal o uso del suelo tiene para generar escurrimiento (independientemente del tipo de cobertura); se expresa como pobre (escasa cubierta y máximo escurrimiento), regular (condición media de cobertura y de escurrimiento) y bueno (buena y completa cobertura y mínimo escurrimiento) McCuen (2005); el grupo hidrológico del suelo, se define para cuatro condiciones definidas para los suelos mojados y denominadas: A, para suelos con bajo potencial de escurrimiento y alta velocidad de infiltración I (mayor de 7.6 mm/h); B,

para suelos con moderada I (de 3.8 a 7.6 mm/h); C para suelos que tienen baja I (de 1.3 a 3.8 mm/h); y D, para suelos con alto potencial de escurrimiento y baja I (de 0.0 a 1.3 mm/h).

Cuadro 5.2. Valores del número de curva (N_c) definidos por el SCS y reportados por McCuen (2005) y campos (2002)

DESCRIPCIÓN DEL USO DEL SUELO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	GRUPOS HIDROLÓGICOS DE SUELO			
		A	B	C	D
Tierras forestales, césped o huertos siempre verdes o deciduos.	Pobre	55	73	82	86
	Media	44	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Cultivos en surcos continuos	Pobre	72	81	88	91
	Buena	67	78	85	89
Muy ralo o baja E_{vt}		56	75	86	91
Ralo o baja E_{vt}		46	68	78	84
Normal o E_{vt} media		36	60	70	76
Espeso o alta E_{vt}		26	52	62	69
Muy espeso o alta E_{vt}		15	44	54	61

E_{vt} = evapotranspiración

El escurrimiento superficial directo (Le , en m) se estima como una función no-lineal de la precipitación (Pr , en m) y en las denominadas abstracciones iniciales (Ia), a partir de la expresión 5.8, que depende del contenido de humedad del suelo, el uso del suelo y el tipo de suelo (Arellano, 2012). Ia se calcula con la expresión 5.9 con $\lambda = 0.2$ y, el Ve (en m^3) se obtiene de la expresión 5.10, en el que Ac , es el área de la cuenca, en m^2 .

$$Le = \frac{(Pr - Ia)^2}{Pr + 4Ia} = \frac{(Pr - 0.2Sr)^2}{Pr + 0.8Sr} \quad (5.8)$$

$$Ia = \lambda Sr \quad (5.9)$$

$$Ve = Le \times Ac \quad (5.10)$$

Con el propósito de ampliar la aplicabilidad del método a otras condiciones, Mishra *et al.*, (2005), revisaron la metodología del N_c del SCS empleando datos que procedían de cuencas con superficies de entre 0.3 y 30,351.5 ha y datos de lluvia de 179 eventos registrados de 1 a 50 años; discretizaron la precipitación (Pr , en mm) en cinco clases de acuerdo a su magnitud: Clase A para eventos con $Pr \leq 12.7$, Clase B para $Pr \leq 25.4$

5. RESULTADOS. ARTÍCULOS GENERADOS

mm, Clase C para Pr entre 25.4 y 38.1, Clase D para Pr entre 38.1 y 50.8, y Clase E para $Pr > 50.8$; y propusieron la expresión 5.11 para el cálculo de Le , con $a = 0.5$ y λ de la expresión 5.10 igual a la mediana de lluvia por evento en la cuenca; encontraron que para eventos con Pr mayor de 38.1 mm la expresión 5.8 funciona bien, pero que en general para todos los eventos funcionaba mejor la expresión 5.11 propuesta por ellos.

$$Le = \frac{(Pr - Ia)^2}{Sr + a(Pr - Ia)} \quad (5.11)$$

Paz, (2009) por su parte, hizo un análisis matemático las expresiones del SCS asociadas al Nc , concluyendo que no tiene sustento hidrológico ya que es resultado de la hipótesis absurda de igualar dos líneas rectas ($Le = Lp$ y $Le = Pr - Sr$), lo cual sólo es posible cuando Sr tiende a cero y cuando Pr tiende a infinito, que coincide con lo referido por Mishra *et al.*, (2005) no obstante el distinto tipo de los análisis efectuados.

El Nc , varía con el contenido de humedad del suelo, pasando de sus valores mínimos cuando el suelo está a punto de marchitamiento permanente (PMP) a cerca de 100 cuando los suelos están saturados, (Neitsch, *et al.*, 2001), por lo que se debe evaluar la condición de humedad antecedente (CHA) en que se presentan los eventos. De acuerdo con McCuen (2005) y Aparicio (2012), el SCS define tres CHA, asociándolas a la lámina precipitada (Lp) de los 5 días previos a la fecha del evento analizado: I Seco, que corresponde a PMP, equivalente a una Lp de 25 mm; II Humedad media que equivale a Lp entre 25 y 50 mm; y III Húmeda, que corresponde a la Capacidad de Campo del suelo (CC) y equivale a más de 50 mm de Lp . La Nc se calcula con la expresión 5.12 para la condición de humedad I y se denomina Nc_1 , con la expresión 5.13 para la condición de humedad III y se denomina Nc_3 , en tanto que se denomina Nc_2 , cuando se refiere a la condición II y corresponde al obtenido de las tablas del SCS, como los que se incluyen en el cuadro 5.2.

$$Nc_1 = Nc_2 - \frac{20(100 - Nc_2)}{100 - Nc_2 + \exp[2.533 - 0.0636(100 - Nc_2)]} \quad (5.12)$$

$$Nc_3 = Nc_2 \times \exp[0.00673(100 - Nc_2)] \quad (5.13)$$

Alternativamente, Chow *et al.*, citados por Muzik (2002) propusieron las expresiones 5.14 y 5.15 para el cálculo de las condiciones de humedad antecedente I y III, respectivamente.

$$Nc_1 = \frac{4.2 Nc_2}{10 - 0.058 Nc_2} \quad (5.14)$$

$$Nc_3 = \frac{23Nc_2}{10 + 0.130Nc_2} \quad (5.15)$$

Y Dal-Ré (2003), presentó las expresiones 12 y 13 como alternativas para transformar la Nc por la CHA.

$$Nc_1 = \frac{Nc_2}{2.281 - 0.01281Nc_2} \quad (5.16)$$

$$Nc_3 = \frac{Nc_2}{0.427 + 0.00573Nc_2} \quad (5.17)$$

De otra parte, cuando la pendiente del terreno es mayor del 5 %, el Nc obtenido de las tablas, se debe ajustar aplicando la expresión 5.18 desarrollada por Williams (1995), citada por Neitsch, *et al.* (2001); en dicha expresión, Nc_{2S} es el número de curva para la condición de humedad II ajustado por pendiente y Sc es la pendiente promedio de la cuenca, en m/m.

$$Nc_{2S} = \frac{Nc_3 - Nc_2}{3} [1 - 2 \exp(-13.86Sc)] + Nc_2 \quad (5.18)$$

Para el cálculo de las Nc ajustadas por pendiente para las condiciones de humedad antecedente I y III, se emplean las expresiones 5.12 y 5.13, pero sustituyendo en ellas Sc_{2S} en lugar de Sc_2 ; similarmente, si se usan las expresiones 5.14, 5.15, 5.16 y 5.17, para el cálculo de los valores finales Nc_1 o Nc_3 , según corresponde, se emplean estas mismas expresiones, haciendo la sustitución indicada.

En la Cuenca Superior del Río Huehután, Chiapas, Arellano (2012), calibró el Nc para tres nanocuenas instrumentadas, obteniendo $Nc = 63$ para un bosque espeso con evapotranspiración para condiciones hidrológicas de suelo entre C y D; 46 para acahual, que correspondió a un bosque ralo con baja evapotranspiración para una condición hidrológica de suelo A; y 77 para cobertura de mango-pasto, que corresponde a un bosque natural ralo con baja evapotranspiración y para una condición de suelo entre B (con $Nc=73$) y C ($Nc=82$) de acuerdo con el cuadro 5.2. También para la Costa de Chiapas, Campos (2010), estimó el Nc a partir de los datos de lluvia máxima en 24 h, para las cuencas de los Ríos Despoblado con cobertura de bosque espeso con alta transpiración y grupo hidrológico entre C y D ($Nc = 64$) y Coatán ($Nc = 58$) con condición de bosque muy espeso con alta transpiración y grupo hidrológico entre C y D del SCS.

Por su parte, Ares *et al.* (2012), calibraron el N_c en una cuenca agropecuaria de la provincia de Buenos Aires, Argentina, con una superficie de 116 km², pendiente media del 2.8%, altitud de entre 340 y 188 m y suelos con velocidades de infiltración de entre 60 y 24 mm/h; analizaron en total 108 eventos ocurridos entre 2001 y 2007 y concluyeron que es necesario determinar la N_c con datos locales.

Con el presente estudio, se planteó ajustar los números de curva definidos por el SCS, para su aplicación a tres nanocuenas en condiciones tropicales con magnitudes altas de precipitación, cobertura de bosque y selva densa y permanente y fuertes pendientes, de la Cuenca del Río Huixtla, del estado mexicano de Chiapas; y evaluar las expresiones de Chow, citadas por Muzik (2002) y las reportadas por Dal-Ré (Dal-Ré) para el cálculo de las correcciones por CHA para las mismas condiciones.

5.2.3. MATERIALES Y MÉTODOS

El análisis del N_c se hizo para las nanocuenas Rosita, Hannover y Berriozábal, ubicadas en la Cuenca del Río Huixtla, del estado mexicano de Chiapas; la primera se caracterizó a partir de su levantamiento topográfico detallado y preciso con el que se generó un plano con curvas de nivel a cada 0.50 m y los parámetros mostrados en el cuadro 5.3, juntos con las características de las otras dos nanocuenas. Los datos empleados para el análisis, se obtuvieron de los informes del Proyecto MONITOREO DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN, DE LA COSTA DE CHIAPAS, desarrollado por la Comisión Nacional del Agua en colaboración de la Universidad Autónoma Chapingo entre 2009 y 2011. En la figura 5.4, se muestra la localización de las nanocuenas al interior de la Cuenca Huixtla.

Se analizaron 20, 83 y 21 eventos para las nanocuenas Rosita, Hannover y Berriozábal, respectivamente, partiendo de datos de lámina precipitada (L_p) y lámina escurrida (L_e), medidos en la salida de cada una, con un pluviógrafo tipo Hellman y un aforador tipo H con limnógrafo integrado. Se calculó el S_r , con la expresión 5.7 y el de N_c con la expresión 5.5, para cada uno de los eventos analizados, cuyos promedios se consideraron los correctos y base para fines comparativos de los obtenidos por tablas y corregidos, mismos que se muestran en el cuadro 5.4.

Con base el Uso del suelo, la Condición hidrológica y el Grupo hidrológico, sintetizadas en el cuadro 5.5, del cuadro 5.2 se determinaron los valores de tablas del N_c que corresponde con el N_{c_2} , para las tres Nanocuenas; con las fechas en que se presentaron los eventos se definió la CHA para para cada uno, y con base en ello, se calculó la corrección por HA , empleando las expresiones del SCS (5.12 o 5.13), las atribuidas a Chow (5.14 o 5.15) y las reportadas por Dal-Ré (5.16 o 5.17), según correspondió a la N_{c_1} o la N_{c_3} , respectivamente.

Cuadro 5.3. Localización y características de las nanocuenas Rosita, Hannover y Berriozábal

CARACTERÍSTICA O PARÁMETRO FISIOGRAFICO			NANOCUENCA		
NOMBRE	SÍMBOLO	UNIDAD	ROSITA	HANNOVER	BERRIOZÁBAL
Municipio			Huixtla	Tuzantán	Motozintla
Latitud norte	<i>Lat</i>	° ‘ “	15 09 47	15 10 34	015 15 37
Longitud oeste	<i>Lon</i>	° ‘ “	92 25 54	92 23 00	092 17 18
Altitud	<i>Alt</i>	m	116	613	1889
Área de la cuenca	<i>Ac</i>	ha	4.34	1.11	1.67
Longitud de la cuenca	<i>Lc</i>	m	431.92	100.00	221.29
Pendiente media de la cuenca	<i>Sc</i>	%	23.84	23.76	33.15
Cobertura vegetal			56% Maíz	Bosque de café	86.6% Acahual
			44% Acahual		13.4 % Bosque

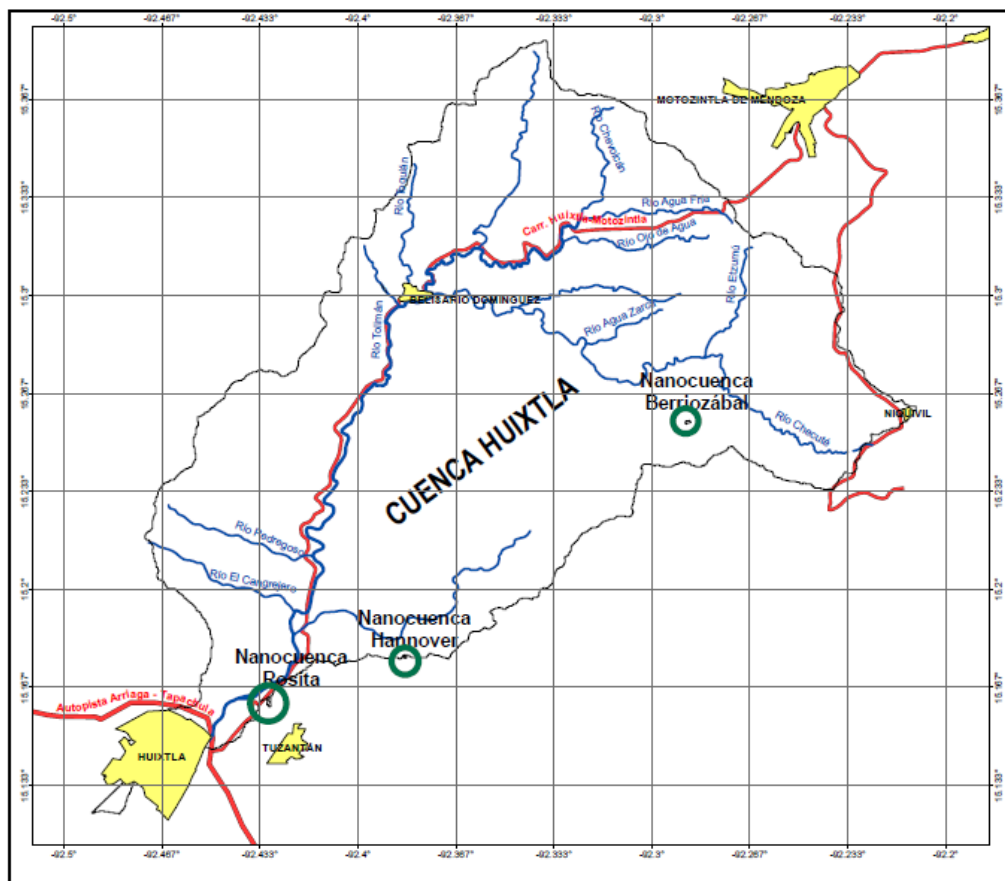


Figura 5.4. Localización de las nanocuenas en la Cuenca Huixtla en el estado mexicano de Chiapas

5. RESULTADOS. ARTÍCULOS GENERADOS

Cuadro 5.4. Valores estadísticos de S_r y N_c a partir de datos de campo de L_p y L_e para las tres nanocuenas

NANOCUENCA	NÚM. DE EVENTO	L_e	L_p	S_r	N_c
		(mm)	(mm)	(adim)	(adim)
Rosita	Máximo	30.6	59.4	141.8	93.0
	Promedio	5.1	31.2	72.6	78.8
	Mínimo	0.0	14.5	19.2	64.2
Hannover	Máximo	11.6	138.5	345.7	99.6
	Promedio	1.3	28.6	97.7	76.2
	Mínimo	0.0	0.2	1.0	42.4
Barriozábal	Máximo	7.1	49.2	152.3	98.8
	Promedio	0.9	16.4	53.2	83.6
	Mínimo	0.0	0.6	3.0	62.5

Como las pendientes de las nanocuenas, son mayores del 5 % (cuadro 5.4), los valores de N_c resultantes de hacer las correcciones por HA , se corrigieron por pendiente, aplicando a todos los casos, la expresión 5.16, en la que se sustituyó N_{c1} por N_{c3} , cuando fue el caso, considerando que por las condiciones húmedas de la región por la magnitud total anual de precipitación siempre hay condición húmeda en el suelo. Al valor resultante, denominado NC_{2S} , se aplicó en lugar de N_{c2} en las expresiones del SCS (5.10 o 5.11), las atribuidas a Chow (5.12 o 5.13) y las reportadas por Dal-Ré (5.14 u 5.15), según correspondió, para obtener los valores finales de N_c corregidos por CHA y por pendiente, mismos que se compararon con los obtenidos con los datos de campo.

Cuadro 5.5. Definición del N_{c2} a partir de sus características de las nanocuenas estudiadas

NANOCUENCA	USO DEL SUELO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	GRUPO HIDROLÓGICO	N_{c2} (Adim)
Rosita	Pastizal con bosque	Buena	Entre B y C	72
Hannover	Café en sombra	Buena	B y C	63 Arellano (2012)
Berriozábal	Achual (44.0 %)	Buena	B y C $\Rightarrow N_{c2} = 63$	71
	Maíz (56.0 %)	Buena	B $\Rightarrow N_{c2} = 78$	

5.2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 5.6, se muestran los promedios de los valores corregidos por HA para las tres nanocuenca y empleando las tres expresiones analizadas; de la comparación de los valores de Nc obtenidos, se aprecia que son completamente similares entre sí, con diferencias de entre -0.7 y 1.5 unidades, lo que muestra la validez de las tres expresiones para este cálculo; lo mismo ocurre con las correcciones por pendiente, que presentan diferencias entre -0.4 y 0.5 unidades, si bien dos valores de la Nanocuenca Berriozábal, son mucho mayores con 3.7 y 4.2 unidades.

Cuadro 5.6. Valores de Nc corregidos por HA y por pendiente para las nanocuenca y expresiones estudiadas

NANOCUENCA	VARIABLE	Nc_1 o Nc_3 (adim)			Nc_{25} (adim)		
		SCS	Chow	Dal-Ré	SCS	Chow	Dal-Ré
Rosita	Nc_3 (Máximo)	86.9	85.5	85.8	76.6	76.2	76.2
	Media	68.5	67.0	67.7	70.9	70.5	70.7
	Nc_1 (Mínimo)	53.4	51.9	53.0	66.3	65.8	66.2
Hannover	Nc_3 (Máximo)	80.8	79.7	80.0	68.5	68.1	68.2
	Media	74.1	72.8	73.2	66.4	66.0	66.2
	Nc_1 (Mínimo)	43.6	41.7	42.7	57.0	54.4	56.7
Berriozábal	Nc_3 (Máximo)	86.6	85.2	85.4	76.3	75.9	76.0
	Media	75.3	73.8	74.3	76.3	72.7	72.2
	Nc_1 (Mínimo)	52.7	51.2	52.3	65.3	64.8	65.1

Los valores de tablas corregidos por ambos conceptos y los valores reales determinados con datos de campo correspondientes, son los que se listan en el cuadro 5.7 (en el que se han ajustado los valores a enteros); se incluyen, asimismo, los valores de los errores o diferencias, entre ambos valores. Se observa, que para las tres nanocuenca y para las tres expresiones usadas para el cálculo, existe una clara tendencia para cuando se calcula el Nc_3 , de la CHA con diferencias de entre 4.3 para la Nanocuenca Berriozábal y el empleo de la fórmula de Chow, a 10.9 unidades para la Nanocuenca Rosita cuando de emplea la expresión del SCS; por el contrario, cuando se calcula Nc_1 , las diferencias son muy grandes, oscilando entre -13.0 y -40.0 unidades, lo que se debe probablemente a que a pesar de no presentarse precipitación que represente humedad en el suelo como lo considera la definición del SCS, siempre hay un valor de humedad debido, por ejemplo, al rocío que mantiene una condición húmeda permanente en la temporada de lluvia y que

implica que debe emplearse de preferencia las expresiones que calculan el Nc_3 para esta región. Lo anterior, no obstante que cuando se emplea el promedio para el caso de la Nanocuenca Hannover, se obtienen diferencias de entre 0.1 y -0.7, no se considera aplicable, toda vez que estos valores dependen del número de eventos que se analicen.

5.2.5. CONCLUSIONES

Las expresiones 5.14 y 5.15 atribuidas a Chow y citadas por Muzik (2002), y las 5.16 y 5.17, reportadas por Dal-Ré (2003), pueden emplearse para el cálculo de las correcciones por humedad antecedente Nc_1 y Nc_3 , según corresponde, obteniendo valores idénticos que los que resultan de aplicar las expresiones 5.12 y 5.13, del SCS y citadas por Neitsch, *et al.*, (2001), respectivamente.

Cuadro 5.7. Valores corregidos por HA y por Nc y las diferencias con las que deben corregirse los valores de tablas

NANOCUENCA	VARIABLE	N_{CCAMPO} (adim)	SCS		Chow		Dal-ré	
			Nc	ΔNc	Nc	ΔNc	Nc	ΔNc
			(adim)		(adim)		(adim)	
Rosita	Nc_3 (Máx.)	79	90	11	88	9	88	9
	Media		66	-13	64	-15	65	-14
	Nc_1 (Mín.)		47	-32	45	-34	46	-33
Hannover	Nc_3 (Máx.)	76	85	9	83	7	83	7
	Media		76	0	75	-2	75	-1
	Nc_1 (Mín.)		37	-39	35	-41	37	-40
Berriozábal	Nc_3 (Máx.)	84	90	6	88	4	88	5
	Media		75	-9	73	-11	74	-10
	Nc_1 (Mín.)		46	-38	44	-40	45	-39

Los valores obtenidos de tablas para las condiciones de la Costa de Chiapas como las prevalcientes en las Nanocuecas Rosita, Hannover y Berriozábal, deben corregirse por condición III de humedad antecedente y por pendiente, y adicionar al resultado obtenido 11, 9 y 9 unidades, según los cálculos se hagan con las expresiones del SCS, de Chow o la reportada por Dal-Ré para la primera; sumando 9, 7 y 7 unidades para la Nanocuenca Hannover; y adicionando 6, 4 y 5 unidades para el caso de la Nanocuenca Berriozábal, respectivamente.

5.2.6. AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional del Agua, que a través del Ing. Isidro Gaytán Arvizu de la Gerencia de Distritos de Temporal Tecnificado y del Dr. José Luis Arellano Monterrosas del Organismo de Cuenca Frontera Sur, dieron la autorización y facilidades para emplear los datos de precipitación y escurrimiento medidos en las nanocuenas estudiadas a través del Programa de Monitoreo de Procesos Hidrológicos en las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán en el estado de Chiapas.

5.2.7. LITERATURA CITADA

Aparicio Mijares F. J. 2012. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Décima reimpresión de la 1ra. edición. Ed. Limusa. México D. F.

Arellano Monterrosas, J. L. L. 2012. Vulnerabilidad y Gestión de Riesgos por Deslizamientos e inundaciones en la Cuenca Superior del Río Huehuetán, Chiapas. Tesis Doctoral. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Programa de Posgrado. Jiutepec, Morelos, México.

Ares, M.G.; M. Varni; C. Chagas; e I. Entraigas. 2012. Calibración del Número N de la Curva de Escurrimiento en una cuenca agropecuaria de 116 km² de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. 46(6): 535-541.

Campos, Aranda D. F. 2002. Contraste del procedimiento propuesto para estimar hidrogramas anuales estacionales en cuencas sin aforo. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P. México.

Campos, Aranda D. F. 2011. Estimación y aprovechamiento del escurrimiento. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P. México.

Dal-Ré Tenreiro, R. 2003. Pequeños embalses de uso agrícola. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 385 pp.

Hawkins, Richard H. 1993. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. Journal of irrigation and Drainage Engineering. Vol. 119. Núm. 2. Pp. 334-345.

McCuen Richard, H. 2005. Hydrologic Analysis and Design. Third edition. Department of Civil and Environmental Engineering University of Maryland. Ed. Pearson Prentice-Hall. Washington, D.C. USA.

5. RESULTADOS. ARTÍCULOS GENERADOS

- Mishra, S.K.; M.K. Jain; P.K. Bhunya; and V.P. Singh. 2005. Field Applicability of the SCS-CN Based Mishra-Singh General Model and its Variants. *Water Resources Management* 19: 37-62.
- Mockus, V. 1949. Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms. Exhibit A, Appendix B, Interim Survey Report, Grand (Neosho) River Watershed, US Department of Agriculture, Washington, D.C. USA.
- Muzik, I. 1993. Applicability of the modified SCS prediction method to small catchments in Thailand. In: *Hydrology of warm humid regions (Proceedings of the Yokohama Symposium)*. July 1993. IAHS. Publ. Núm. 216. Pp. 195-201.
- Natural Resources Conservation Service, 2013. National Engineering Handbook, part 630, Hydrology. U.S. Department of Agriculture. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?&cid=stelprdb1043063>. Consultado el 14 de mayo del 2013.
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R. 2001. Soil and Water Assessment Tool User's Manual; Versión 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory of Agricultural Research Service and Blackland Research Center at Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas. USA.
- Paz Pellat, F. 2009. Mitos y Falacias del Método Hidrológico del Número de Curva del SCS/NRCS. *Agrociencia*, 43(5): 521-528.
- Ponce, V. M. 1996. Notes of my conversation with Vic Mockus, en entrevista con Víctor Miguel Ponce. San Diego, California. http://hitos.sdsu.edu/mockus_conversacion.html.
- Ponce, V. M. and R.H. Hawkins. 1996. Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *J. Hydrologic Engineering* (1) 11-19. ASCE
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 Conservación de recurso agua, que establece las especificaciones y el Método para determinar la disponibilidad anual de las Aguas Nacionales. *Diario Oficial de la Federación*. México, D.F.

5.3. DETERMINACIÓN DEL ESCURRIMIENTO EN LA CUENCA HUIXTLA, CHIAPAS, POR EL MÉTODO DE NC Y USANDO SIG, TAM Y NB10

Enviado y recibido para su publicación en le Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Aquí se incluye con el formato de edición de la Tesis, pero a la revista fue entregada conforme a sus normas de edición.

5.3.1. RESUMEN

Se determinó el volumen de escurrimiento V_e para 53 Subcuencas de la Cuenca Huixtla de la Costa mexicana de Chiapas, correspondiente a la precipitación del Ciclón Tropical Stán ocurrida del 1 al 6 de octubre de 2005, utilizando los Modelos Distribuido y Agregado, empleando los conceptos de número de curva N_c y parámetro de retención S_r definidas por el Soil Conservation Service del USDA, y aplicando las técnicas de álgebra de mapas (TAM), sistemas de información geográfica (SIG) y el algoritmo de Números de Base 10 (NB_{10}) que se propone para asociar las características de las que depende el N_c ; para ello se generó una tabla con los Usos del Suelo presentes en la cuenca definiéndoles los NB_{10} de 1000 a 12000, otra para los tipos de Condición Hidrológica a los que se les asoció los NB_{10} múltiplos de 100 (100 para buena, 200 para regular y 300 para pobre) y, una tercera para los Grupos Hidrológicos a los que se les asignó el NB_{10} múltiplos de 10 (10 para el Grupo A, 20 para B, 30 para C y 40 para D). De los resultados del volumen de escurrimiento para las subcuencas (V_{ec}), por el Modelo Distribuido y el Modelo Agregado, se observa que las diferencias entre ambos métodos son mínimas, del orden 1.07 % del promedio; el volumen de escurrimiento (V_e) para la Cuenca Huixtla, calculado por el Modelo Distribuido, fue de 301,229,025 m³ y por el Modelo Agregado de 304,115,519 m³, lo que implica una diferencia de 0.97 % y significa que ambos modelos, empleados con las técnicas de SIG, TAM y NB10 proporcionan prácticamente los mismos resultados, por lo que se puede emplear uno u otro indistintamente.

Palabras clave: Ecurrimiento, número de curva, cuencas costeras, números de base 10.

5.3.2. SUMMARY

WATERSHED RUNOFF ESTIMATION WITH THE NC METHOD USING SIG, TAM AND NB10

Runoff volume V_e was determined for 53 sub-basins of the Huixtla watershed located on the Mexican coast of Chiapas, where the tropical storm Stan occurred October 1 to 6, 2005. This was done using the Distributed and Aggregate Models integrating the concepts

number curve Nc and retention parameter Sr defined by the Soil Conservation Service of the USDA. Moreover, we applied the techniques of map algebra (TMA), geographic information systems (GIS) and the algorithm Base 10 numbers (NB_{10}), which is proposed for associating the characteristics on which Nc depends. To this end, a table was generated with land uses present in the watershed, defining the NB_{10} multiples of 100 to 12000. Another table was constructed for types of hydrological conditions to which the 100s were associated (100 for good, 200 for satisfactory and 300 for poor). A third table was constructed for hydrological groups to which NB_{10} multiples of 10 were assigned (10 for group A, 20 for group B, 30 for group C and 40 for group D). From the results of runoff volume for the sub-basins (Vec), with the Distributed Model and the Aggregate Model, it is observed that the differences between the two methods are minimal, in the order of 1.07% on average. The runoff volume (Ve) for the Huixtla watershed calculated by the Distributed Model was 301,229,025.17 m³ and that calculated by the Aggregate Model was 304,115,519.13, a difference of 0.97%. This suggests that both models, employed with the SIG, TAM and NB_{10} techniques, yield practically the same results; thus one or the other can be used indistinctly.

Key words: Runoff, curve number, coastal basins, base 10 numbers.

5.3.3. INTRODUCCIÓN

El volumen de escurrimiento (Ve , en m³) de una cuenca, está dado por el producto de la lámina de escurrimiento (Le , en m) y el área de la cuenca (Ac , en m²), de acuerdo con la expresión 5.19 (Pérez, 2013).

$$Ve = Le \times Ac \quad (5.19)$$

Uno de los métodos cada vez más aceptado y utilizado en Ingeniería Hidrológica para la determinación de la Le , y para evaluar el efecto del uso de suelo sobre el escurrimiento en una cuenca es el basado en el concepto de número de curva de escurrimiento (Nc), definido por el Soil Conservation Service (SCS) del United States Department of Agriculture (USDA) (Juárez, *et al.*, 2010; Miranda, *et al.*, 2009), y se calcula con la expresión 5.20 (Mockus, 1949; Ponce and Hawkins, 1996; NRCS, 2013). Mockus (1949) uno de los principales autores del Método dice que éste fue desarrollado en base a datos de lluvia en 24 horas; sin embargo, originalmente fue propuesto para cuantificar el antes y después de un evento de lluvia. Por los conceptos base que sustentan la ecuación fundamental del Método (5.21) y por la información dada por Mockus (*Op. cit.*), se concluye que es aplicable para escalas de tiempo de una tormenta de 24 horas y de incrementos de tiempo que son un subconjunto del tiempo total que duró el evento (Bedient *et al.*, 2012; McCuen, 2005; Campos, 2011a). En la expresión 5.20, Le resulta en m si la precipitación del evento Pr , se introduce en esta misma unidad.

$$Le = \frac{(Pr - 0.2Sr)^2}{Pr + 0.8Sr} \quad (5.20)$$

$$Nc = \frac{25400}{Sr + 254} \quad (5.21)$$

La aceptación del Método se debe a su simplicidad ya que se basa en un único parámetro, que es el denominado parámetro de retención Sr , dado por la expresión 5.22 que varía espacialmente debido a los cambios en el suelo, el uso y el manejo del suelo y la pendiente del terreno, y temporalmente como resultado de los cambios en el contenido de humedad del suelo, (Neitsch, *et al.*, 2001).

$$Sr = \frac{25400}{Nc} - 254 \quad (5.22)$$

Como parte de la definición inicial del concepto y del Método, el SCS generó varias tablas como la que se expone en el cuadro 5.8, para determinar el Nc para uso forestal del suelo (McCuen, 2005), en la que cada Nc , describe numéricamente una combinación específica de suelo, uso del suelo y su tratamiento (Terzoudi, *et al.*, 2007 y Campos, 2011b), el cual denominaron complejo hidrológico suelo-cobertura. Campos (2011b), indica que el Uso del Suelo, se refiere a la cubierta del terreno o cuenca, incluyendo la vegetación, el revestimiento en suelos urbanos o destinados a caminos y la condición de barbecho, para suelos de uso agrícola, por ejemplo; y para este último caso, incluye las prácticas mecánicas como el terraceo y el contorno, y las prácticas de manejo como el pastoreo y su control o la rotación de cultivos.

La Condición Hidrológica se refiere a la situación que la cubierta vegetal o uso del suelo tiene para generar escurrimiento (independientemente del tipo de cobertura) y McCuen (2005), la expresa como **pobre**, cuando la cubierta es escasa e implica máximo escurrimiento, como **regular** cuando la condición de cobertura es media y significa una condición también intermedia de escurrimiento y **buena** cuando se relaciona con una cobertura vegetal completa y, por tanto, genera un mínimo escurrimiento.

El Grupo Hidrológico, clasifica cuatro grupos del suelo, definidos a partir de su potencial para producir escurrimiento con base en su velocidad de Infiltración I y su velocidad de transmisión (flujo horizontal, T) cuando están mojados (Campos, 2011b), como sigue: **A.-** Bajo potencial de escurrimiento, debido a su alta I , que consisten principalmente de arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo y altas T , con valores mayores de 7.6 mm/h; **B.-** Suelos con moderada I , con cantidades moderadas de texturas finas a gruesas, drenaje medio y algo profundos, son básicamente arenosos y que tienen moderadas T (de 3.8 a 7.6 mm/h); **C.-** Suelos que tienen baja I , consisten básicamente

de arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo y bajas *T* (de 1.3 a 3.8 mm/h); y **D**.- Alto potencial de escurrimiento, originado por su baja *I*, ya que consisten principalmente de suelos arcillosos con alto poder de hinchamiento, con nivel freático alto y permanente, con estratos arcillosos cerca de la superficie, o bien, suelos someros sobre horizontes impermeables y que tienen muy bajas *T* (de 0.0 a 1.3 mm/h).

Cuadro 5.8. Valores del número de curva (*Nc*) para uso forestal del suelo (McCuen, 2005)

DESCRIPCIÓN DEL USO DEL SUELO	CONDICIÓN HIDROLÓGICA	<i>Nc</i> PARA LOS GRUPOS DE SUELO HIDROLÓGICO			
		A	B	C	D
Tierras forestales, césped o huertos siempre verdes o deciduos.	Pobre	55	73	82	86
	Media	44	65	76	82
	Buena	32	58	72	79
Matorral	Pobre	48	67	77	83
	Media	35	56	70	77
	Buena	30	48	65	73
Bosque o selva	Pobre	45	66	77	83
	Media	36	60	73	79
	Buena	25	55	70	77
Zonas agrícolas	–	59	74	82	86
Áreas de bosques herbáceos	Pobre		80	87	93
	Media		71	81	89
	Buena		62	74	85
Bosques de <i>Quercus</i> -álamos	Pobre		66	74	79
	Media		48	57	63
	Buena		30	41	48
Bosques de <i>Juniperus</i>	Pobre		75	85	89
	Media		58	73	80
	Buena		41	61	71
Selva-pastos	Pobre		67	80	85
	Media		51	63	70
	Buena		35	47	55

En los últimos años se han vuelto muy popular que modelos como el HEC-HMS y el SWAT (USACE, 2000; Neitsch *et al.*, 2001) que incluyen como una alternativa el método del *Nc* para calcular los escurrimientos directos. En el HEC-HMS es muy común usar el

Método en una cuenca para incremento de tiempo tan pequeños (del orden de minutos) y sus respectivos parámetros hidrológicos, como el N_c , se pueden analizar como un modelo distribuido o como un Modelo Agregado (Todini, 1988; Bedient *et al.*, 2012); en tanto que en el SWAT, el Método se usa para calcular láminas escurridas en 24 horas y la cuenca se considera como un Modelo Distribuido. Para su aplicación en el cálculo, Dal-Ré (2003) refiere que el Método Agregado se caracteriza por considerar las variables y los parámetros implicados uniformemente distribuidos sobre la cuenca, obteniendo su magnitud mediante procedimientos de interpolación basados en principios geométricos; en tanto que el Modelo Distribuido, considera la variabilidad espacial tanto de las variables como de los parámetros implicados.

De otra parte, por las características de los sistemas de información geográfica (SIG), éstos constituyen una magnífica herramienta para la aplicación distribuida de los modelos hidrológicos a partir de información digital y los sensores remotos el complemento ideal para proporcionarla; además, los SIG, permiten considerar la variación espacial de la precipitación, haciendo posible la generación de una capa con los valores específicos para cada sitio de la celda o píxel de la cuenca. En esta perspectiva, Rivera *et al.*, (2012) en lugar de usar el SWAT para calcular los sedimentos con la ecuación modificada de pérdida del suelo (EUPSM), aplicaron la técnica de álgebra de mapas (TAM) ya que eso facilitó ampliamente alimentar el modelo tan complejo.

De manera similar que en el modelo agregado en el HEC-HMS (USACE, 2000 y USACE, 2010) y la TAM para la EUPSM, es posible aplicarla en ArcGIS para obtener los N_c en una cuenca, lo cual fue confirmado por Dal-Ré (2003), quien determinó la lámina escurrida en una cuenca de España empleando los Modelos Agregado y Distribuido y usando SIG y la singularidad de los números primos, asignando un valor diferente a cada condición de pendiente, precipitación y uso del suelo y a su producto (que resulta ser necesariamente un número primo también) y le asoció el N_c , que resulta de cada combinación biunívoca. Por otra parte, para aplicar el Método Agregado de cálculo del escurrimiento, obtuvo el promedio de N_c de todas las celdas y calculó un valor de S_r con la expresión 5.20 y un valor promedio de L_e con la 5.20; en tanto que para aplicar el Método Distribuido, aplicó las mismas expresiones a cada celda primeramente y obtuvo el valor de L_e para la cuenca, con la suma de los valores de cada celda; los resultados arrojaron un valor mayor en más del doble cuando se aplicó el Método Distribuido, lo cual -concluyó- no es habitual, y se lo atribuyó a la gran heterogeneidad de la cuenca y de trabajar con rangos de precipitación que apenas producen escurrimiento en la cuenca.

Pérez (2013), refiere que la TAM incluye un amplio conjunto de operadores que se ejecutan sobre una o varias capas ráster de entrada para producir una o varias capas de salida del mismo tipo, entendiendo por operador un algoritmo definido mediante ecuaciones, que realiza una misma operación en todas las celdas de una capa; cada

capa ráster es una matriz de números y la operación se realiza para todos los números de la matriz, y por tanto, para todas las celdas de la capa. Con estos principios, Pérez, *et al.*, (2007) y Pérez, *et al.*, (2012) estimaron la Tasa de Erosión para tres cuencas de la Costa de Chiapas, México, resolviendo la EUPSM, mediante la aplicación de la TAM, generando un mapa o capa de tipo ráster para cada componente de la ecuación, con igual resolución espacial, y multiplicando los valores de las celdas correspondientes; concluyeron que la TAM, resultó una herramienta adecuada para la aplicación de la EUPSM, en la estimación de la erosión hídrica al operar un mapa por cada factor de la ecuación.

La finalidad de este análisis es el de precisar una metodología que haga posible, sencillo y aplicable a la determinación del Volumen de Escurrimiento V_e en una cuenca, a partir de su validación mediante su aplicación a 53 subcuencas en que se dividió la Cuenca Huixtla de la Costa del estado mexicano de Chiapas, utilizando los Métodos de cálculo Distribuido y Agregado, descritos por Dal-Ré (2003), empleando la expresiones definidas por el Soil Conservation Service (5.20 y 5.22) que involucran los conceptos de número de curva N_c , y el parámetro de retención S_r , y las técnicas de álgebra de mapas, de sistemas de información geográfica y el algoritmo de Números de Base 10 (NB_{10}) que se propone para asociar las características de las que depende el N_c .

5.3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

Se planteó definir el valor del Escurrimiento dado como lámina L_e en la expresión 5.20 y como volumen (V_e) a partir de la expresión 5.19, haciendo los cálculos a nivel de una celda en un mapa de formato ráster, generando para ello un mapa para cada uno de los componentes del S_r y N_c ; para el efecto, se genera un sistema de información geográfica, se usa la técnica de álgebra de mapas y se aplica un algoritmo matemático propuesto denominado **números de base 10**. Para el cálculo final del N_c , del L_e y del V_e , se emplean los Modelos Distribuido y Agregado, descritos por Todini, (1988), Bedient *et al.*, (2012) y Dal-Ré (2003); el software fundamental para la manipulación de la información, su operativización y la generación de los resultados fue el Arc MAP 10.0 de ESRI.

El estudio se realizó para la Cuenca Alta y Media del Río Huixtla, localizada en la región del Soconusco del estado mexicano de Chiapas, y para los datos de precipitación del ciclón tropical Stán ocurrido en la primera semana de octubre de 2005; limita al norte con la Sierra Madre de Chiapas y prácticamente en la frontera con la República de Guatemala, al oriente con la cuenca del Río Huehuetán, al sur con el Océano Pacífico, y al poniente, con la cuenca del Río Despoblado; territorial y políticamente la cuenca Huixtla se ubica en los municipios de Huixtla, Tuzantán y Motozintla; y su definición en la parte baja se hizo en el punto de cruce del Río Huixtla con la Carretera Costera,

inmediatamente aguas arriba de la Ciudad de Huixtla, como se muestra en la figura 5.5; la superficie de la cuenca A_c es de 35,527.40 ha, la longitud L_{cp} y la pendiente S_{cp} de su cauce principal son 3,910.9 m y 40.7 %, respectivamente; en tanto que la elevación media de la cuenca $Elev_m$ es de 1,100 msnm y su pendiente media S_c de 41.0 %, (CONAGUA/UACH, 2006). El análisis se hace para cada una de las 53 subcuencas definidas por CONAGUA/UACH (2006) y sus valores se integran para calcular los correspondientes de L_e y V_e para toda la cuenca.

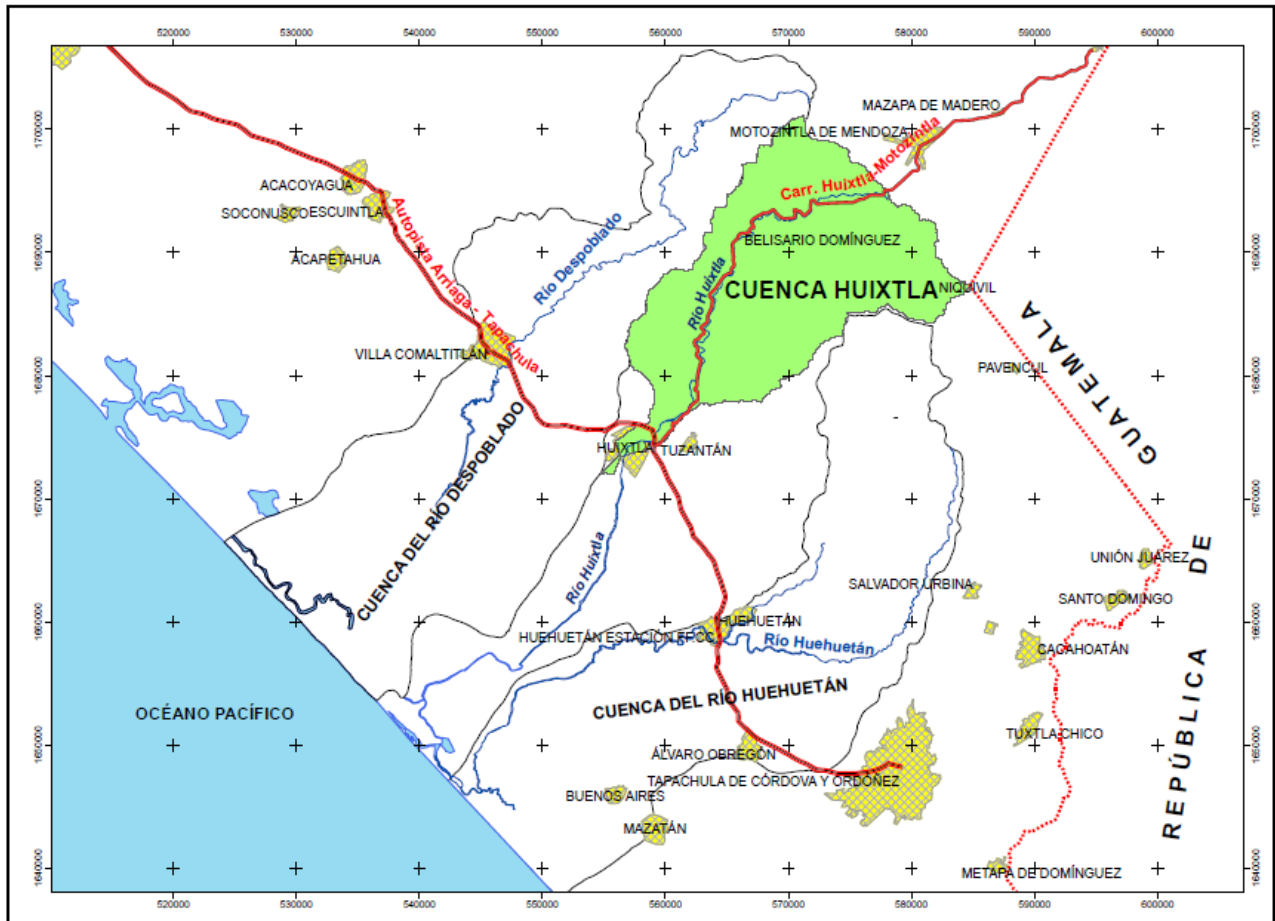


Figura 5.5. Localización de la Cuenca del Río Huixtla en el estado mexicano de Chiapas

Se desarrolla y propone el algoritmo de números de base 10 (denotado como variable por NB_{10}), para la denominación y valoración cuantitativa de los diversos componentes o parámetros hidrológicos para su cálculo. Se trata de emplear la condición decimal o de base 10 utilizada en la numeración arábica, designando los números de un solo dígito (del 1 al 9) para una característica que no sea superior a 9; la de los múltiplos de 10 (10, 20, ..., 90) para otra característica cuyos componentes tampoco sea mayor de 9; los múltiplos de 100 (100, 200, ..., 900) para la siguiente característica con la misma condición; y para la característica con mayores componentes (hasta 99), se emplean los

5. RESULTADOS. ARTÍCULOS GENERADOS

múltiplos de 1,000, (1000, 2000, 3000, ... , 99000). Definido cada valor de base 10 asignado a cada componente de los elementos o características consideradas en el análisis, se suman en la línea deseada para obtener un solo número para cada combinación de ellos, asociando el resultado a la característica resultante que le corresponde según se define previamente.

A partir del análisis supervisado de Imágenes del Satélite SPOT para noviembre de 2005, se determinaron las clases de Uso del Suelo relacionadas en el cuadro 5.9 y se elaboró un plano con ellas para la Cuenca Huixtla; dado que este elemento del N_c , no sólo es el principal, sino que es el que mayores componentes tiene (13), se les asignó los números múltiplos de 1000, tal como se presenta en dicho cuadro. Con esta codificación, partiendo del plano referido, y empleando el comando RECLASSIFY del software Arc MAP, se elaboró la capa USO SUELO y el PLANO CODIFICADO DE USO DEL SUELO DE LA CUENCA HUIXTLA.

Se complementó la definición y descripción de los componentes del elemento de condición hidrológica del suelo para pradera y bosques, que en general es **buena**, **regular** y **pobre**, para todas y cada uno de los Usos del Suelo, definidos en el cuadro 5.8, siguiendo el mismo criterio empleado por McCuen (2005), Campos (2011b), Rivera *et al.* (2012) y Arellano (2012) y se les asignaron los números de base 10, múltiplos de 100 y con esta codificación se elaboró el PLANO CODIFICADO DE CONDICIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA HUIXTLA. Asimismo, se conformó la capa de GRUPO HIDROLÓGICO al considerar la definición al respecto de Campos (2011b), asignándole los NB_{10} múltiplos de 10 y con la codificación así definida se generó el PLANO CODIFICADO PARA EL GRUPO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA HUIXTLA. En la figura 3, se muestran los tres planos codificados referidos.

Integrando los números de base 10 generados para los tres elementos descritos con los valores de N_c , se generó el cuadro 5.9, en el que se presenta la asociación de los NB_{10} y los N_c . Dicha asociación queda definida completamente con los NB_{10} , listados en las columnas encabezadas por el GRUPO HIDROLÓGICO de la columna 4, como sigue: el primer dígito (o dos para aquellos valores mayores de 9000), agregándole 3 ceros, indica el Uso del Suelo listadas en la columna USO DEL SUELO; el segundo dígito (adicionándoles dos ceros), refiere la Condición Hidrológica incluida en la columna CONDICIÓN HIDROLÓGICA; y los dos últimos dígitos representan el grupo hidrológico que se listan en las columnas denominadas GRUPO HIDROLÓGICO. Así, por ejemplo, el $NB_{10} = 4230$ (remarcado en el cuadro 3), corresponde con Uso del Suelo de Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria (SMSC/VS) con un NB_{10} es 4000, a una Condición Hidrológica regular con NB_{10} de 200, y al Grupo Hidrológico C, con NB_{10} de 30, que integrado corresponde a $N_c = 76$, remarcado en color verde en el cuadro. En la figura 5.7 se esquematiza la operativización de la técnica del álgebra de mapas,

Empleando la TAM se aplicó la expresión 5.22 entre los píxeles correspondientes de las capas USO DEL SUELO, CONDICIÓN HIDROLÓGICA y GRUPO HIDROLÓGICO obteniendo el S_r para cada uno y generando la capa denominada PARÁMETRO DE RETENCIÓN; aplicando análogamente la expresión 5.21, se obtuvo la capa denominada NÚMERO DE CURVA que contiene los N_{c_2} obtenidos del cuadro 5.11.

Cuadro 5.9. Definición del NB10, al elemento de Uso de Suelo para la determinación del N_c

ID	CLAVE	DESCRIPCIÓN	NB_{10}
1	BP	Bosque de pino	1000
2	BPQ	Bosque de pino-encino	2000
3	BQP	Bosque de encino-pino	3000
4	SMSC/VS	Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria	4000
5	SMSC/CP	Selva mediana subcaducifolia con cultivos permanentes	5000
5	SBC/VS	Selva baja caducifolia con vegetación secundaria	5000
6	PAST-RAS	Pastizal rasante	6000
7	S-DESN	Suelos desnudos	7000
8	UA-SDESC	Suelos en descanso con alguna cobertura	8000
9	UA-CP	Uso agrícola- cultivos permanentes (mango, caña café)	9000
10	AUyPOB	Áreas urbanas y pobladas	10000
11	VC	Vías de comunicación	11000
12	C_AGUA	Corrientes y cuerpos de agua	12000

Con los datos de precipitación del ciclón Tropical Stán (Pr) ocurrida los días 1 al 6 de octubre de 2005 obtenida de las estaciones meteorológicas Buenos aires, Motozintla, Finca Germania, Finca San Cristóbal, Finca La Victoria, Finca Argovia, Finca Chicharras, Villa Comaltitlán, Unión Juárez, Huehuetán y El Porvenir, ubicadas al interior o en las cercanías de la Cuenca Huixtla, que se exponen en el cuadro 5.11, se elaboró un plano de isoyetas, y, en el SIG, una capa denominada PRECIPITACIÓN CODIFICADA para aplicarse a cada píxel de los planos de la cuenca y a cada subcuenca. En este cuadro, también se anota la magnitud de la precipitación considerada como humedad antecedente (HA), ocurrida en los cinco días previos al Stán (del 26 al 30 de septiembre del 2005), y que se consideró para corregir el N_{c_2} y obtener la N_{c_3} aplicando la expresión 5.23, según Neitsch, *et al.*, (2001).

$$N_{c_3} = N_{c_2} \times e^{0.00673(100 - N_{c_2})} \quad (5.23)$$

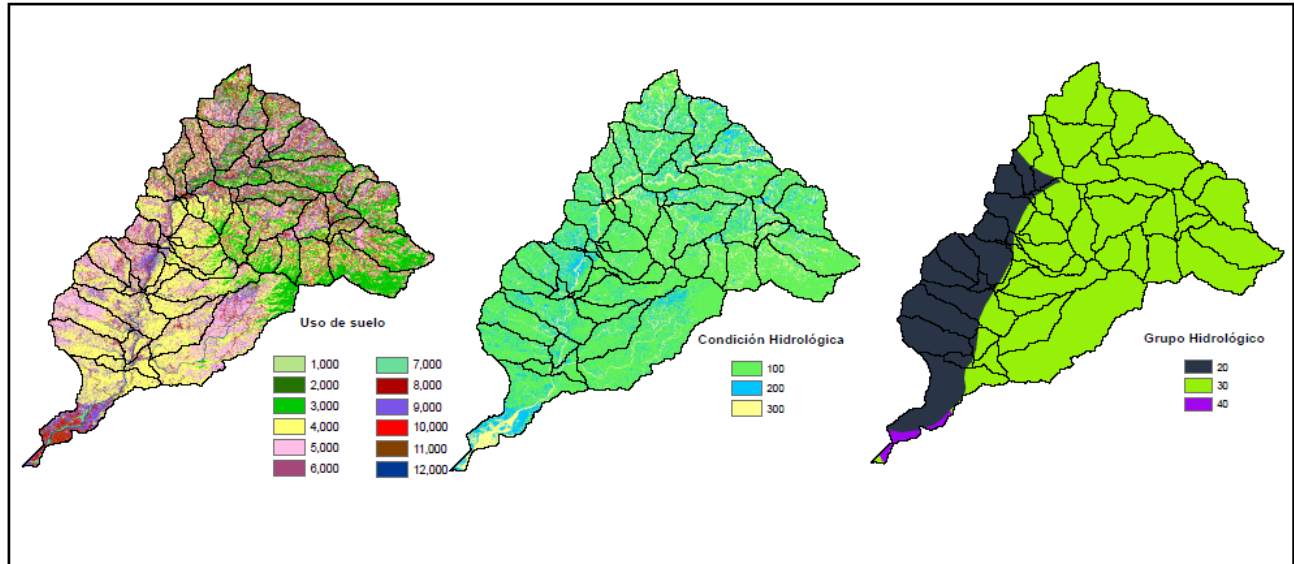


Figura 5.6. Mapas codificados para Uso del Suelo, Condición Hidrológica y Grupo Hidrológico

Cuadro 5.10. Definición de los NB10 y sus correspondientes Nc considerando Uso del Suelo, la Condición Hidrológica y el Grupo Hidrológico

USO DEL SUELO		CONDICIÓN HIDROLÓGICA		GRUPO HIDROLÓGICO							
				A: NB ₁₀ =10		B: NB ₁₀ =20		C: NB ₁₀ =30		D: NB ₁₀ =40	
CLAVE	NB ₁₀	DENOMINACIÓN	NB ₁₀	NB _{10F}	Nc	NB _{10F}	Nc	NB _{10F}	Nc	NB _{10F}	Nc
BP	1000	Bueno	100	1110	30	1120	41	1130	61	1140	71
		Regular	200	1210	36	1220	58	1230	73	1240	80
		Pobre	300	1310	56	1320	75	1330	85	1340	89
BPQ	2000	Bueno	100	2110	30	2120	41	2130	61	2140	71
		Regular	200	2210	36	2220	58	2230	73	2240	80
		Pobre	300	2310	45	2320	75	2330	85	2340	89
BQP	3000	Bueno	100	3110	25	3120	30	3130	41	3140	48
		Regular	200	3210	36	3220	48	3230	57	3240	63
		Pobre	300	3310	45	3320	66	3330	74	3340	79
SMSC/VS	4000	Bueno	100	4110	32	4120	58	4130	72	4140	79
		Regular	200	4210	43	4220	65	4230	76	4240	82
		Pobre	300	4310	57	4320	73	4330	82	4340	86
SMSC/CP	5000	Bueno	100	5110	32	5120	58	5130	72	5140	79
		Regular	200	5210	43	5220	65	5230	76	5240	82
		Pobre	300	5310	57	5320	73	5330	82	5340	86

SBC/VS	6000	Bueno	100	6110	30	6120	48	6130	65	6140	73
		Regular	200	6210	36	6220	60	6230	73	6240	79
		Pobre	300	6310	45	6320	66	6330	77	6340	83
PAST-RAS	7000	Buenos	100	7110	39	7120	61	7130	74	7140	80
		Regulares	200	7210	49	7220	69	7230	79	7240	84
		Pobres	300	7310	68	7320	79	7330	86	7340	89
S-DESN	8000	Pobre	300	8310	77	8320	86	8330	91	8340	94
UA-SDESC	9000	Buenos	100	9110	39	9120	61	9130	74	9140	80
		Regulares	200	9210	49	9220	69	9230	79	9240	84
		Pobres	300	9310	68	9320	79	9330	86	9340	89
UA-CP	10000	Buenos	100	10110	32	10120	58	10130	72	10140	79
		Regulares	200	10210	43	10220	65	10230	76	10240	82
		Pobres	300	10310	57	10320	73	10330	82	10340	86
AUyPOB	11000	Bueno	100	11110	39	11120	61	11130	74	11140	80
		Regular	200	11210	49	11220	69	11230	79	11240	84
		Pobre	300	11310	68	11320	79	11330	86	11340	89
VC	12000	Terracería	200	12210	72	12220	82	12230	87	12240	89
		Pavimento	300	12310	83	12320	89	12330	92	12340	93
C_AGUA	13000	Buena	100	13110	92	13120	92	13130	92	13140	92

5.3.5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la figura 5.8, se muestra el mapa de la magnitud de la lámina escurrida Le calculada con la expresión 5.20 para cada píxel del SIG por el Modelo Distribuido y en el cuadro 5.12 se muestran los valores de área de las subcuencas (A_{sc}), y los de los número de base 10, con los que se determinaron los números de curva a partir del cuadro 5.9 (N_{c2}) y su corrección por humedad antecedente (N_{c3}), así como los resultados de volumen escurrido para las subcuencas (Vec) de la cuenca del Río Huitxla, tanto por el Modelo Distribuido como por el Modelo Agregado. Se observa que las diferencias de los volúmenes escurridos calculados por ambos métodos son mínimas, siendo en promedio de 1.07 %.

Obtenido como la suma de los resultados de las subcuencas para ambos modelos, se obtuvo que el volumen de escurrimiento (Ve) en la Cuenca Huixtla, correspondiente a la precipitación del ciclón tropical Stán ocurrido del 1 al 6 de octubre de 2005, calculado por el Modelo Distribuido, es de 301,229,025.17 m³ (que equivale a una Le de 0.847 m) y por el Método Agregado de 304,115,519.13 m³ (correspondiente a 0.856 m), lo que implica

una diferencia de 0.965 % y significa que ambos modelos proporcionan prácticamente los mismos resultados, pudiendo emplearse uno u otro indistintamente.

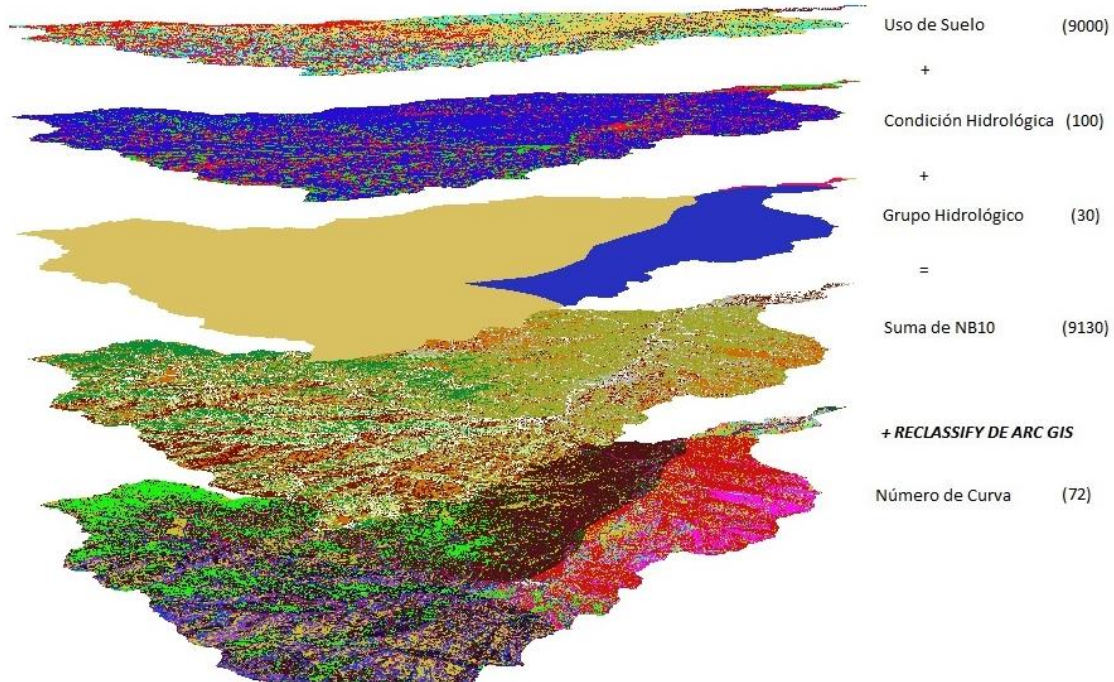


Figura 5.7. Esquematización de la aplicación de la TAM para generar la capa NÚMERO DE CURVA

Cuadro 5.11. Humedad antecedente (HA) y magnitud de la precipitación del ciclón tropical Stán (Pr)

ESTACIÓN	HA (mm). Sept. de 2005						Pr (mm). Oct. de 2005						
	26	27	28	29	30	SUMA	01	02	03	04	05	06	SUMA
Buenos aires	3	3	9	0	18	33	0	0	95	181	160	105	541
Motuzintla	3	2	2	11	9	27	0	0	100	43	320	55	518
Finca Germania	14	28	26	40	10	118	2	3	116	320	434	161	1,037
Finca San Cristóbal	74	48	87	34	11	254	24	21	148	470	447	182	1,292
Finca La Victoria	0	0	21	32	2	55	0	9	146	409	340	150	1,054
Finca Argovia	32	18	35	22	15	122	84	21	74	373	320	109	981
Finca Chicharras	0	11	25	42	16	93	43	0	143	242	145	145	717
Villa Comaltitlán	1	74	62	61	29	226	28	3	101	273	212	172	789
Unión Juárez	3	23	18	16	2	62	8	32	142	350	330	118	980
Huehuetán	0	42	22	65	18	147	121	1	311	158	114	155	859
El Porvenir	0	10	20	14	15	59	28	30	375	348	165	124	1,070
PROMEDIO	12	23	30	31	13	109	31	11	159	288	271	134	894

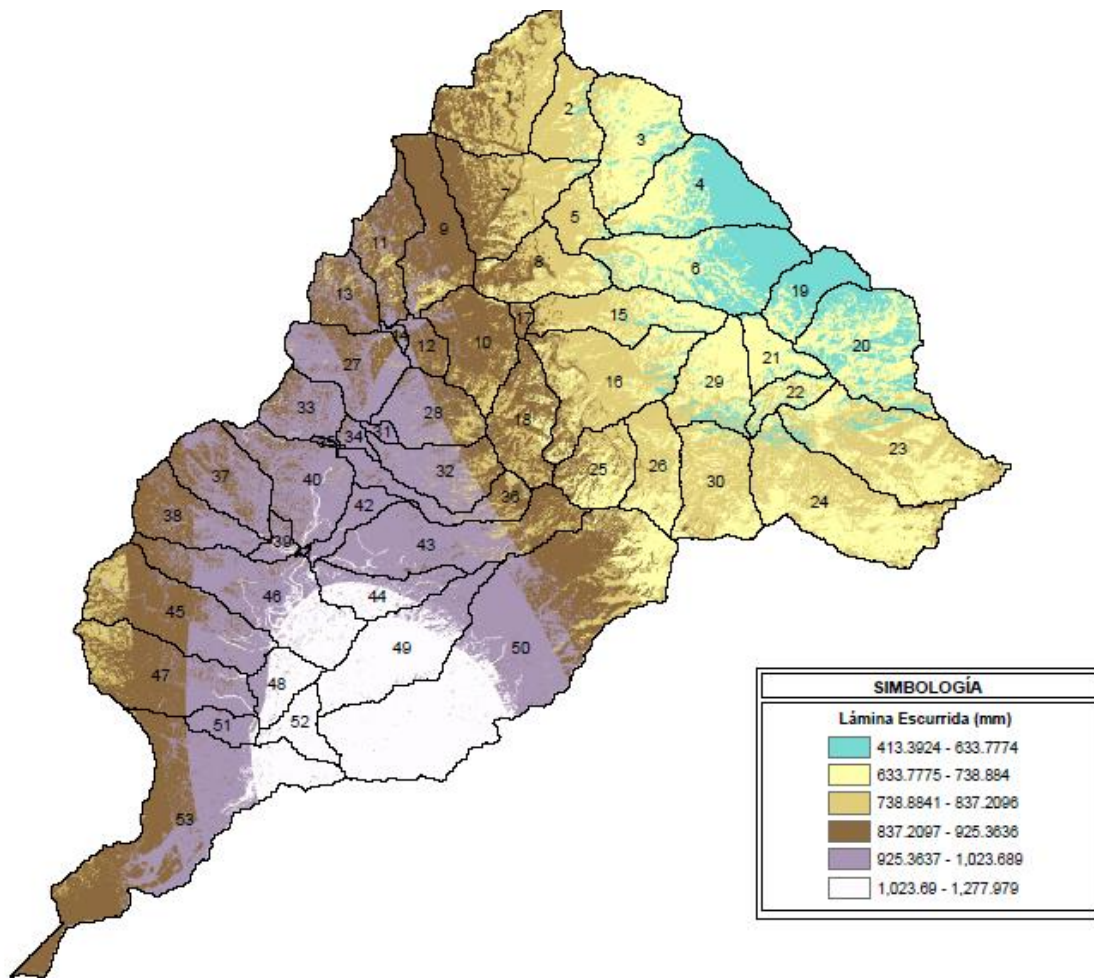


Figura 5.8. Plano de Le calculado por el Modelo Distribuido para las Subcuencas de la Cuenca Huixtla

Cuadro 5.12. Números de base 10 (NB10), y volúmenes de escurrimiento (Vec), para las subcuencas de la Cuenca Huixtla, calculados por los Modelos Distribuido y Agregado

DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA		PROM. PARA LAS SUBCUENCAS				MOD. DISTRIBUIDO			MOD. AGREGADO			Δvec
		Asc	NB _{10US}	NB _{10CH}	NB _{10GH}	NC ₂	NC ₃	Vec	NC ₂	NC ₃	Vec	
NÚM.	NOMBRE	(ha)	(adim)			(adim)		(mil m ³)	(adim)		(mil m ³)	(%)
1	El Retiro	1,047.08	5,000	200	30	72	86	8,511.61	73	88	8,659.32	-1.74
2	Loma Bonita	470.78	5,000	200	30	72	86	3,541.77	73	88	3,621.61	-2.25
3	Chevolcán	845.96	5,000	200	30	72	86	5,810.89	73	88	5,941.05	-2.24
4	Río Agua Fría	946.03	6,000	200	30	73	87	5,794.06	79	91	5,993.19	-3.44
5	Tolimán Uno	263.94	6,000	200	30	73	87	1,982.16	79	91	2,054.55	-3.65
6	Río Ojo de Agua	1,192.90	5,000	100	30	65	80	7,389.55	65	82	7,529.02	-1.89
7	Concep. Villaflores	930.48	5,000	200	30	70	85	7,603.74	73	88	7,749.02	-1.91

5. RESULTADOS. ARTÍCULOS GENERADOS

8	Ampl. Villahermosa	596.23	5,000	200	30	68	83	4,649.31	73	88	4,885.26	-5.07
9	El Pozolero	760.09	6,000	200	30	70	85	6,645.92	79	91	6,877.42	-3.48
10	Doce de Diciembre	665.20	5,000	100	30	70	84	5,762.99	65	82	5,741.76	0.37
11	Río Toquián	548.07	6,000	200	20	67	82	4,891.00	69	85	4,975.65	-1.73
12	Cueva Faldeada	184.33	5,000	100	30	72	87	1,670.09	65	82	1,654.79	0.92
13	Arroyo la Juchita	406.36	5,000	100	20	60	78	3,653.08	48	68	3,503.21	4.10
14	Blanema	33.68	6,000	200	20	70	85	312.05	69	85	311.30	0.24
15	Nueva Reforma	652.87	5,000	200	30	70	85	4,817.47	73	88	4,928.94	-2.31
16	Río Agua Zarca	1,139.65	5,000	200	30	70	84	8,805.33	73	88	9,042.32	-2.69
17	Villa Hermosa	55.84	6,000	200	30	75	89	472.01	79	91	478.08	-1.29
18	Nva. Independencia	608.82	5,000	100	30	63	79	5,017.84	65	82	5,171.55	-3.06
19	Río Ecumú	440.13	5,000	200	30	69	84	2,585.49	73	88	2,684.87	-3.84
20	Justo Sierra	1,043.24	5,000	100	30	64	80	6,642.35	65	82	6,840.38	-2.98
21	Santa Clara	305.66	6,000	200	30	72	86	2,076.76	79	91	2,144.19	-3.25
22	La Libertad	221.41	6,000	200	30	71	84	1,550.61	79	91	1,625.68	-4.84
23	San Lucas	1,310.12	5,000	100	30	61	77	9,499.27	65	82	9,915.87	-4.39
24	Río Checulé	1,337.11	5,000	100	30	58	75	9,733.30	65	82	10,287.94	-5.70
25	Libertad Calera	476.32	4,000	100	30	61	77	3,705.04	72	87	3,972.18	-7.21
26	Llano Grande	496.96	5,000	100	30	62	78	3,750.84	65	82	3,868.14	-3.13
27	El Consuelo	676.91	5,000	100	20	63	78	6,311.86	48	68	5,936.75	5.94
28	Peña Flor	541.99	5,000	100	30	69	84	4,959.54	65	82	4,936.51	0.46
29	Santa Lucia Etzumú	615.79	6,000	200	30	71	85	4,377.74	79	91	4,539.28	-3.69
30	Lindavista	751.78	5,000	100	30	64	79	5,576.98	65	82	5,740.21	-2.93
31	La Antigua	45.39	5,000	100	30	73	87	440.58	65	82	428.23	2.80
32	Bélgica	563.35	5,000	100	30	68	84	5,185.11	65	82	5,195.26	-0.20
33	Nueva Victoria	405.29	6,000	200	20	61	78	3,834.39	69	85	3,982.50	-3.86
34	El Paraiso	77.73	6,000	200	20	68	83	750.63	69	85	752.71	-0.28
35	Solo Dios	15.64	7,000	300	20	66	82	154.80	86	95	158.74	-2.55
36	La Florida	419.94	5,000	100	30	66	82	3,834.48	65	82	3,890.35	-1.46
37	España	630.54	6,000	100	20	58	76	5,877.05	61	79	5,981.43	-1.78
38	Santa Tera de Jesús	550.48	5,000	100	20	58	74	5,030.50	48	68	4,820.35	4.18
39	Nuevo Paraiso	119.64	6,000	100	20	62	79	1,164.77	61	79	1,157.94	0.59
40	El Vergel	750.17	6,000	200	20	63	80	7,190.77	69	85	7,404.64	-2.97
41	El Parral	8.40	7,000	300	20	68	83	83.84	86	95	87.07	-3.86
42	La Verbena	210.68	5,000	100	30	72	87	2,099.40	65	82	2,053.46	2.19
43	Santa Elena	1,086.93	5,000	100	30	69	84	10,264.90	65	82	10,216.46	0.47
44	San Lucas Manacal	442.19	5,000	100	30	72	87	4,504.32	65	82	4,427.84	1.70
45	Río Pedregoso	1,056.11	5,000	100	20	57	75	9,524.13	48	68	9,163.64	3.79
46	Chapingo	1,172.44	5,000	100	20	66	82	11,511.23	48	68	10,789.41	6.27
47	Río Cangrejero	973.99	5,000	100	20	58	77	8,689.52	48	68	8,352.18	3.88
48	Vado Ancho	299.14	6,000	100	30	72	86	3,098.33	74	88	3,120.47	-0.71

49	31 de Diciembre	979.62	5,000	100	30	72	87	10,298.26	65	82	10,152.36	1.42
50	Río Negro	3,597.73	5,000	100	30	68	83	35,325.10	65	82	35,339.15	-0.04
51	La Lucha	178.16	5,000	100	20	60	78	1,679.63	48	68	1,628.31	3.06
52	Nueva Tenochtitlan	265.19	5,000	100	30	73	88	2,824.26	65	82	2,774.85	1.75
53	Huixtla	2,112.92	7,000	300	20	70	85	19,762.37	86	94	20,628.13	-4.38
SUMA		35,527.40						301,229.03			304,115.52	
PROMEDIO		670.30	5,000	100	30	67	82	5,683.57	68	83	5,738.03	-1.07

5.3.6. CONCLUSIONES

De estos resultados, se obtiene que los Modelos Distribuido y Agregado para estimar la magnitud del escurrimiento derivado de la precipitación del Ciclón Tropical Stan, para las subcuencas de la Cuenca Huixtla, empleando el concepto de número de curva, las técnicas de SIG, Álgebra de Mapas y el algoritmo propuesto de números de base 10, proporcionaron resultados muy similares, tanto para las subcuencas con una diferencia de 1.07 %, como para toda la Cuenca, con una diferencia de 0.97 % lo cual contrasta ampliamente con los resultados obtenidos por Dal-Ré (2003) que obtuvo diferencias de más del 100 % entre el Modelo Distribuido y el Agregado aplicados a una cuenca de España. De esta forma, se puede afirmar, que por la forma de generar a nivel de celda el cálculo de los parámetros N_c y S_r y al final, la magnitud del escurrimiento, el Modelo Distribuido es el más confiable y su esquema de cálculo debe adoptarse para la estimación del escurrimiento de cuencas costeras en condiciones similares como las de Chiapas, México.

5.3.7. LITERATURA CITADA

- Arellano Monterrosas, J. L. L. 2012. Vulnerabilidad y Gestión de Riesgos por Deslizamientos e Inundaciones en la Cuenca Superior del Río Huehuetán, Chiapas. Tesis Doctoral. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Programa de Posgrado. Jiutepec, Morelos, México.
- Bedient, P.B., W.C. Huber, B.E. Vieux. 2012. Hydrology and Floodplain Analysis. 5th. ed. Prentice-Hall. 816 p.
- Campos Aranda, D. F. 2011a. Identificación del número N mediante el método del HUT, en siete cuencas del alto río Grijalva, México. Ingeniería, Investigación y Tecnología, XX (3): 269-276. México.
- Campos Aranda, D. F. 2011b. Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento. Primera Edición. Primera edición. San Luis Potosí, SLP. México. 333 pp.

5. RESULTADOS. ARTÍCULOS GENERADOS

- CONAGUA/UACH. 2006. Evaluación de los efectos del cambio de cobertura y de uso del suelo en la erosión hídrica y las relaciones precipitación-escurrimiento en las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, del estado de Chiapas. Informe Final. Ed. Universidad Autónoma Capingo. Chapingo, Estado de México, México.
- Dal-Ré Tenreiro, R. 2003. Pequeños embalses de uso agrícola. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 385 pp.
- Juárez Méndez, J.; Ibáñez Castillo, L.A.; Pérez Nieto, S.; Arellano Monterrosas, J. L. 2009. Uso del Suelo y su efecto sobre los escurrimientos en la cuenca del Río Huehuetán. Ingeniería Agrícola y Biosistemas: 1 (2); 60-76.
- McCuen Richard, H. 2005. Hydrologic Analysis and Design. Ed. Prentice-Hall.
- Miranda Aragón, L.; Ibáñez-Castillo, L. A.; Valdez Lazalde, J. R.; Hernández De La Rosa, P. 2009. Modelación Hidrológica Empírica del Gasto de 100 años de periodo de retorno del Río Grande, Tlalchapa, Guerrero en dos escenarios de uso de suelo. Agrociencia: 43 (4): 333-344.
- Mockus, V. 1949. Estimation of total (and peak rates of) surface runoff for individual storms. Exhibit A, Appendix B, Interim Survey Report, Grand (Neosho) River Watershed, US Department of Agriculture, Washington, D.C. USA.
- Natural Resources Conservation Service, 2013. National Engineering Handbook, part 630, Hydrology. U.S. Department of Agriculture. <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detailfull/national/water/?&cid=stelprdb1043063>. Consultado el 14 de mayo del 2013.
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R. 2001. Soil and Water Assessment Tool User's Manual; Versión 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory of Agricultural Research Service and Blackland Research Center at Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas. USA.
- Pérez Nieto, S.; Ibáñez-Castillo L. A.; Hernández Saucedo, F. R. y; Arellano Monterrosas, J. L. 2007. Tasa de erosión en la Costa de Chiapas estimada por álgebra de mapas. Ponencia presentada en el XIV Congreso Nacional de Irrigación. ANEI, A. C. 2 al 5 de octubre de 2007. Morelia, Michoacán
- Pérez Nieto, S.; Arellano Monterrosas J. L. L.; Ibáñez Castillo, L. A. y Hernández Saucedo F. R. 2012. Estimación de la erosión hídrica provocada por el huracán

Stan en las cuencas costeras de Chiapas, México. Terra Latinoamericana, Volumen 30 Número 2. Montecillo, Estado de México. pág. 103-110.

Pérez Nieto, S. 2013. Erosión hídrica en cuencas costeras de Chiapas y estrategias para su restauración hidrológico-ambiental. Tesis Doctoral. Programa de Hidrociencias del Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México.

Ponce, V. M. and, R.H. Hawkins. 1996. Runoff curve number: has it reached maturity?. Journal of Hydrologic Engineering: Vol 1 (1) 11-19.

Rivera Toral F., Pérez Nieto, S., Ibáñez Castillo L.A., Hernández Saucedo, F.R. 2012. Aplicabilidad del Modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las cuencas de México. Agrociencia: 46 (2): 101-105.

Terzoudi, Chr. B.; Gemtos, T.A.; Danalatos, N.G. y Argyrokastritis, I. 2007. Applicability of an empirical runoff estimation method in central Greece. Soil & Tillage Research. Pp. 198–212

Todini, E. 1988. Rainfall-Runoff Modeling- Past, Present and Future. J. of Hydrology 100: 341-352.

U.S. Army Corps of Engineers. 2000. Hydrologic Modeling System, HEC-HMS. Technical Reference Manual. Washington, D.C.

U.S. Army Corps of Engineers. 2010. Hydrologic Modeling System, HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension, User's Manual, Version 5.0. Washington, D.C.

6. ANÁLISIS CONJUNTO DE RESULTADOS

6.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Las características de la Costa y, en particular de las Cuencas Costeras de Chiapas, entre las que se ubican las de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, donde se enmarca el estudio aquí desarrollado y expuesto, son particulares y peculiares en al menos cuatro aspectos relacionados con las relaciones lluvia-escurrimiento y el fenómeno de erosión que se analizó y que orientan, definen y condicionan los resultados obtenidos en los estudios realizados:

- a) La magnitud y distribución espacial y temporal de la precipitación, que es superior a los 4,000 mm anuales en prácticamente toda la región e incluso sobrepasa los 5,000 mm en la parte media de las cuencas; ello además de que en las últimas décadas analizadas ha habido un notorio incremento de la precipitación del orden de los 1,000 mm.
- b) Las pendientes del terreno, que en las partes medias y altas de las cuencas son mayores al 100%, no obstante que las pendientes medias de las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, son en promedio a nivel de las subcuencas estudiadas, de 41.0, 31.4 y 47.6 %, respectivamente
- c) El uso de suelo predominante, que en las áreas altas de las cuencas son selva o bosque y en las partes medias, se combina con uso agropecuario con la presencia de las fincas de café y de especies frutícolas y de praderas; en cualquier caso, la cobertura vegetal, es densa, permanente y de fácil y rápido crecimiento, dada la presencia de lluvia prácticamente todo el año.
- d) Los suelos, que sin ser muy arenosos ni profundos son muy permeables en principio, aunque al humedecerse se cementan, disminuyendo su permeabilidad y aumentando su escurrimiento.

De tal manera que los resultados del análisis de las relaciones lluvia-escurrimiento y de los procesos hídricos erosivos deben tener en cuenta estas condiciones, y considerar además que las metodologías aplicadas fueron desarrolladas en otras regiones, que tienen otras condiciones y características y que, por tanto, no son aplicables en principio, y al aplicarlas debe tenerse claridad en sus implicaciones.

Así, si bien ni la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, ni el concepto de Número de Curva aplicarían en principio para Chiapas y en particular a las zonas costeras, los resultados aquí reportados, muestran que ello es posible, no obstante que éstos, no pueden generalizarse aún y llevan a concluir que amerita profundizar más en los estudios y análisis de los efectos de sus elementos en sus valores finales. De otra parte, el concepto de Parámetro de Escurrimiento (K_e) y las expresiones definidas en la Norma NOM-CNA-011 para México por la Comisión Nacional del Agua para el cálculo del coeficiente de escurrimiento, no aplican para la zona referida, por las propias fronteras definidas de origen en 350 y 2,150 mm de precipitación; dada la estructura de las fórmulas que representan líneas rectas, no tienen limitación, y por lo tanto se aplicaron al cálculo del coeficiente de escurrimiento.

6.2. SOBRE LOS PROCESOS EROSIVOS

La tasa de erosión se estimó para las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, y para los cuatro escenarios definidos como sigue: El Escenario 0, con los valores del parámetro C y R de la EUPSM correspondientes a febrero de 1990; en los Escenarios 1 al 3 se consideró la lluvia de 2005 que considera al ciclón tropical Stán, diferenciándose por la condición de cobertura dada por el parámetro C ; así, con el valor de C para febrero de 1990 se generó el Escenario 1, con el valor de C para febrero de 2005 el Escenario 2 y con el valor de C de noviembre de 2005 el Escenario 3. En los cuatro escenarios, los demás parámetros fueron los mismos.

Para el estudio de los procesos erosivos en las cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán y la estimación de los escurrimientos en la última, se empleó la subdivisión y caracterización que CONAGUA/UACH (2006a) hizo para ellas en 53, 37 y 65 subcuencas, cuyas superficies promedio fueron de 670.33, 586.29 y 710.14 ha, respectivamente; las superficies totales de las cuencas son de 35,527.39, 32,015.71 y 46,208.96 ha, respectivamente.

Las cuatro características referidas en el inciso anterior, para las tres cuencas, implicaron valores muy grandes de la tasa de erosión (P_s) evaluada con la EUPS modificada, que ni el sistema de clasificación de la FAO resultó aplicable para su categorización, y hubo que adecuar y ampliar las categorías de ésta, adicionando dos para dejar en tres los valores superiores a $200 \text{ t x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$, proponiendo una denominación para las tres categorías propuestas que son las que sigue: muy severa (para P_s de 200 a $500 \text{ t x ha}^{-1} \text{ x año}^{-1}$), extrema (P_s de 500 a 1,000) y extraordinaria (P_s mayores de 1,000).

Analizando los resultados mostrados en el cuadro 5.1, se observa que no hay una tendencia de continuidad entre las categorías en ninguna de las tres Cuencas de manera independiente, si bien hay un comportamiento similar en las categorías al comparar las tres. Resalta por ejemplo para el Escenario 3 que contempla la lluvia de Ciclón Tropical

6. ANÁLISIS CONJUNTO DE RESULTADOS

Stán que:

- a) El menor porcentaje de superficie afectada se presenta para la categoría de 5 a 10 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ Incipiente, con valores de apenas el 0.50 % en Huixtla, de 4.32 % en Huehuetán y 1.10 % para Coatán;
- b) El mayor porcentaje de superficie afectada se concentra en el rango de 50 a 200 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ Severa, para las cuencas Huixtla y Huehuetán, si bien con una marcada diferencia entre ellas, al ser del 39.08 % en la primera y de 20.36 % en la segunda y difiriendo con Coatán, cuyo mayor porcentaje lo concentra en la categoría de 200 a 500 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ con 29.87 %;
- c) Alrededor de una décima parte de las cuencas (10.93 % para Huixtla, 11.88 % para Huehuetán y 8.48 % para Coatán), no tiene mayores problemas de erosión al encontrarse en la primera categoría de la FAO que va de 0 a 5 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$; y
- d) Un porcentaje mayor de su superficie que en el primer rango y similar entre las tres cuencas (13.75 % para Huixtla, 20.39 % para Huehuetán y 16.95 % para Coatán, se ubica en la última categoría que es mayor de 1,000 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

Los valores altos de tasa de erosión concuerdan con lo reportado por Baumann (2000) de 859 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ en las planicies sin cobertura vegetal y con Arellano (1994), que obtuvo una tasa de erosión máxima de 2,148 $\text{txha}^{-1}\text{año}^{-1}$ para la región de la Costa de Chiapas y se consideraron las más altas del país.

También es notorio el comportamiento más heterogéneo y similar en las tasas de erosión para las Cuencas Huixtla y Coatán, en contraste con el comportamiento de la Cuenca Huehuetán que es más uniforme no sólo entre categorías, sino incluso entre Escenarios, lo cual concuerda completamente con la configuración topográfica y fisiográfica de las Cuencas, ya que la pendiente media de las subcuencas de la Cuenca Huehuetán es la menor con 31.4 % (CONAGUA/UACH, 2006a) y con la condición de cobertura del suelo caracterizada por el Número de Curva (Castillo, 2010 y Arellano, 2012), ya que se concluyó que en ella, se ha avanzado en la conservación de la cobertura en tanto que en las Cuencas Huixtla y Coatán se ha deteriorado más.

Por último, si bien no es visible directamente, es posible referir, por los valores de sus principales elementos, que los factores que más contribuyeron en los valores altos de erosión determinados, son el factor R (por la magnitud de la precipitación) y el topográfico LS (por la magnitud de la pendiente S); sin embargo, esto debe analizarse y confirmarse cuantitativamente, ya que ambos factores, son de los menos estudiados para condiciones como las que privan en estas cuencas.

Con base en la información empleado y los resultados obtenidos, de manera general se puede afirmar contundentemente que la metodología y la técnica aplicada para la determinación de la tasa de erosión en el presente trabajo, es muy adecuada, conveniente y precisa evaluando la EUPS, si bien requiere de mayor calibración, en todos sus parámetros y para condiciones como las de las Cuencas Costeras de Chiapas.

6.3. SOBRE LA APLICABILIDAD DEL NÚMERO DE CURVA

En el cuadro 6.1, se presenta un resumen de los valores de N_c obtenidos del proceso de cálculo y ajuste para su calibración para las nanocuenas Rosita, Finca Brasil, Hannover y Berriozábal. En la primera columna de valores, se listan los N_c obtenidos de datos de lámina precipitada y lámina escurrida medidos en campo (N_cC) empleando las expresiones 2.56 (para el parámetro de retención) y 2.30 para el N_c . Vale la pena resaltar que los valores iguales del N_c calculados para las Nanocuenas Rosita y Hannover que tienen coberturas vegetales diferentes, puede atribuirse a que dichas condiciones son similares hidrológicamente y el valor tan bajo de Finca Brasil, se considera poco confiable debido a que sólo se tuvieron 4 datos y que las láminas escurridas son muy variables, de entre 0.09 mm a 3.57 mm, siendo que sus valores correspondientes de precipitación son muy similares y grandes, 32.60 y 58.60, que implican valores de coeficiente de escurrimiento de 0.24 a 6.09; similarmente, el N_cC , para los tres casos, siendo adecuado para las condiciones de la cuenca, los valores tienen una variación de 6.3 unidades. En contraste, el valor alto y mayor que todos los N_cC para la Nanocuenca Berriozábal, es completamente concordante con sus condiciones hidrológicas.

También es de relevancia considerar que no se tuvo un mismo periodo en la toma de datos, que significó un número diferente de eventos analizados para las cuatro nanocuenas. Se considera que un número de 20 eventos es adecuado para obtener resultados concluyentes.

Cuadro 6.1. Resumen de valores de N_c , con las correcciones por HA y por pendiente obtenidos por las expresiones del SCS, Chow y Dal-Ré

NANOCUENCA	N_cC	N_{c2}	N_{c3}			N_{c2S}				N_{c1S} o N_{c3S}			
			SCS	Chow	Dal-Ré	N_{c2S3}	SCS	Chow	Dal-Ré	SCS_3	SCS	Chow	Dal-Ré
Rosita	76	72	69	67	68	77	77	76	76	75	90	88	88
Brasil	60	70	77	76	76	75	72	72	72	74	73	71	72
Hannover	76	63	74	73	73	69	69	69	69	68	85	83	84
Berriozábal	84	71	75	74	74	76	76	76	76	75	90	88	88

De lo expresado por Mockus a través de Ponce (1996), el concepto de Número de Curva y el método del cálculo de volumen de escurrimiento, se desarrolló para eventos de precipitación y no para valores promedio o integrados mensuales o anuales, y para zonas áridas con escasa vegetación y valores de pendiente menores de 5 %; cuando las pendientes son mayores de ese valor, se propuso corregir los N_c aplicando la expresión 2.45 que, sin embargo, se mostró que no aplica correcciones para valores de pendiente mayores de 40 %, además de que éstas decrecen en lugar de aumentar, como es de esperarse, asumiendo la dinámica del movimiento de los fluidos; ambos aspectos contrastan completamente con los prevalecientes en las Cuencas Costeras de Chiapas, por lo que, evidentemente, su aplicabilidad no es adecuada.

De otra parte, por las mismas circunstancias de origen del concepto y el tipo de coberturas vegetales y usos del suelo, no están definidos como tales o con tipos semejantes en las tablas definidas por el SCS, lo que llevó a Rivera (2009) a generalizar las condiciones de selva y bosque, que CONGUA/UACH (2006) identificaron como diferentes por las especies predominantes en una sola, lo que dificulta la identificación del N_c de tablas (N_{c2}). En efecto, como se mostró en el cuadro 4.25, las características de cobertura vegetal que llevan a definir el uso del suelo y que está asociado con la condición hidrológica del sitio, no hubo clara y directa correspondencia con las reportadas por el SCS de las tablas 2.6 y 2.7; por lo que se recomienda ampliar la revisión de la fundamentación y generar los números de curva para los tipos de cobertura para zonas tropicales en general y para condiciones de precipitación y pendiente como las regiones cuencas costeras de Chiapas.

Los valores del N_{c2} , obtenidos en el estudio y tabulados en la segunda columna de valores del cuadro 6.1, resultaron muy similares entre sí, para las cuencas Rosita, Brasil y Berriozábal, dadas las combinaciones de los características de Uso del Suelo, que siendo diferentes, se homogenizaron en la Condición Hidrológica que resultó buena para todas ellas y el Grupo Hidrológico que se definió entre B y C para todos los casos. En contraste la cobertura de Café con sombra, para la Nanocuenca Hannover no se pudo encontrar en dichas tablas características similares, sino que se tomó el valor propuesto por Arellano (2012) para condiciones idénticas, aunque asumiendo también buenas condiciones hidrológicas y grupo hidrológico entre B y C.

Respecto a la corrección por humedad antecedente, primeramente es oportuno señalar que, debido a que tanto N_{c1} (que se calculó con la expresión) como el N_{c3} (que se calcula con la expresión 2.37), dependen únicamente de N_{c2} y no propiamente de la HA ; en cualquier caso, sólo se obtiene un valor de N_{c1} y uno para N_{c3} para cada área de estudio; en segundo término, de los resultados expuestos en la columna 19 del cuadro 4.28 se observa que cuando se considera la presencia de humedad antecedente en los últimos 5 días previos, el N_c se incrementó hasta entre 20.7 % para la Nanocuenca Rosita y 28.3 % para la Nanocuenca Hannover, cuando se calcula el N_{c3} que se asocia con la presencia de abundante precipitación y humedad en el suelo que implica que se potencia

la capacidad del medio para producir escurrimientos; en tanto que se reduce entre - 25.8% y 30.8 %, (para las mismas nanocuenas, respectivamente), cuando se calcula Nc_1 , que se relaciona con la presencia de escasa precipitación y limitada humedad en el suelo, que implica mayor infiltración y menor escurrimiento.

Y para ambos casos, los resultados obtenidos con las expresiones reportadas por Muzik (2002) y atribuidas a Chow *et al.* (2.38 y 2.39 para el cálculo de Nc_1 y Nc_3 , respectivamente), o las citadas por Dal-Ré (2.40 y 1.41, respectivamente, también), con diferencias entre sí y con la expresión del SCS de una unidad de Nc como máximo, lo que implica completa certidumbre para emplearlas como alternativas para calcular las correcciones por humedad antecedente; ello independientemente, de que sea o no útil o recomendable (como se verá en las conclusiones) el cálculo de la Nc_1 , cuando así corresponda.

Como se mostró con la gráfica 4.5, que la expresión 2.45 propuesta por el SCS y citada por Neistch *et al.*, (2001), no es adecuada para calcular la corrección por pendiente de los Nc , ya que contrariamente a lo esperado y a la fundamentación de la cinemática del flujo hídrico, esta expresión genera correcciones decrecientes a medida que se aumenta le magnitud de la pendiente de las cuencas y que se vuelven nulos para Sc de aproximadamente 40 %, y más aún que se recomienda su uso para valores mayores de 5%; lo anterior, además de que dicha expresión no es aplicable para cuando no se tiene humedad antecedente. No obstante, se empleó la expresión referida para la corrección de los Nc por pendiente y se propuso aplicar en ella Nc_1 en lugar de Nc_3 cuando la humedad antecedente es menor de 50 mm y no se tiene el valor de Nc_3 ; los resultados implicaron diferencias de entre 13.4 y 17.9 %, que con los obtenidos, al usar la Nc_3 ; En contraste los resultados obtenidos cuando se aplicaron los resultados de Nc_1 o Nc_3 , según correspondió, obtenidos de las expresiones de Chow y Dal-Ré son prácticamente iguales también entre sí y con respecto a la expresión del SCS con diferencias menores a 1.0 % en ambos casos.

Por último, al hacer las determinaciones de los números de curva corregidos por HA_5 y por pendiente y obtener los valores finales calculados, cuyos promedios se expusieron en el cuadro 4.30 y se calcularon las diferencias con los valores de referencia (NcC), se obtuvo que los que menor error tuvieron fueron los que resultaron de considerar HA_5 , es decir que se calculó Nc_3 al corregir por este concepto. En cualquier caso, éstos son los errores (registrados en las columnas encabezadas por 4.31) con los que deben corregirse los valores calculados de Nc para su calibración, mismos que se reproducen en el cuadro 6.2. De este cuadro se evidencia que las expresiones de Chow y Dal-Ré, implicaron menor error (o corrección) para todos los casos, con un máximo de 2 unidades y que las que menores correcciones requieren son las expresiones de Dal-Ré.

Vale puntualizar que para el caso de la Nanocuenca Brasil, se reportaron los valores promedio de los corregidos como Nc_1 y Nc_2 , por humedad antecedente e insistir que, estos resultados no son contundentes, por el escaso número de eventos evaluados.

Cuadro 6.2. Correcciones a aplicar a los valores obtenidos de tablas para las Nanocuenchas estudiadas y con correcciones calculadas por las expresiones del SCS, Chow y Dal-Ré

NANOCUENCA	CORRECCIONES		
	SCS	Chow	Dal-Ré
	(adim)	adim)	(adim)
Rosita	10.9	9.2	9.4
Brasil	12.8	10.8	11.5
Hannover	8.6	7.1	7.3
Berriozábal	5.9	4.3	4.5

No obstante lo anterior, no se pueden derivar conclusiones generales, sino que los resultados sólo son aplicables a los casos concretos estudiados y a aquellos que puedan considerarse similares.

6.4. SOBRE LA APLICABILIDAD DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO

Por definición, el Método de la norma oficial mexicana NOM-CNA-011 está muy restringido, toda vez que está limitado a valores de entre 350 a 2,150 mm de precipitación, que es su único parámetro; que no considera la cobertura vegetal o el uso del suelo, y que tampoco considera la magnitud de la pendiente de la cuenca; ello lo hace particularmente no aplicable a las zonas costeras como las de Chiapas, donde, como se mostró en el cuadro 4.17 al revisar los datos de 11 estaciones de la Cuenca Huixtla, el valor de la precipitación media anual es en la mayor parte de ella, es mayor del límite superior, del método.

Desde ese punto de vista, es más completo, práctico y aplicable el método de la SRH (1974), reportado por Pérez (2001), ya que contemplan estos tres elementos, efectivamente condicionan de manera importante la magnitud de escurrimiento, según se muestra en la tabla 2.2.

Después de revisar el comportamiento de las expresiones 2.28 y 2.29, en las que se basa el método de la norma, verificar que se trata de una línea recta y no encontrar las razones de los límites establecidos, se aplicaron para la estimación de del Coeficiente de escurrimiento; los valores obtenidos son los reportados en el cuadro 4.33, en el que también se incluyen los valores de referencia calculados aplicando la expresión de la

definición (2.24) con los datos medidos en campo de lámina precipitada y lámina escurrida en las Nanocuencas Rosita, Brasil, Hannover y Berriozábal.

Estos resultados, muestran que el Método de la NOM-CNA-011, sobreestima en general el valor del C_e , pues los obtenidos para las cuatro Nanocuencas son los menores que el Método puede arrojar y en todos los casos resultaron mucho mayores que los medidos en campo con diferencias de entre 2.8 % para el caso de la Nanocuenca Brasil y 21.9 % para la Nanocuenca Hannover. Vale resaltar que, la Nanocuenca que mayor valor obtuvo fue Rosita, aunque no fue la que menor error o diferencia significó; por el contrario la menor diferencia correspondió para la Nanocuenca Brasil, que al tener muy pocos datos, no es del todo confiable y generalizable.

Los valores pequeños del C_e medidos y considerados correctos, se pueden atribuir a la amplia y permanente cobertura vegetal que hay en la región, y que reducen considerablemente los escurrimientos, e implica efectivamente que el Método de la Norma no es aplicable como tal a las condiciones de la Costa de Chiapas, en que prevalecen además, las altas precipitaciones; y a ello hay que adicionar el efecto de la pendiente, y la magnitud de la Nanocuenca, que no se consideran. Es de relevancia repasar también, que al considerar datos generales de precipitación y de área, en el Método de la Norma, no es necesariamente aplicable a áreas tan reducidas como son las Nanocuencas y los resultados no son, en principio extrapolables.

Los valores propuestos de K_e , para todos los casos, son muy inferiores para los más de ellos, de los de la **tabla 2.4**; ello cuando menos indica que debe revisarse el método, para su aplicación a las condiciones de las cuencas costeras de Chiapas. No sobra insistir que se debe incluir en el análisis la pendiente del terreno y la cobertura vegetal, como un factor fundamental.

Para tal efecto, se recomienda ampliar el trabajo desarrollado a las demás nanocuencas y sitios de monitoreo de las Cuencas Huixtla, Huehuetán y Coatán, en los que se cuenta con datos de precipitación y escurrimiento, cobertura vegetal y pendiente. Valga precisar en la recomendación puntual de asegurarse de tomar con precisión estos datos, hacer la caracterización topográfica y fisiográfica a través de sus principales parámetros como son L_c , L_{cp} , S_c , S_{cp} , de cobertura y propiedades del suelo, que permitan asegurar la certidumbre de los datos.

6.5. SOBRE EL CÁLCULO DEL ESCURRIMIENTO CON LA METODOLOGÍA PROPUESTA

La metodología generada y propuesta para la determinación del volumen de escurrimiento V_e , en una cuenca de captación, a partir de la magnitud de la precipitación de un evento se base en el método del número de curva del SCS y que integra las

técnicas de sistema de información geográficas (SIG) y álgebra de mapas (TAM) y el algoritmo de números de base 10 (NB_{10}) que también constituye una propuesta del autor, ha quedado demostrada y validada con su aplicación al cálculo del volumen de escurrimiento de la Cuenca del Río Huixtla del estado de Chiapas, correspondiente a la lluvia del ciclón tropical Stán ocurrido en los días 1 al 6 de octubre de 2005 y para cuya determinación de su magnitud se emplearon los registros de 11 estaciones meteorológicas localizadas en el interior y zonas aledañas de la cuenca.

Adicionalmente y para fines comparativos de los resultados se emplearon los Modelos Distribuido para lo cual se utilizó la división de la cuenca por CONAGUA/UACH (2006a) en 53 subcuenca cuyas superficies se exponen en el cuadro 4.35 y el Modelo Agregado que considera la superficie total de la cuenca y la precipitación total de fenómeno meteorológico referido.

Para la implementación de modelo es necesario contar con la siguiente información:

- a) Una imagen de satélite que defina según su resolución espacial a través del tamaño de píxel el tamaño del área para la que se realizarán todas las determinaciones y cálculos, así como los resultados cuando se emplea el Modelo Distribuido.
- b) La delimitación y superficie de la cuenca de estudio y su división en subcuencas a las que se le debe determina la magnitud de sus superficie; se recomienda realizar esta determinación usando el modelo SWAT que lo hace automáticamente con sólo definir el punto de cierra de la cuenca y la magnitud promedio propuesta de las subcuencas.
- c) La magnitud de la precipitación del evento para el que se desee determinar el escurrimiento, medida en varios sitios del interior y externos pero aledaños a la cuenca, de modo que se pueda elaborar un mapa ráster que permita tener para cada píxel el dato de precipitación que le corresponde.
- d) Un plano de uso de uso del suelo cuyos valores deben definirse para cada píxel y asociarse a un valor de la variable NB_{10} a partir de una cuadro como el 4.36 en el que se relaciona lo correspondiente a la Cuenca Huixtla.
- e) Un plano para el que se defina a nivel de píxel la Condición Hidrológica de la cuenca que se requiere para calcular del número de curva, y su asociación con un NB_{10} como se muestra para la Cuenca Huixtla en el cuadro 4.37.

- f) Y un mapa en el que se defina el NB_{10} para cada píxel también, correspondiente al grupo hidrológico definido por el SCS para la cuenca, tal como se ejemplifica para la cuenca Huixtla en el cuadro 4.38.

La TAM se aplica para calcular el Nc a partir de su definición para cada píxel, aplicando los operadores correspondientes dado por la expresión matemática que permite su cálculo.

El uso del algoritmo para definir, aplicar y utilizar el número de base 10, mostró su efectividad en el caso resuelto en el tema 4.3.4 para la Cuenca Huixtla y hace posible la introducción de al menos una variable más de la que depende el Nc y, finalmente, el escurrimiento, como se ha propuesto para la pendiente, tan importante en el caso de zonas como la cuencas costeras de Chiapas, pero cuyo estudio más amplio quedó fuera del alcance es este proyecto.

La aplicación de la metodología propuesta mostró su viabilidad con el caso desarrollado para la Cuenca Huixtla; quedando de manifiesto también, con los resultados obtenidos con los Modelos Distribuido y Agregado, que los resultados, son prácticamente iguales, no obstante lo cual, se recomienda aplicar el primero, ya que discretiza la cuenca y el cálculo a nivel del tamaño de un píxel, que hace posible la determinación cualquier variable (Nc , Le o Ve , por ejemplo) a nivel de cualquier superficie, como el de subcuencas, municipios, comunidades, etc.

7. COCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. CONCLUSIONES

7.1.1. GENERALES

Las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán ubicadas en la Región de la Costa de Chiapas, presentan precipitaciones medias de más de 4,000 mm, pendientes medias de 40.7, 31.7 y 47.6 %, respectivamente, y coberturas de bosque con distintas especies y magnitudes, que las hacen particulares y peculiares, para las que no aplican en principio, directamente y en su concepción inicial las metodologías como la EUPS para estimar la tasa de erosión; el número de curva para estimar los escurrimientos y el de coeficiente de escurrimiento definido por la NOM-CNA-011 .

Las nanocuencas estudiadas son diferentes en todos los aspectos, salvo en su ubicación en la Cuenca Huixtla; en la magnitud de la precipitación que en cada uno se presenta variando desde 1,390 mm para Berriozábal hasta 4,694 mm, para Hannover; en la magnitud de su pendiente media, que similarmente es muy variante, pasando de 23.0 % para Berriozábal a 60.0 % para Hannover; ello significa, en principio que el análisis es independiente para las cuatro nanocuencas.

Es posible aplicar los conceptos y metodologías para determinar la tasa de erosión mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo y para estimar el escurrimiento en cuencas basada en el Número de Curva (N_c), desarrolladas para condiciones de baja precipitación (menores de 2,150 mm) y pendientes suaves (menores de 5 %), a las condiciones de cuencas costeras como las de Chiapas, con valores de precipitación que superan los 5,000 mm y pendientes mayores de 100 %, mediante su calibración, ajuste o adecuación y aplicando técnicas como los sistemas de información geográfica y de álgebra de mapas, para sistematizar, agilizar y facilitar los cálculos y hacer más congruentes los resultados con los fundamentos teóricos de los conceptos aplicables.

7.1.2. SOBRE LOS PROCESOS EROSIVOS

Las características de alta precipitación, fuertes pendientes y suelos impermeables, dieron como consecuencia valores de tasa de erosión, para noviembre de 2005, cuando recién había ocurrido el ciclón tropical Stán, de más de 40 % (41.37% para la Cuenca del

Río Huixtla, 50.79 % para la del Río Huehuetán y 59.87 % para la del Río Coatán), en el rango último del sistema de clasificación de la FAO de **muy severa** con más de $200 \text{ t x h a}^{-1} \text{ x a ñ o}^{-1}$, que implicaron generar las tres categorías siguientes para discretizar este rango: **muy severa** (de 200 a $500 \text{ t x h a}^{-1} \text{ x a ñ o}^{-1}$), **extrema** (500 a 1,000) y **extraordinaria** (más de 1,000); y aun para este caso, en el último rango, se ubicó 13.75 %, 20.39 % y 16.95 % de la superficie de las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, respectivamente, que se pueden considerar como los más altos del país.

7.1.3. SOBRE EL USO DEL MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA DEL SCS

Las expresiones 2.38 y 2.39 atribuidas a Chow *et al.*, citadas por Musik (2002) así como las expresiones 2.40 y 2.41 reportadas por Dal-Ré (2003), para el cálculo de Nc_1 y Nc_3 , respectivamente, para la corrección por humedad antecedente, reportaron valores muy similares entre sí y con la fórmula del SCS reportada por Neitsch (2001); los valores finales de Nc corregidos también por pendiente, reportaron valores más precisos incluso que los reportados por la expresión definida por el SCS.

Para las cuencas costeras de Chiapas, con valores mayores altos de precipitación, el cálculo de la corrección por humedad antecedente con las expresiones que consideran el uso del Nc_3 , empleando las expresiones del SCS (2.37), de Chow (2.39) y la reportada por Dal-Ré (2.41), resultó adecuado y conveniente aun cuando no hubo humedad antecedente mayor de 50 mm en los cinco días precedentes, lo cual puede atribuirse a que, por la magnitud de la precipitación anual tan alta, los suelos se pueden considerar permanentemente húmedos, con buenas condiciones hidrológicas.

Los valores de Nc obtenidos de tablas del SCS o similares y corregidos por humedad antecedente y pendiente, deben corregirse adicionalmente, incrementándolos en 3.4, 3.8 y 3.7 unidades, respectivamente, según se empleen las expresiones indicadas para Nc_3 , si se tienen condiciones predominantes de acahual con buenas condiciones hidrológicas; en 8.5, 8.9 y 8.8 unidades, respectivamente, según se empleen las expresiones indicadas para Nc_3 para el caso de condiciones como las que privan en la Nanocuenca Hannover de cobertura con café en sombra; e incrementándolos en 8.7, 9.2 y 9.1 unidades, respectivamente, según se empleen las expresiones indicadas para Nc_3 , para condiciones similares de cultivo de maíz y praderas (definidos en Chiapas como acahuales), con buenas condiciones hidrológicas.

7.1.4. SOBRE EL CÁLCULO DE ESCURRIMIENTOS

Por los límites de precipitación en que aplica la norma oficial mexicana NOM-CNA-011 (entre 350 y 2150 mm), para la determinación del coeficiente de escurrimiento C_e , las fórmulas para su cálculo no pueden aplicarse a las zonas tropicales con altas

precipitaciones como las Cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán de la Costa de Chiapas, cuyas magnitudes de la precipitación media anual con frecuencia superan los 5,000 mm; sin embargo, considerando el comportamiento lineal de dichas expresiones, se mostró que sí son aplicables, aunque siempre sobreestima el C_e , hasta en más de un 20 %.

El algoritmo de números de base 10 (NB_{10}) desarrollado y su integración con las técnicas de álgebra de mapas (TAM) y sistema de información geográfica (SIG) y con el Método de Número de curva (N_c) del SCS, mostró su aplicabilidad y bondad para el cálculo del volumen de escurrimiento de la Cuenca del Río Huixtla, Chiapas.

Los Modelos Distribuido y Agregado reportaron idénticos resultados del volumen de escurrimiento para la Cuenca del Río Huixtla, para la precipitación del ciclón tropical Stán con valores de 301,229,025.17 y 304,115,519.13 m³, respectivamente, con diferencias del orden del 1.0 %, por lo que se consideran prácticamente iguales.

7.2. RECOMENDACIONES

7.2.1. DE CARÁCTER GENERAL

Debe ampliarse en cobertura y alcances y detallarse en los aspectos a cubrir y en la profundidad del análisis del estudio desarrollado por la CONAGUA y UACH (2006), desarrollado para las Cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, para desarrollarse en las demás cuencas y que completen el diagnóstico desarrollado para completar su caracterización.

Generar un plan de manejo integral de cada cuenca, en el que se planteen las acciones estructurales y no estructurales, con sus costos y calendarización de inversiones que se orienten a su rehabilitación hidrológico-ambiental, contemplando el involucramiento de los actores sociales, que en buena medida son los principales responsables de la degradación de los recursos naturales agua, suelo y vegetación.

Las acciones propuestas deben contemplar las alternativas de empleo y de fuentes de energía, alternativas de materiales para implementarlas, y de opciones de ingresos para los pobladores de las cuencas a fin de que se cancelen las razones, origen y necesidades que les hacen usar y abusar de los recursos naturales disponibles.

7.2.2. SOBRE LOS PROCESOS EROSIVOS

- a) Afinar en la determinación de los parámetros de la EUPS para México y para las zonas costeras y climas tropicales, particularmente de los parámetros LS y C.

- b) Implementar obras de conservación de suelo y agua en los terrenos y cárcavas, prácticas productivo-conservacionista en zonas productivas y acciones no estructurales que capaciten y concienticen a los actores sociales involucrados en los procesos erosivos para disminuir sus riegos, magnitud y afectaciones.

7.2.3. SOBRE EL USO DEL NÚMERO DE CURVA Y ESTIMACIÓN DEL ESCURRIMIENTO

- a) Se debe hacer un análisis completo y detallado de los componentes del concepto de número de curva N_c definido por el SCS, a fin de generar una tabla específica para los valores de N_{c2} aplicables a las condiciones de altas precipitaciones, fuertes pendientes y coberturas vegetales intensas.
- b) Un planteamiento similar se hace para las zonas agrícolas de riego de las zonas costeras y de todo el país.
- c) Investigar sobre la fundamentación teórica de la definición de la expresión del SCS reportada por Neistch (2001), y su aplicabilidad para la corrección por pendiente de Número de Curva y generar otra que sea válida para rangos de pendiente como los que se presentan en las cuencas costeras de Chiapas, que llegan a ser de más del 100%.
- d) Empleando las tecnologías de imágenes de satélite y modelos digitales de elevación, se propone elaborar mapas de todos los elementos para la determinación del N_c tal como los mapas temáticos que actualmente tiene a disposición el INEGI, para las regiones de interés, que posibiliten su cálculo y aplicación.
- e) Realizar los estudios necesarios para ampliar la aplicabilidad de la NOM-CNA-011 a condiciones de alta precipitación y considerando otros elementos como los de área de la cuenca, pendiente del terreno y cobertura vegetal.

7.2.4. SOBRE LA APLICABILIDAD DE LOS MÉTODOS, MODELOS Y METODOLOGÍAS DE ESTUDIO

- a) Emplear la técnica de álgebra de mapas (TAM) para la evaluación de la EUPS para determinar la Tasa de Erosión de los Suelos, si se pueden elaborar mapas de tipo ráster para cada una de sus componentes, y para la estimación del volumen de escurrimiento en cuencas por el Método del Número de Curva del SCS, complementándola con el algoritmo de números de base 10 aquí propuesto.

- b) Implementar una política y una cultura de medición que haga posible, la instrumentación de cuencas de relevancia como las de captación de presas, para generar datos de precipitación, escurrimiento, sedimentos, etc., que permita calibrar las metodologías existentes y desarrolladas en otras latitudes para su aplicación más confiable y generalizada a las condiciones de México
- c) Ampliar el trabajo desarrollado en el presente estudio a las demás nanocuencas instrumentadas y sitios de monitoreo de las Cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, en los que se cuenta con datos de precipitación y escurrimiento, cobertura vegetal y pendiente.

8. CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abasto, C. D. 2004. El problema de la erosión hídrica de los suelos. Investigación geográfica de cierre del Profesorado de Geografía con trayecto en Ciencias Sociales. Instituto Superior de Formación Docente. Buenos Aires, Argentina
- Alcalá, Graciela. 1999. Solidaridad en la desgracia: los pescadores de El Soconusco luego del paso de Mith por su región. En: Anuario 1998. Centro de Estudios Superiores de México y Centroamérica. Universidad de Ciencias y Artes del Estado de Chiapas.
- Aparicio Mijares F. J. 2012. Fundamentos de Hidrología de Superficie. Décima reimpresión de la 1ra. edición. Ed. Limusa. México D. F.
- Arellano Moterrosas, J. J. L. 1994. La degradación de suelo por erosión hídrica en Chiapas: evaluación y principios tecnológicos para su control. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México.
- Arellano, Monterrosas José Luis. 1999. El Manejo de Cuencas en Chiapas: Una estrategia para el Desarrollo Regional Sustentable. En: Medina, Mendoza Raúl. (Editor). Memorias Simposio 4 Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas. IX Congreso Nacional de Irrigación. Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación, A. C. (ANEI). Culiacán, Sinaloa. pp. 29-48.
- Arellano Moterrosas, J. L. L. 2006. Apropriación territorial, deterioro ambiental y gestión de recursos hídricos en la cuenca superior del Río Custepec, Chiapas. Dirección de Centros Regionales Universitarios de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México.
- Arellano Monterrosas, J. L. L. 2010. Gestión Integral de Recursos Hídricos para reducir la Vulnerabilidad a Deslizamientos e Inundaciones en las Cuencas de la Sierra Madre de Chiapas. Ingeniería Agrícola y Biosistemas. Vol. 2. Núm. 1. Pp. 29-37
- Arellano Monterrosas, J. L. L. 2012. Vulnerabilidad y Gestión de Riesgos por Deslizamientos e inundaciones en la Cuenca Superior del Río Huehuetán,

Chiapas. Tesis Doctoral. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Programa de Posgrado. Jiutepec, Morelos, México.

Aronoff, S. 2005. Remote Sensing for GIS Managers. First edition. ESRI Press. California, USA.

Baumann, J. 2000. Plan de Conservación de Suelos y Agua para la Costa de Chiapas. Programa de Cooperación Técnica México-Alemania. Comisión Nacional del Agua. México, D.F.

Baumann, J. y Arellano Monterrosas, J. L. L. 2003. Measuring Rainfall Erosivity characteristics and anual R-Factors for adjustment of the USLE in a Tropical Climate. In: Gabriels, D. and Cornelis, W. (editors). 25 years of assessment of erosion. Proceedings. Chent Belgium. Pp. 69-74.

Bedient, P.B., W.C. Huber, B.E. Vieux. 2012. Hydrology and Floodplain Analysis. 5th. ed. Prentice-Hall. 816 p.

Brady, N. C. and Weil, R. R. 1999. The nature and properties of soils. 12th edition. Prentice-Hall, Inc. New Jersey, USA.

Calvo E., L.; Ogden L., F. and Hendrickx M., H. J. 2005. Infiltration in the upper río Chagres basin, Panama: The Soil Conservation Service Curve Numbers. En: Harmon, S. Russell (edited) The Río Changres, Panama. Springer. A Multidisciplinary profile of a tropical watershed. Water Science and Technology Library. Vol. 52. Springer. Dordrecht, The Netherlands. Pp. 139-147.

Campbell, J. B. 2002. Introduction to Remote Sensing. Third edition, The Guilford Press. New York. USA.

Campos Aranda, D. F. 1998. Hidrología Probabilística. Ciencia y Desarrollo. Vo.I XXIV. Núm. 141. Julio-agosto. SEP. CONACYT. Pp. 58-69

Campos Aranda, D. F. 2000. Tres métodos de estimación de la precipitación media en una cuenca y su impacto en el cálculo de los coeficientes de escurrimientos mensuales. En edición. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P. México.

Campos Aranda, D. F. 2002. Contraste del procedimiento propuesto para estimar hidrogramas anuales estacionales en cuencas sin aforo. En edición. Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, S.L.P. México.

- Campos Aranda, D. F. 2007. Estimación y Aprovechamiento del Escurrimiento. Primera Edición. Primera edición. San Luis Potosí, SLP. México. 333 pp.
- Campos Aranda, D. F. 2010. Introducción a la Hidrología Urbana. Edición del mismo autor. Primera edición. San Luis Potosí, SLP. México. 269 pp.
- Campos Aranda, D. F. 2011. Identificación del número N mediante el método del HUT, en siete cuencas del alto río Grijalva, México. Ingeniería Investigación y Tecnología; Vol. XII, Núm. 3, Universidad Nacional Autónoma de México. 269-276. México. D.F.
- Canada Center for Remote Sensing. 2005. Fundamentals of Remote Sensing. Natural Resources Canada. First Edition. Ottawa, Canada.
- Castillo López, L. 2010. Determinación de parámetros hidrológicos y de erosión hídrica en la Cuenca del Río Huehuetán, Chiapas. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- Celio, I. C., Santanatoglia, O. J., Castiglioni, M. G., Massobrio, M. J., Bujan, A. Yirurtia, C. 2008. Número de curva de escurrimiento para una microcuenca de pampa ondulada bajo labranza convencional y siembra directa. Argentina. CI Suelo, Vol. 26.
- CONAGUA. 2007. Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Primera reimpresión. México. D.F.
- CONAGUA y UACH. 2006a. Evaluación de los efectos del cambio de cobertura y de uso del suelo en la erosión hídrica y las relaciones precipitación-escurrimiento en las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, del estado de Chiapas. Informe Final. Ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- CONAGUA y UACH. 2006b. Delimitación de las zonas de alto riesgo de inundación con uso de modelos de simulación hidráulicos para la generación de una propuesta de acciones de protección en los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, ubicados en el estado de Chiapas. Informe Final. Edit. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- CONAGUA y UACH. 2008. Coordinación y seguimiento de la ejecución del proyecto denominado "Rehabilitación Hidrológico-Ambiental de las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, Chiapas". Informe Final. Edit. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.

- CONAGUA y UACH. 2010. Monitoreo de procesos hidrológicos en las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, Chiapas. Informe Final. Edit. Universidad Autónoma Capingo. Chapingo, Estado de México, México.
- CONAGUA y UACH. 2011. Monitoreo de procesos hidrológicos erosivos en las cuencas de los Ríos Huixtla, Huehuetán y Coatán, en la Costa de Chiapas. Informe Final. Edit. Universidad Autónoma Capingo. Chapingo, Estado de México, México.
- CONAGUA y UAQ. 2008. Monitoreo de procesos hidrológicos y erosión hídrica en las cuencas de los ríos Huixtla y Coatán de la costa de Chiapas; Informe Final. Editado por el Centro de Investigaciones del Agua de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, Querétaro, México.
- CONAGUA y UNACH. 2003. Monitoreo de erosión hídrica, manejo del agua y preservación de suelos en sitio representativos de la cuenca del río Huehuetán, Chiapas. Informe final. Editado por la Facultad de Ciencias Agrícola de la Universidad Autónoma de Chiapas. Huehuetán, Chiapas, México.
- Cordero González, H., 2008. Uso del modelo SWAT y la técnica de Álgebra de Mapas para estimar la erosión de la Cuenca de Río Huixtla, Chiapas. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- Cortés-Torres, H. G. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. México.
- Cuevas Portilla, J. 2009. Vivir el desastre. Análisis de la vulnerabilidad frente a inundaciones. El caso de una comunidad de pescadores en Chiapas. En: Vera, Cortés Gabriela (Coord.). Devastación y éxodo. Memoria de seminarios sobre reubicaciones por desastres en México. CIESAS. SEDESOL. CONACYT. Pp. 215-227.
- Chávez Morales, J. 2006. Apuntes de Hidrología Superficial (En edición), Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Chow V., T. 1982. Hidráulica de los canales abiertos. 2ª. Impresión. Ed. Diana. México.
- Chow V., T., D.R, Maidment, y L. W. Mays.1994. Hidrología Aplicada. Primera edición. Ed. McGraw-Hill. Bogotá, Colombia.

- Chuvieco, E. 1990. Fundamentos de Teledetección. Primera edición. Ediciones Rialp, S. A. Madrid, España.
- Dal-Ré Tenreiro, R. 2003. Pequeños embalses de uso agrícola. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 385 pp.
- Diario Oficial de la Federación. 2012. Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua- que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. México, D.F.
- Eastman, J. R. 2006. Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes. Clark Labs of Clark University. Worcester, Massachusetts, USA. Traducido por Centro de Relevamiento y Evaluación de Recursos Agrícolas y Naturales (CREAN). Córdoba, Argentina.
- Escalante Sandoval, C.A. y Reyes Chávez L. 2005. Técnicas Estadísticas en Hidrología, División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodésica. Departamento de Ingeniería Hidráulica, UNAM. Segunda edición, México UNAM. Facultad de Ingeniería.
- Figueroa S., B.; Amante O.; Cortés T.; Pimentel L.; Osuna C.; Rodríguez O. y Morales F. 1991. Manual de predicción de pérdidas de suelo por erosión. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. México.
- Foster, G. R. and Meyer, L. D. 1977. Soil erosion and sedimentation by water. An overview. In: Proceedings of the National Symposium on Soil Erosion and Sedimentation by Water. ASAE Publication No. 4-77. Chicago, Illinois, USA.
- Franquet Bernis, J. M. 2009. El caudal mínimo medioambiental del tramo Inferior del Río Ebro. Primera edición. Universidad Nacional de Educación a Distancia; Centro Asociado de Tortosa. Tortosa, España.
- Fuentes, Ruíz Carlos. 1997. Caracterización mínima del suelo con fines de riego. En CONAGUA-IMTA. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Jiutepec, Morelos, México.
- Galicia Rosales, H. 2010. Caracterización fisiográfica de los aprovechamientos y usos del agua de la Microcuenca del Río Ixtapan del Oro, Estado de México. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.

- Hawkins, Richard H. 1993. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. Vol. 119. Núm. 2. Pp. 334-345.
- Hawkins, Richard H. 1998. Runoff curve Number method: Examination of the initial abstraction ratio. University of Arizona. USDA- NRCS. 12.Pp.
- Helbig, Carlos. 1964. El Soconusco y su zona cafetalera en Chiapas. Instituto de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.
- INEGI. 2002. Anuario estadístico de Chiapas. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. Aguascalientes, Ags., México. 594 pp.
- IDRISI. s/f. Ejercicios de Aprendizaje de IDRISI, Versión 2.0. Escuela de Post-Grado en Geografía, de la Universidad de Clark, en Worcester, Massachusetts, EE.UU
- Jensen, J. R. 2000. Remote of the Environment an earth Resource Perspective. Ed. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey, E.U.
- Juárez Méndez, J. 2007. Evaluación de los efectos del cambio de uso del suelo en la relación precipitación-escurrimiento de la cuenca del Río Huehuetán, Chiapas. Tesos de Maestro en Ciencias en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- Lillesand, T. M.; Kiefer, R. W. and Chipman, J. W. 2004. Remote Sensing and Image Interpretation, Fifth edition. John Wiley and Sons, Inc. USA.
- Linsley, Ray C.; Kohler, Max A. y Paulus, Joseph L. H. 1977. Hidrología para Ingenieros. Traducido de la primera edición en inglés. McGraw Hill de México S. A. de C. V. México, D.F.
- Lobell, D. B.; Asier, G. P.; Ortiz Monasterio J. I.; Benning, T. L. 2002. Remote Sensing of regional crop production in the Yaqui Valley, Mexico: estimates and uncertainties.
- López Hernández, I. T. 2012. Utilización del modelo hidrológico semidistribuido HEC-HMS para simular el proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso de suelo, considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del Río Huixtla, Chiapas. Tesis Doctoral. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos. México.

- López López, C. 2001. Diagnóstico sobre el manejo del agua en la cuenca del Río Laja y su impacto económico en el distrito de riego 085, la Begoña, Guanajuato México. Tesis de Maestría en Ciencias, Especialidad de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- López Martínez, J.; Reynoso Santos, R. y; Arellano Monterrosas, J. L. 2011. Restauración ecológica de áreas degradadas del bosque de café en la Cuenca del Río Huehuetán, Chiapas. Book of Abstracts. 4th World Conference on Ecological Restoration. Society for Ecological Restoration. 21-25 de agosto. Mérida, Yucatán.
- McCuen Richard, H. 2005. Hydrologic Analysis and Design. Third edition. Department of Civil and Environmental Engineering University of Maryland. Ed. Pearson Prentice-Hall. Washington, D.C. USA.
- Ministerio de Medio Ambiente. 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Ingeniería Medioambiental. Universidad politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Mishra, S.K.; M.K. Jain; P.K. Bhunya; and V.P. Singh. 2005. Field Applicability of the SCS-CN Based Mishra-Singh General Model and its Variants. Water Resources Management 19: 37-62.
- Montaldo, Nicola; Mancini, Marco and Rosso, Renzo. 2004. Flood hydrograph attenuation induced by a reservoir system: analysis with a distributed rainfall-runoff model. Hydrological Processes. Núm. 18. Pp. 545-563.
- Morgan, R. P. 1997. Erosión y Conservación del Suelo. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid España. 343 p.
- Mülleried, Federico K. G. 1982. Geología de Chiapas. Colección Libros de Chiapas, Serie Básica. Gobierno del estado de Chiapas. Segunda edición. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. 180 Pp.
- Muzik, I. 1993. Applicability of the modified SCS prediction method to small catchments in Thailand. In: Hydrology of warm humid regions (Proceedings of the Yokohama Symposium). July 1993. IAHS. Publ. Núm. 216. Pp. 195-201.
- Neitsch, S.L.; Arnold, J.G.; Kiniry, J.R.; Williams, J.R. 2001. Soil and Water Assessment Tool User's Manual; Versión 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory of Agricultural Research Service and Blackland Research Center at Texas Agricultural Experiment Station. Temple, Texas. USA.

- Negrete C., E.1980. Relaciones Precipitación Esgurrimiento. Boletín técnico núm. 19. Chapingo, Estado de México, México.
- Ogrosky, O. Harold and Mockus, Victor. 1964. Hydrology of Agricultural Lands. In: Chow, Ven Te. (editor). Handbook of Applied Hydrology. A Compendium of Water-resources Technology. McGraw-Hill Book Co. USA. pp. 21-1 a 21-97.
- Ortiz Villanueva, B. 1982. Estudio Experimental sobre la Conservación del Suelo, la Erosión y el Esgurrimiento. Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México.
- Paz Pellat, F. 2009. Mitos y Falacias del Método Hidrológico del Número de Curva del SCS/NRCS. *Agrociencia*, 43(5): 521-528.
- Pérez Nieto, S. 1995. Topografía. Primera edición. Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- Pérez Nieto, S. y Hernández Saucedo, F. R. 2001. Topografía Aplicada. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. Apuntes de Clase.
- Pérez-Nieto, S.; Ibáñez-Castillo L. A.; Hernández Saucedo, F. R. y; Arellano-Monterrosas, J. L. 2007. Tasa de erosión en la Costa de Chiapas estimada por álgebra de mapas. Ponencia presentada en el XIV Congreso Nacional de Irrigación. ANEI, A. C. 2 al 5 de octubre de 2007. Morelia, Michoacán
- Pérez-Nieto, S.; Hernández-Saucedo, F. R.; Ibáñez-Castillo, L. A.; y Arellano-Monterrosas, J. L. 2008. Evaluación de la erosión hídrica ocasionada por el huracán Stan en la Costa de Chiapas, México. Memorias del 11° Congreso Internacional sobre Gestión y Tratamiento Integral del Agua. Córdoba, Argentina.
- Pérez Nieto, S.; Arellano Monterrosas, J. L. L.; Ibáñez Castillo, L. A. y Hernández Saucedo, F. R. 2012. Estimación de la erosión hídrica provocada por el huracán Atan en las cuencas costeras de Chiapas, México. *Revista TERRA LATINOAMERICANA*; núm. 2, vol.: 30, trimestre abril-junio. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Montecillo, México. pp: 103-110
- Ponce, V. M. 1996. Notes of my conversation with Vic Mockus, en entrevista con Víctor Miguel Ponce. San Diego, California. http://hitos.sdsu.edu/mockus_conversacion.html.
- Ponce, V. M. and R.H. Hawkins. 1996. Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *J. Hydrologic Engineering* (1) 11-19. ASCE

- Porta Casanellas, J.; López-Acevedo Reguerín, M; y Roquero de la Laburu, C. 1999. Edafología para la Agricultura y el Medio Ambiente. Segunda edición. Ediciones Mundiprensa. Madrid, España.
- Rivera Toral, F. 2007. Cambio del uso del suelo y su efecto sobre los escurrimientos de la Cuenca del Río Coatán, Chiapas. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México.
- Rivera Toral, F. 2010. Aplicabilidad del Modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las Cuencas de México. Tesis de Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México, México.
- Rivera Toral, F.; Pérez Nieto, S.; Ibáñez Castillo, L. A.; y Hernández Saucedo, F. R.; 2012. Aplicabilidad del modelo SWAT para la estimación de la erosión hídrica en las Cuencas de México. Publicado en el núm. 46 de la Revista Agrociencia del Colegio de Postgraduados. Montecillos, Estado de México, México. Pp 101-105.
- Roblero Méndez, E. 2007. Variación del factor topográfico en la estimación de la erosión hídrica en la Cuenca del Río Coatán, Chiapas. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México.
- Romo González, J. R. y Arteaga Ramírez, R. 1989. Meteorología Agrícola. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México, México.
- Rodríguez Hernández, J. W. 2007. Efecto del factor R de la EUPS en la estimación de la Erosión hídrica en la cuenca del Río Huehuetán, Chiapas. Tesis Profesional. Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México.
- Ruiz Meza, L. E. 2004. Gestión Integrada de Recursos Hídricos con Equidad de Género. Memorias del 3er. Seminario sobre Manejo y Conservación del Suelos y Agua en Chiapas.- Manejo Integral de Cuencas. Consejo Ciudadano del Agua en Chiapas, A.C. Tuxtla, Gutiérrez, Chiapas, México.
- Schowengerdt, R. A.1997. Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing. Second edition, Academic Press Limited. San Diego, California. USA.
- SEMARNAT. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000 Conservación de recurso agua, que establece las especificaciones y el Método para determinar la

disponibilidad anual de las Aguas Nacionales. Diario Oficial de la Federación. México, D.F.

SEMARNAT. 2005. Ecología y Medio Ambiente: Una Responsabilidad Compartida. Fondo de Cultura Económica. Primera edición. México, D.F.

Soria Ruiz, J. 1999. Determinación de sitios de ocurrencia y estimación de rendimientos de maíz (*zea mays* L.) a través de sensores remotos. Tesis de Doctorado. Instituto de Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados. Montecillo, Estado de México. 135 p.

Soria Ruíz, J.; Ortiz Solorio, C. A.; Islas Gutiérrez, F. y Volke Haller, V. 1998. Sensores Remotos, Principios y Aplicaciones en la Evaluación de los Recursos Naturales, Experiencias en México. Primera edición, Publicación especial 7. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (S.M.C.S.). Chapingo, México. 93 p.

Sotelo, A. G. 2002. Hidráulica de canales. México, UNAM, Facultad de Ingeniería, 836 p.

Springall Galindo, R. 1970. Hidrología. Primera parte. Instituto de Ingeniería. No. D-7. UNAM. México. D. F.

Springall Galindo R. 1986. Apuntes de Hidrología Superficial. Análisis Estadístico y Probabilístico de Datos Hidrológicos. Facultad de Ingeniería. UNAM. México, D. F.

SRH. 1970. Boletín Hidrológico Número 23 (Costa de Chiapas). Secretaría de Recursos Hidráulicos. Jefatura de Irrigación y Control de Ríos. México, D. F.

Suárez, Díaz J. 2001. Control de Erosión en Zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Bucaramanga, Columbia.

Todini, E. 1988. Rainfall-Runoff Modeling- Past, Present and Future. J. of Hydrology 100: 341-352.

Terzoudi, Chr. B.; Gemtos, T.A.; Danalatos, N.G. y Argyrokastritis, I. 2007. Applicability of an empirical runoff estimation method in central Greece. Soil & Tillage Research. Pp198–212

U.S. Army Corps of Engineers. 2000. Hydrologic Modeling System, HEC-HMS. Technical Reference Manual. Washington, D.C.

U.S. Army Corps of Engineers. 2010. Hydrologic Modeling System, HEC-GeoHMS, Geospatial Hydrologic Modeling Extension, User's Manual, Version 5.0. Washington, D.C

Verbyla D. L. y Kang-tsung, K. C. 1997. Processing Digital Images in Geographic Information Systems. Library of Congress Cataloging-in-Publication Data. Santa Fe, Nuevo México. USA.

Villanueva Manso, J. 2008. Microcuencas. Primea reimpresión de la primera edición. Departamento de Publicaciones de la Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Estado de México. México.

Wischmeier, W. H.; Smith, D. D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. Agriculture Handbook 537. United States Department of Agriculture. Science and Education Administration. 58 pp.

Yébenes Gómez, A. y Giner Sotos, A. 2012. Clasificación digital de imágenes. Sistemas de Telemedida. Madrid, España.

<http://landsat.gsfc.nasa.gov/>

ANEXO 1

DATOS DE CAMPO Y RESULTANTES DEL ANÁLISIS PARA LAS NANOCUENCAS DE ESTUDIO

Cuadro A.1. Valores calculados del gasto, volumen, lámina escurrida y lámina precipitada para la Nanocuenca Finca Brasil

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
NÚM. DE EVENTO	FECHA	$Q_{máx}$	H_i	H_t	T_p	T_r	T_t	V_e	L_e	L_p
	(dd.mm.aa)	(L/s)	(h:min)	(h:min)	(min)	(min)	(min)	(m ³)	(mm)	(mm)
1	08.09.10	0.97	13:50	14:38	24	24	48	1.24	0.10	42.10
2	09.09.10	13.72	02:44	15:20	18	738	756	43.93	3.57	58.60
3	15.09.10	10.99	12:40	22:04	18	546	564	21.00	1.71	52.30
4	17.09.10	0.15	16:28	21:40	150	162	312	1.13	0.09	32.60
	Promedio	6.46			52.5	367.5	420.0	16.83	1.37	46.40
	Máximo	13.72			150.0	738.0	756.0	43.93	3.57	58.60
	Mínimo	0.15			18.0	24.0	48.0	1.13	0.09	32.60

Cuadro A.2. Valores calculados del gasto, volumen, lámina escurrida y lámina precipitada para la Nanocuenca Finca Hannover

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
NÚM. DE EVENTO	FECHA	$Q_{máx}$	H_i	H_t	T_p	T_r	T_t	V_e	L_e	L_p
	(dd.mm.aa)	(L/s)	(h:min)	(h:min)	(min)	(min)	(min)	(m ³)	(mm)	(mm)
1	01.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	7.20
2	02.08.11	25.51	13:55	16:10	0	0	135	42.70	3.86	75.70
3	03.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	0.30
4	04.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	4.00
5	05.08.11	1.53	14:10	14:34	6	18	24	1.10	0.10	29.90
6	06.08.11	11.86	17:40	18:40	15	45	60	12.32	1.11	50.30
7	07.08.11	0.70	14:44	16:50	6	120	126	0.72	0.07	17.80
8	08.08.11	7.81	17:20	19:35	54	81	135	6.78	0.61	37.10
9	10.08.11	24.14	18:40	19:55	21	54	75	33.28	3.01	53.80
10	13.08.11	6.43	15:15	15:36	9	12	21	4.05	0.37	24.20
11	14.08.11	9.32	17:15	21:30	15	240	255	18.55	1.68	63.90
12	15.08.11	0.32	22:39	22:54	6	9	15	0.14	0.01	9.80
13	16.08.11	14.73	13:39	14:00	6	15	21	9.28	0.84	30.90
14	17.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	10.40
15	18.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	0.30
16	19.08.11	0.18	16:30	16:51	6	15	21	0.11	0.01	10.10
17	20.08.11	5.18	16:54	18:15	21	60	81	7.92	0.72	33.70
18	21.08.11	2.24	16:30	17:00	6	24	30	2.02	0.18	13.60
19	22.08.11	10.98	16:45	18:00	30	45	75	20.20	1.83	63.40
20	23.08.11	53.48	17:15	17:15	45	60	105	86.87	7.85	78.90
21	24.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	4.40
22	25.08.11	24.14	17:39	23:00	36	285	321	71.61	6.47	116.90
23	26.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	45.20
24	27.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	9.80
25	28.08.11	33.10	18:00	22:00	84	156	240	62.03	5.60	57.50
26	29.08.11	53.48	15:30	15:30	45	15	60	61.00	5.51	30.10
27	30.08.11	19.10	15:36	19:55	36	234	270	55.56	5.02	73.10
28	31.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	62.30
29	01.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0		0.00	0.00	6.20
30	02.09.11	0.32	21:30	22:30	45	15	60	0.41	0.04	24.60
31	03.09.11	7.10	16:35	18:29	81	33	114	10.23	0.92	32.00
32	04.09.11	13.73	14:45	15:36	6	45	51	18.66	1.69	32.60

33	05.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	0.70
34	05.09.11	38.08	15:54	19:30	6	210	216	128.25	11.59	138.50
35	06.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	10.60
36	07.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	2.10
37	09.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	14.20
38	10.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	10.20
39	11.09.11	4.07	19:04	20:25	6	75	81	2.96	0.27	38.20
40	12.09.11	42.10	14:25	17:10	15	165	180	55.17	4.99	49.20
41	12.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	0.20
42	13.09.11	15.76	15:39	20:21	120	162	282	27.95	2.53	78.60
43	14.09.11	12.78	16:15	18:45	45	105	150	25.44	2.30	36.30
44	15.09.11	25.51	16:00	18:30	57	93	150	53.04	4.79	82.60
45	16.09.11	5.79	19:15	19:45	9	21	30	5.21	0.47	10.80
46	17.09.11	42.10	15:15	18:36	15	186	201	48.59	4.39	39.10
47	18.09.11	31.48	14:30	18:54	30	234	264	81.95	7.40	71.60
48	19.09.11	26.93	14:45	20:30	15	330	345	58.29	5.27	98.60
49	20.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	8.20
50	21.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	0.20
51	23.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	8.60
52	24.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	9.00
53	25.09.11	2.24	16:30	19:24	6	168	174	3.02	0.27	39.70
54	26.09.11	9.32	19:15	19:15	30	30	60	14.53	1.31	32.20
55	27.09.11	2.65	17:45	19:45	90	30	120	5.84	0.53	26.10
56	28.09.11	1.87	16:03	16:03	12	30	42	2.36	0.21	18.90
57	29.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	4.10
58	30.09.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	13.70
59	01.10.11	0.00	00:00	00:00	0	0		0.00	0.00	2.10
60	03.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	1.60
61	04.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	8.50
62	04.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	16.00
63	05.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	18.80
64	06.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	27.60
65	07.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	8.30
66	08.10.11	31.48	19:30	22:30	15	165	180	52.40	4.73	64.10
67	09.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	6.40
68	10.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.60
69	10.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.30
70	11.10.11	0.49	05:09	07:45	6	150	156	0.88	0.08	74.10

71	14.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.60
72	14.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.70
73	15.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	6.00
74	16.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	13.70
75	17.10.11	0.18	17:15	19:30	15	120	135	0.71	0.06	25.40
76	18.10.11	7.10	21:50	09:50	69	36	105	15.04	1.36	5.30
77	19.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	1.10
78	20.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	0.30
79	21.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	2.00
80	22.10.11	0.00	0.00	0.00	0	0	0	0.00	0.00	17.20
81	23.10.11	33.10	21:50	09:50	12	399	411	47.26	4.27	63.40
82	25.10.11	0.70	21:50	09:50	24	141	165	2.43	0.22	47.50
83	31.10.11	0.00	16:30	18:00	0	0	0	0.00	0.00	12.20
	Promedio	7.94			14.17	53.39	70.89	13.94	1.26	28.63
	Máximo	53.48			120.00	399.00	411.00	128.25	11.59	138.50
	Mínimo	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20

Cuadro A.3. Valores calculados del gasto, volumen, lámina escurrida y lámina precipitada para la Nanocuenca Berriozábal

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
NÚM. DE EVENTO	FECHA	$Q_{m\acute{a}x}$	H_i	H_t	T_p	T_r	T_t	V_e	L_e	L_p
	(dd.mm.aa)	(L/s)	(h:min)	(h:min)	(min)	(min)	(min)	(m ³)	(mm)	(mm)
1	01.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	20.20
2	02.08.11	1.53	17:34	18:10	21	15	45	1.35	0.08	34.00
3	03.08.11	0.18	18:00	18:45	6	39	78	0.24	0.01	3.90
4	04.08.11	15.76	18:06	19:24	0	0	288	18.34	1.10	21.60
5	07.08.11	12.78	14:42	19:30	48	240	150	30.47	1.82	37.50
6	08.08.11	5.18	16:30	18:00	105	45	150	12.96	0.78	17.30
7	10.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	2.00
8	12.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	5.60
9	13.08.11	0.18	20:25	23:49	189	15	204	0.38	0.02	10.10
10	14.08.11	4.61	20:40	21:34	15	39	54	7.47	0.45	12.00
11	15.08.11	0.07	15:15	15:45	15	15	30	0.06	0.00	2.70
12	15.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	6.70
13	16.08.11	25.51	16:00	17:30	30	60	90	35.38	2.12	17.80
14	17.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	0.60
15	18.08.11	9.32	13:45	18:30	60	225	285	26.83	1.61	28.00
16	20.08.11	11.86	16:30	18:30	36	84	120	16.64	1.00	22.40
17	21.08.11	0.70	15:24	16:54	21	69	90	1.48	0.09	9.10
18	22.08.11	45.50	18:00	23:30	90	240	330	118.74	7.11	49.20
19	23.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	5.00
20	24.08.11	1.22	16:30	03:04	75	559	634	7.16	0.43	20.30
21	25.08.11	12.78	19:45	22:24	117	42	159	34.44	2.06	20.70
22	26.08.11	12.78	14:40	20:55	6	369	375	19.51	1.17	21.80
23	27.08.11	0.49	20:34	20:34	21	15	36	0.64	0.04	5.70
24	28.08.11	28.40	18:35	21:50	60	135	195	57.76	3.46	27.60
25	29.08.11	1.53	14:50	17:44	126	48	174	5.00	0.30	13.70
26	30.08.11	0.00	00:00	00:00	0	0	0	0.00	0.00	8.40
27	31.08.11	4.07	18:00	19:45	24	81	105	8.98	0.54	19.80
	Media	7.20			39.44	86.48	133.04	14.96	0.90	16.43
	Máxima	45.50			189.00	559.00	634.00	118.74	7.11	49.20
	Mínima	0.00			0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60

Cuadro A.4. Valores calculados del número de curva a partir de datos de campo para la Nanocuenca Finca Brasil

(1)	(10)	(11)	(13)	(14)
NÚM. DE EVENTO	<i>Le</i>	<i>Lp</i>	<i>Sr</i>	<i>Nc</i>
	(mm)	(mm)	(adim)	(adim)
1	0.10	42.10	188.45	57.4
2	3.57	58.60	163.07	60.9
3	1.71	52.30	171.55	59.7
4	0.09	32.60	144.55	63.7
Promedios	1.37	46.40	166.907	60.4
Máximo	3.57	58.60	188.453	63.7
Mínimo	0.09	32.60	144.548	57.4

Cuadro A.5. Valores calculados del número de curva a partir de datos de campo para la Nanocuenca Hannover

(1)	(10)	(11)	(13)	(14)
NÚM. DE EVENTO	<i>Le</i>	<i>Lp</i>	<i>Sr</i>	<i>Nc</i>
	(mm)	(mm)	(adim)	(adim)
1	0.00	7.20	36.00	87.6
2	3.86	75.70	222.15	53.3
3	0.00	0.30	1.50	99.4
4	0.00	4.00	20.00	92.7
5	0.10	29.90	131.19	65.9
6	1.11	50.30	178.23	58.8
7	0.07	17.80	77.60	76.6
8	0.61	37.10	137.97	64.8
9	3.01	53.80	153.72	62.3
10	0.37	24.20	91.19	73.6
11	1.68	63.90	219.35	53.7
12	0.01	9.80	45.19	84.9
13	0.84	30.90	105.36	70.7
14	0.00	10.40	52.00	83.0
15	0.00	0.30	1.50	99.4
16	0.01	10.10	47.06	84.4
17	0.72	33.70	120.29	67.9
18	0.18	13.60	52.12	83.0
19	1.83	63.40	213.60	54.3
20	7.85	78.90	183.90	58.0
21	0.00	4.40	22.00	92.0
22	6.47	116.90	334.98	43.1
23	0.00	45.20	226.00	52.9
24	0.00	9.80	49.00	83.8
25	5.60	57.50	135.16	65.3
26	5.51	30.10	51.42	83.2
27	5.02	73.10	195.72	56.5
28	0.00	62.30	311.50	44.9
29	0.00	6.20	31.00	89.1
30	0.04	24.60	112.69	69.3
31	0.92	32.00	107.74	70.2
32	1.69	32.60	95.27	72.7

33	0.00	0.70	3.50	98.6
34	11.59	138.50	345.72	42.4
35	0.00	10.60	53.00	82.7
36	0.00	2.10	10.50	96.0
37	0.00	14.20	71.00	78.2
38	0.00	10.20	51.00	83.3
39	0.27	38.20	157.84	61.7
40	4.99	49.20	113.80	69.1
41	0.00	0.20	1.00	99.6
42	2.53	78.60	258.72	49.5
43	2.30	36.30	99.80	71.8
44	4.79	82.60	233.37	52.1
45	0.47	10.80	33.06	88.5
46	4.39	39.10	86.48	74.6
47	7.40	71.60	164.17	60.7
48	5.27	98.60	285.50	47.1
49	0.00	8.20	41.00	86.1
50	0.00	0.20	1.00	99.6
51	0.00	8.60	43.00	85.5
52	0.00	9.00	45.00	84.9
53	0.27	39.70	164.33	60.7
54	1.31	32.20	100.26	71.7
55	0.53	26.10	93.95	73.0
56	0.21	18.90	74.09	77.4
57	0.00	4.10	20.50	92.5
58	0.00	13.70	68.50	78.8
59	0.00	2.10	10.50	96.0
60	0.00	1.60	8.00	96.9
61	0.00	8.50	42.50	85.7
62	0.00	16.00	80.00	76.0
63	0.00	18.80	94.00	73.0
64	0.00	27.60	138.00	64.8
65	0.00	8.30	41.50	86.0
66	4.73	64.10	167.40	60.3
67	0.00	6.40	32.00	88.8
68	0.00	0.60	3.00	98.8
69	0.00	0.30	1.50	99.4
70	0.08	74.10	344.14	42.5

71	0.00	0.60	3.00	98.8
72	0.00	0.70	3.50	98.6
73	0.00	6.00	30.00	89.4
74	0.00	13.70	68.50	78.8
75	0.06	25.40	113.36	69.1
76	1.36	5.30	7.15	97.3
77	0.00	1.10	5.50	97.9
78	0.00	0.30	1.50	99.4
79	0.00	2.00	10.00	96.2
80	0.00	17.20	86.00	74.7
81	4.27	63.40	170.85	59.8
82	0.22	47.50	203.52	55.5
83	0.00	12.20	61.00	80.6
Promedios	1.26	28.63	97.70	76.2
Máximo	11.59	138.50	345.72	99.6
Mínimo	0.00	0.20	1.00	42.4

Cuadro A.6. Valores calculados del número de curva a partir de datos de campo para la Nanocuenca Berriozánbal

(1)	(10)	(11)	(13)	(14)
NÚM. DE EVENTO	<i>Le</i>	<i>Lp</i>	<i>Sr</i>	<i>Nc</i>
	(mm)	(mm)	(adim)	(adim)
1	0.00	20.20	101.00	71.5
2	0.08	34.00	152.26	62.5
3	0.01	3.90	16.99	93.7
4	1.10	21.60	63.44	80.0
5	1.82	37.50	111.49	69.5
6	0.78	17.30	52.57	82.9
7	0.00	2.00	10.00	96.2
8	0.00	5.60	28.00	90.1
9	0.02	10.10	45.36	84.8
10	0.45	12.00	38.19	86.9
11	0.00	2.70	12.43	95.3
12	0.00	6.70	33.50	88.3
13	2.12	17.80	38.34	86.9
14	0.00	0.60	3.00	98.8
15	1.61	28.00	79.38	76.2
16	1.00	22.40	68.22	78.8
17	0.09	9.10	36.31	87.5
18	7.11	49.20	96.25	72.5
19	0.00	5.00	25.00	91.0
20	0.43	20.30	72.53	77.8
21	2.06	20.70	48.22	84.0
22	1.17	21.80	63.07	80.1
23	0.04	5.70	23.64	91.5
24	3.46	27.60	58.01	81.4
25	0.30	13.70	48.66	83.9
26	0.00	8.40	42.00	85.8
27	0.54	19.80	67.51	79.0
	0.90	16.43	53.16	83.6
	7.11	49.20	152.26	98.8
	0.00	0.60	3.00	62.5

Cuadro A.7. Cálculo de la corrección del N_c por la condición de humedad antecedente para la Nanocuenca Finca Brasil

(1)	(2)	(11)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
NÚM. DE EVENTO	FECHA	L_p	N_c	T_a	HA_5	N_{c2}	N_{c1} o N_{c3}			
								SCS	Chow	Dal-Ré
	(dd.mm.aa)	mm)	adim)	día)	(mm)	adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)
1	08.09.10	42.1	57.4	0	42.1	70.0	$N_{c1} =$	51.2	49.5	50.6
2	09.09.10	58.6	60.9	1	100.7	70.0	$N_{c3} =$	85.7	84.3	84.5
3	15.09.10	52.3	59.7	6	52.3	70.0	$N_{c3} =$	85.7	84.3	84.5
4	17.09.10	32.6	63.7	2	50.0	70.0	$N_{c3} =$	85.7	84.3	84.5
	Media	46.4	60.4	2.25	61.28	70.0		77.0	75.6	76.0
	Máximo	58.6	63.7	6.00	100.70	70.0		85.7	84.3	84.5
	Mínimo	32.6	57.4	0.00	42.10	70.0		51.2	49.5	50.6

Cuadro A.8. Cálculo de la corrección del N_c por la condición de humedad antecedente para la Nanocuenca Hannover

(1)	(2)	(11)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
NÚM. DE EVENTO	FECHA (dd.mm.aa)	L_p (mm)	N_c (adim)	T_a (día)	HA_5 (mm)	N_{c_2} (adim)	N_{c_1} o N_{c_3}			
							SCS_3 (adim)	SCS (adim)	Chow (adim)	Dal-Ré (adim)
1	01.08.11	7.20	87.6	0.0	0.0	63.0	$N_{c_1} =$	43.6	41.7	42.7
2	02.08.11	75.70	53.3	1.0	7.2	63.0	$N_{c_1} =$	43.6	41.7	42.7
3	03.08.11	0.30	99.4	1.0	82.9	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
4	04.08.11	4.00	92.7	1.0	83.2	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
5	05.08.11	29.90	65.9	1.0	87.2	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
6	06.08.11	50.30	58.8	1.0	117.1	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
7	07.08.11	17.80	76.6	1.0	160.2	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
8	08.08.11	37.10	64.8	1.0	102.3	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
9	10.08.11	53.80	62.3	1.0	139.1	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
10	13.08.11	24.20	73.6	3.0	90.9	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
11	14.08.11	63.90	53.7	1.0	78.0	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
12	15.08.11	9.80	84.9	1.0	88.1	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
13	16.08.11	30.90	70.7	1.0	97.9	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
14	17.08.11	10.40	83.0	1.0	128.8	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
15	18.08.11	0.30	99.4	1.0	115.0	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
16	19.08.11	10.10	84.4	1.0	115.3	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
17	20.08.11	33.70	67.9	1.0	61.5	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
18	21.08.11	13.60	83.0	1.0	85.4	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
19	22.08.11	63.40	54.3	1.0	68.1	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
20	23.08.11	78.90	58.0	1.0	121.1	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
21	24.08.11	4.40	92.0	0.5	199.7	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
22	25.08.11	116.90	43.1	0.5	194.0	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
23	26.08.11	45.20	52.9	1.0	277.2	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
24	27.08.11	9.80	83.8	1.0	322.4	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
25	28.08.11	57.50	65.3	1.0	233.8	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
26	29.08.11	30.10	83.2	1.0	233.8	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
27	30.08.11	73.10	56.5	1.0	259.5	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0
28	31.08.11	62.30	44.9	1.0	215.7	63.0	$N_{c_3} =$	80.8	79.7	80.0

29	01.09.11	6.20	89.1	1.0	232.8	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
30	02.09.11	24.60	69.3	1.0	229.2	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
31	03.09.11	32.00	70.2	1.0	196.3	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
32	04.09.11	32.60	72.7	1.0	198.2	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
33	05.09.11	0.70	98.6	0.5	157.7	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
34	05.09.11	138.50	42.4	0.5	158.4	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
35	06.09.11	10.60	82.7	1.0	234.6	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
36	07.09.11	2.10	96.0	1.0	184.5	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
37	09.09.11	14.20	78.2	2.0	184.5	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
38	10.09.11	10.20	83.3	1.0	166.1	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
39	11.09.11	38.20	61.7	1.0	37.1	63.0	Nc ₇ =	43.6	41.7	42.7
40	12.09.11	49.20	69.1	0.5	64.7	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
41	12.09.11	0.20	99.6	0.5	113.9	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
42	13.09.11	78.60	49.5	1.0	112.0	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
43	14.09.11	36.30	71.8	1.0	190.6	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
44	15.09.11	82.60	52.1	1.0	212.7	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
45	16.09.11	10.80	88.5	1.0	285.1	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
46	17.09.11	39.10	74.6	1.0	257.7	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
47	18.09.11	71.60	60.7	1.0	247.4	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
48	19.09.11	98.60	47.1	2.0	240.4	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
49	20.09.11	8.20	86.1	1.0	302.7	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
50	21.09.11	0.20	99.6	1.0	228.3	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
51	23.09.11	8.60	85.5	2.0	178.6	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
52	24.09.11	9.00	84.9	1.0	115.6	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
53	25.09.11	39.70	60.7	1.0	26.0	63.0	Nc ₇ =	43.6	41.7	42.7
54	26.09.11	32.20	71.7	1.0	57.5	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
55	27.09.11	26.10	73.0	1.0	89.5	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
56	28.09.11	18.90	77.4	1.0	115.6	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
57	29.09.11	4.10	92.5	1.0	125.9	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
58	30.09.11	13.70	78.8	1.0	121.0	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
59	01.10.11	2.10	96.0	1.0	95.0	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
60	03.10.11	1.60	96.9	2.0	38.8	63.0	Nc ₇ =	43.6	41.7	42.7
61	04.10.11	8.50	85.7	0.5	21.5	63.0	Nc ₇ =	43.6	41.7	42.7

62	04.10.11	16.00	76.0	0.5	30.0	63.0	Nc ₁ =	43.6	41.7	42.7
63	05.10.11	18.80	73.0	1.0	41.9	63.0	Nc ₁ =	43.6	41.7	42.7
64	06.10.11	27.60	64.8	1.0	47.0	63.0	Nc ₁ =	43.6	41.7	42.7
65	07.10.11	8.30	86.0	1.0	72.5	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
66	08.10.11	64.10	60.3	1.0	80.8	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
67	09.10.11	6.40	88.8	1.0	143.3	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
68	10.10.11	0.60	98.8	0.5	125.8	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
69	10.10.11	0.30	99.4	0.5	125.8	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
70	11.10.11	74.10	42.5	1.0	126.1	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
71	14.10.11	0.60	98.8	2.5	81.4	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
72	14.10.11	0.70	98.6	0.5	82.0	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
73	15.10.11	6.00	89.4	1.0	76.3	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
74	16.10.11	13.70	78.8	1.0	81.4	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
75	17.10.11	25.40	69.1	1.0	21.0	63.0	Nc ₁ =	43.6	41.7	42.7
76	18.10.11	5.30	97.3	1.0	46.4	63.0	Nc ₁ =	43.6	41.7	42.7
77	19.10.11	1.10	97.9	1.0	51.7	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
78	20.10.11	0.30	99.4	1.0	51.5	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
79	21.10.11	2.00	96.2	1.0	45.8	63.0	Nc ₁ =	43.6	41.7	42.7
80	22.10.11	17.20	74.7	1.0	34.1	63.0	Nc ₁ =	43.6	41.7	42.7
81	23.10.11	63.40	59.8	1.0	25.9	63.0	Nc ₁ =	43.6	41.7	42.7
82	25.10.11	47.50	55.5	2.0	82.9	63.0	Nc ₃ =	80.8	79.7	80.0
83	31.10.11	12.20	80.6	6.0	0.0	63.0	Nc ₁ =	43.6	41.7	42.7
	Media	28.63	76.2	1.1	126.0	63.0		74.1	72.8	73.2
	Máximo	138.50	99.6	6.0	322.4	63.0		80.8	79.7	80.0
	Mínimo	0.20	42.4	0.0	0.0	63.0		43.6	41.7	42.7

Cuadro A.9. Cálculo de la corrección del N_c por la condición de humedad antecedente para la Nanocuenca Berriozábal

(1)	(2)	(11)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
NÚM. DE EVENTO	FECHA	L_p	N_c	T_a	HA_5	N_{c2}	N_{c1} o N_{c3}			
							SCS_3	SCS	Chow	Dal-Ré
	(dd.mm.aa)	(mm)	(adim)	(día)	(mm)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	
1	01.08.11	20.20	71.5	0.0	0.0	71.4	$N_{c1} =$	52.7	51.2	52.3
2	02.08.11	34.00	62.5	1.0	20.2	71.4	$N_{c1} =$	52.7	51.2	52.3
3	03.08.11	3.90	93.7	1.0	54.2	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
4	04.08.11	21.60	80.0	1.0	58.1	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
5	07.08.11	37.50	69.5	3.0	59.5	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
6	08.08.11	17.30	82.9	1.0	63.0	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
7	10.08.11	2.00	96.2	2.0	54.8	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
8	12.08.11	5.60	90.1	2.0	19.3	71.4	$N_{c1} =$	52.7	51.2	52.3
9	13.08.11	10.10	84.8	1.0	24.9	71.4	$N_{c1} =$	52.7	51.2	52.3
10	14.08.11	12.00	86.9	1.0	17.7	71.4	$N_{c1} =$	52.7	51.2	52.3
11	15.08.11	2.70	95.3	0.5	29.7	71.4	$N_{c1} =$	52.7	51.2	52.3
12	15.08.11	6.70	88.3	0.5	32.4	71.4	$N_{c1} =$	52.7	51.2	52.3
13	16.08.11	17.80	86.9	1.0	37.1	71.4	$N_{c1} =$	52.7	51.2	52.3
14	17.08.11	0.60	98.8	1.0	54.9	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
15	18.08.11	28.00	76.2	1.0	49.9	71.4	$N_{c1} =$	52.7	51.2	52.3
16	20.08.11	22.40	78.8	2.0	55.8	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
17	21.08.11	9.10	87.5	1.0	68.8	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
18	22.08.11	49.20	72.5	1.0	60.1	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
19	23.08.11	5.00	91.0	1.0	109.3	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
20	24.08.11	20.30	77.8	1.0	85.7	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
21	25.08.11	20.70	84.0	1.0	106.0	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
22	26.08.11	21.80	80.1	1.0	104.3	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
23	27.08.11	5.70	91.5	1.0	117.0	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
24	28.08.11	27.60	81.4	1.0	73.5	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
25	29.08.11	13.70	83.9	1.0	96.1	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
26	30.08.11	8.40	85.8	1.0	89.5	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
27	31.08.11	19.80	79.0	1.0	77.2	71.4	$N_{c3} =$	86.6	85.2	85.4
	Media	16.43	83.6	1.1	60.0	71.4		75.3	73.8	74.3
	Máxima	49.20	98.8	3.0	117.0	71.4		86.6	85.2	85.4
	Mínima	0.60	62.5	0.0	0.0	71.4		52.7	51.2	52.3

Cuadro A.10. Valores de N_c corregidos por pendiente ($Sc = 41.24 \%$) y por humedad antecedente para la Nanocuenca Finca Brasil

(1)	(18)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)
NÚM. DE EVENTO	N_{C_1} o N_{C_3}	$N_{C_{2S}}$				$N_{C_{1S}}$ o $N_{C_{3S}}$			
		$N_{C_{2S3}}$	McCuen	Chow	Dal-ré	= $N_{C_{3S}}$	SCS	Chow	Dal-Ré
	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)
1	$N_{C_1=}$	75.2	63.8	63.2	63.6	74.0	44.4	41.9	43.3
2	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	75.2	74.7	74.8		88.9	87.2	87.4
3	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	75.2	74.7	74.8		88.9	87.2	87.4
4	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	75.2	74.7	74.8		88.9	87.2	87.4
	Media	75.2	72.3	71.9	72.0		77.7	75.9	76.4
	Máxima	75.2	75.2	74.7	74.8		88.9	87.2	87.4
	Mínima	75.2	63.8	63.2	63.6		44.4	41.9	43.3

Cuadro A.11. Valores de N_c corregidos por pendiente ($Sc = 23.76 \%$) y por humedad antecedente para la Nanocuenca Hannover

(1)	(18)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)
NÚM. DE EVENTO	N_{c1} o N_{c3}	N_{c2S}				N_{c1S} o N_{c3S}			
		N_{c2S3}	McCuen	Chow	Dal-ré	= N_{c3S}	SCS	Chow	Dal-Ré
	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)
1	$N_{c1}=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
2	$N_{c1}=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
3	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
4	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
5	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
6	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
7	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
8	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
9	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
10	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
11	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
12	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
13	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
14	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
15	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
16	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
17	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
18	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
19	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
20	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
21	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
22	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
23	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
24	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
25	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
26	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
27	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
28	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
29	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
30	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
31	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
32	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
33	$N_{c3}=$	$N_{c2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4

34	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
35	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
36	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
37	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
38	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
39	$NC_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
40	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
41	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
42	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
43	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
44	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
45	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
46	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
47	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
48	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
49	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
50	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
51	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
52	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
53	$NC_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
54	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
55	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
56	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
57	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
58	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
59	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
61	$NC_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
61	$NC_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
62	$NC_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
63	$NC_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
64	$NC_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
65	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
66	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
67	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
68	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
69	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
70	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
71	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
72	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
73	$NC_3=$	$NC_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4

74	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
75	$Nc_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
76	$Nc_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
77	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
78	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
79	$Nc_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
80	$Nc_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
81	$Nc_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
82	$Nc_3=$	$Nc_{2S}=$	68.5	68.1	68.2		84.7	83.1	83.4
83	$Nc_1=$	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5
	Media	68.5	66.4	66.0	66.2	67.3	76.1	74.5	74.9
	Máxima	68.5	68.5	68.1	68.2	67.3	84.7	83.1	83.4
	Mínima	68.5	57.0	56.4	56.7	67.3	37.4	35.2	36.5

Cuadro A.12. Valores de Nc corregidos por pendiente (Sc = 33.15 %) y por humedad antecedente para la Nanocuenca Berriozábal

(1)	(18)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)	(28)	(29)	(30)
NÚM. DE EVENTO	N_{C_1} o N_{C_3}	$N_{C_{2S}}$				$N_{C_{1S}}$ o $N_{C_{3S}}$			
		$N_{C_{2S3}}$	McCuen	Chow	Dal-ré	= $N_{C_{3S}}$	SCS	Chow	Dal-Ré
	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)
1	$N_{C_1=}$	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.0
2	$N_{C_1=}$	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.0
3	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
4	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
5	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
6	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
7	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
8	$N_{C_1=}$	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.0
9	$N_{C_1=}$	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.0
10	$N_{C_1=}$	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.0
11	$N_{C_1=}$	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.0
12	$N_{C_1=}$	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.0
13	$N_{C_1=}$	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.0
14	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
15	$N_{C_1=}$	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.9
16	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
17	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
18	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
19	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
20	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
21	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
22	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
23	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
24	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
25	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
26	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
27	$N_{C_3=}$	$N_{C_{2S}=}$	76.3	75.9	76.0		89.5	87.9	88.1
	Media	76.3	72.7	72.2	72.4	75.2	75.0	73.1	73.8
	Máxima	76.3	76.3	75.9	76.0	75.2	89.5	87.9	88.1
	Mínima	76.3	65.3	64.8	65.1	75.2	46.1	43.6	45.0

Cuadro A.13. Diferencias (o error ΔN_c) entre los valores de N_c de tablas corregidos por humedad antecedente y pendiente y los obtenidos con datos de campo para la Nanocuenca Rosita

(1)	(31)	(32)	(33)	(34)
NÚM. DE EVENTO	N_{c3S3} (adim)	SCS (adim)	Chow (adim)	Dal-Ré (adim)
1	-16.6	-44.9	-47.3	-45.8
2	-17.5	-45.8	-48.2	-46.8
3	-12.0	-40.3	-42.7	-41.3
4		18.2	16.6	16.8
5	-9.3	-37.6	-40.0	-38.6
6	-17.6	-45.9	-48.3	-46.8
7	-4.1	-32.4	-34.8	-33.4
8		7.4	5.8	5.9
9		20.8	19.2	19.3
10		-3.2	-4.9	-4.7
11		23.1	21.5	21.7
12		25.5	23.8	24.0
13		-27.2	-29.6	-28.2
14	1.1	-29.2	-31.6	-30.2
15	-0.9	11.8	10.2	10.4
16		16.9	15.2	15.4
17		-23.5	-25.9	-24.5
18		-24.6	-27.0	-25.5
19	4.8	-37.1	-39.5	-38.0
20	3.8	17.2	15.5	15.7
Media	-7.0	-12.5	-14.6	-13.7
Máxima	4.8	25.5	23.8	24.0
Mínima	-17.6	-45.9	-48.3	-46.8

Cuadro A.14. Diferencias (o error ΔN_c) entre los valores de N_c de tablas corregidos por humedad antecedente y pendiente y los obtenidos con datos de campo para la Nanocuenca Finca Brasil

(1)	(31)	(32)	(33)	(34)
NÚM. DE EVENTO	$N_{c_{3S3}}$	SCS	Chow	Dal-Ré
	(adim)	(adim)	(adim)	(adim)
1	16.6	-13.0	-15.5	-14.1
2		28.0	26.3	26.5
3		29.2	27.5	27.7
4		25.1	23.5	23.7
Media	16.6	17.3	15.4	15.9
Máxima	16.6	29.2	27.5	27.7
Mínima	16.6	-13.0	-15.5	-14.1

Cuadro A.15. Diferencias (o error ΔN_c) entre los valores de N_c de tablas corregidos por humedad antecedente y pendiente y los obtenidos con datos de campo para la Nanocuenca Hannover

(1)	(31)	(32)	(33)	(34)
NÚM. DE EVENTO	N_{c3S3} (adim)	SCS (adim)	Chow (adim)	Dal-Ré (adim)
1	-20.3	-50.2	-52.4	-51.1
2	13.9	-15.9	-18.1	-16.8
3		-14.7	-16.3	-16.1
4		-8.0	-9.6	-9.3
5		18.7	17.2	17.4
6		25.9	24.3	24.6
7		8.1	6.5	6.8
8		19.9	18.3	18.6
9		22.4	20.8	21.1
10		11.1	9.5	9.8
11		31.0	29.4	29.7
12		-0.2	-1.8	-1.5
13		14.0	12.4	12.7
14		1.7	0.1	0.4
15		-14.7	-16.3	-16.1
16		0.3	-1.3	-1.0
17		16.8	15.2	15.5
18		1.7	0.1	0.4
19		30.4	28.8	29.0
20		26.7	25.1	25.4
21		-7.4	-8.9	-8.7
22		41.5	40.0	40.2
23		31.8	30.2	30.4
24		0.8	-0.7	-0.5
25		19.4	17.8	18.1
26		1.5	-0.1	0.2
27		28.2	26.6	26.9
28		39.8	38.2	38.4
29		-4.4	-6.0	-5.8
30		15.4	13.8	14.1
31		14.5	12.9	13.1

32		12.0	10.4	10.6
33		-14.0	-15.5	-15.3
34		42.3	40.8	41.0
35		1.9	0.4	0.6
36		-11.4	-12.9	-12.7
37		6.5	5.0	5.2
38		1.4	-0.2	0.1
39	5.6	-24.3	-26.4	-25.2
40		15.6	14.0	14.3
41		-14.9	-16.5	-16.2
42		35.1	33.6	33.8
43		12.9	11.3	11.6
44		32.6	31.0	31.2
45		-3.8	-5.4	-5.1
46		10.1	8.5	8.8
47		23.9	22.4	22.6
48		37.6	36.0	36.3
49		-1.4	-3.0	-2.7
50		-14.9	-16.5	-16.2
51		-0.8	-2.4	-2.2
52		-0.3	-1.8	-1.6
53	6.5	-23.3	-25.5	-24.2
54		13.0	11.4	11.7
55		11.7	10.1	10.4
56		7.3	5.7	5.9
57		-7.9	-9.4	-9.2
58		5.9	4.3	4.6
59		-11.4	-12.9	-12.7
60	-29.7	-59.6	-61.7	-60.4
61	-18.4	-48.3	-50.4	-49.1
62	-8.8	-38.7	-40.8	-39.5
63	-5.7	-35.6	-37.8	-36.5
64	2.5	-27.4	-29.6	-28.3
65		-1.3	-2.9	-2.6
66		24.4	22.8	23.1
67		-4.1	-5.7	-5.5
68		-14.2	-15.7	-15.5

69		-14.7	-16.3	-16.1
70		42.2	40.6	40.9
71		-14.2	-15.7	-15.5
72		-14.0	-15.5	-15.3
73		-4.8	-6.3	-6.1
74		5.9	4.3	4.6
75	-1.9	-31.7	-33.9	-32.6
76	-30.0	-59.9	-62.0	-60.7
77		-13.2	-14.8	-14.5
78		-14.7	-16.3	-16.1
79	-29.0	-58.8	-61.0	-59.7
80	-7.4	-37.3	-39.5	-38.2
81	7.5	-22.4	-24.6	-23.3
82		29.2	27.6	27.8
83	-13.4	-43.2	-45.4	-44.1
Media	-8.6	-0.1	-1.8	-1.3
Máxima	13.9	42.3	40.8	41.0
Mínima	-30.0	-59.9	-62.0	-60.7

Cuadro A.16. Diferencias (o error ΔN_c) entre los valores de N_c de tablas corregidos por humedad antecedente y pendiente y los obtenidos con datos de campo para la Nanocuenca Berriozábal

(1)	(31)	(32)	(33)	(34)
NÚM. DE EVENTO	N_{c3S3} (adim)	SCS (adim)	Chow (adim)	Dal-Ré (adim)
1	3.6	-25.5	-27.9	-26.5
2	12.7	-16.5	-18.9	-17.5
3		-4.2	-5.9	-5.7
4		9.5	7.9	8.0
5		20.0	18.4	18.6
6		6.7	5.0	5.2
7		-6.7	-8.3	-8.2
8	-14.9	-44.0	-46.5	-45.0
9	-9.7	-38.8	-41.2	-39.8
10	-11.8	-40.9	-43.3	-41.9
11	-20.2	-49.3	-51.7	-50.3
12	-13.2	-42.3	-44.7	-43.3
13	-11.7	-40.8	-43.3	-41.8
14		-9.3	-11.0	-10.8
15	-1.0	-30.1	-32.6	-30.3
16		10.7	9.0	9.2
17		2.0	0.4	0.6
18		17.0	15.3	15.5
19		-1.5	-3.2	-3.0
20		11.7	10.1	10.3
21		5.5	3.8	4.0
22		9.4	7.8	7.9
23		-2.0	-3.6	-3.4
24		8.1	6.5	6.7
25		5.6	3.9	4.1
26		3.7	2.1	2.2
27		10.5	8.9	9.1
Media	-7.3	-8.6	-10.5	-9.9
Máxima	12.7	20.0	18.4	18.6
Mínima	-20.2	-49.3	-51.7	-50.3

Cuadro A.17. Cálculo de valores reales del Coeficiente de Escurrimiento medido Cem, con los datos de campo de lámina escurrida Le y lámina precipitada Lp para la Nanocuenca Finca Brasil

(1)	(10)	(11)	(12)
NÚM. DE EVENTO	Le (mm)	Lp (mm)	Cem (%)
1	0.10	42.10	0.24
2	3.57	58.60	6.09
3	1.71	52.30	3.26
4	0.09	32.60	0.28
Media	1.37	46.40	2.47
Máxima	3.57	58.60	6.09
Mínima	0.09	32.60	0.24

Cuadro A.18. Cálculo de valores reales del Coeficiente de Esguerrimiento medido Cem, con los datos de campo de lámina esguerrida Le y lámina precipitada Lp para la Nanocuenca Hannover

(1)	(10)	(11)	(12)
NÚM. DE EVENTO	Le	Lp	Cem
	(mm)	(mm)	(%)
1	0.00	7.20	0.00
2	3.86	75.70	5.10
3	0.00	0.30	0.00
4	0.00	4.00	0.00
5	0.10	29.90	0.33
6	1.11	50.30	2.21
7	0.07	17.80	0.37
8	0.61	37.10	1.65
9	3.01	53.80	5.59
10	0.37	24.20	1.51
11	1.68	63.90	2.62
12	0.01	9.80	0.13
13	0.84	30.90	2.71
14	0.00	10.40	0.00
15	0.00	0.30	0.00
16	0.01	10.10	0.10
17	0.72	33.70	2.12
18	0.18	13.60	1.34
19	1.83	63.40	2.88
20	7.85	78.90	9.95
21	0.00	4.40	0.00
22	6.47	116.90	5.54
23	0.00	45.20	0.00
24	0.00	9.80	0.00
25	5.60	57.50	9.75
26	5.51	30.10	18.31
27	5.02	73.10	6.87
28	0.00	62.30	0.00
29	0.00	6.20	0.00
30	0.04	24.60	0.15
31	0.92	32.00	2.89

32	1.69	32.60	5.17
33	0.00	0.70	0.00
34	11.59	138.50	8.37
35	0.00	10.60	0.00
36	0.00	2.10	0.00
37	0.00	14.20	0.00
38	0.00	10.20	0.00
39	0.27	38.20	0.70
40	4.99	49.20	10.13
41	0.00	0.20	0.00
42	2.53	78.60	3.21
43	2.30	36.30	6.33
44	4.79	82.60	5.80
45	0.47	10.80	4.36
46	4.39	39.10	11.23
47	7.40	71.60	10.34
48	5.27	98.60	5.34
49	0.00	8.20	0.00
50	0.00	0.20	0.00
51	0.00	8.60	0.00
52	0.00	9.00	0.00
53	0.27	39.70	0.69
54	1.31	32.20	4.08
55	0.53	26.10	2.02
56	0.21	18.90	1.13
57	0.00	4.10	0.00
58	0.00	13.70	0.00
59	0.00	2.10	0.00
60	0.00	1.60	0.00
61	0.00	8.50	0.00
62	0.00	16.00	0.00
63	0.00	18.80	0.00
64	0.00	27.60	0.00
65	0.00	8.30	0.00
66	4.73	64.10	7.39
67	0.00	6.40	0.00
68	0.00	0.60	0.00

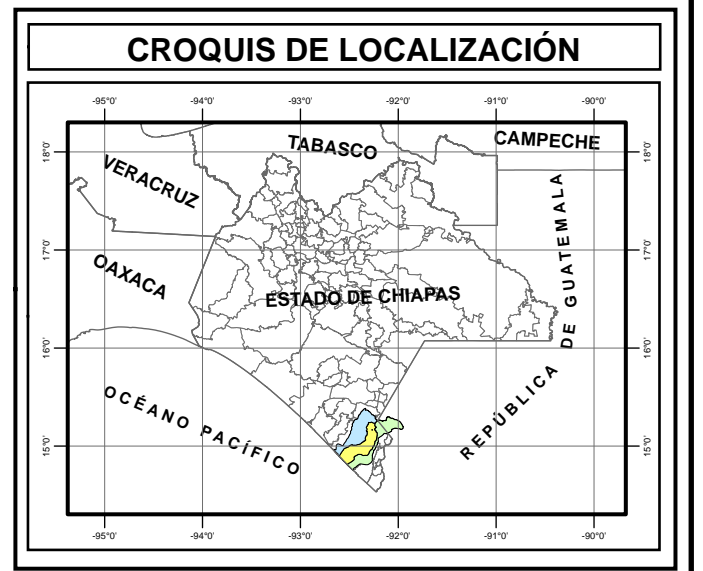
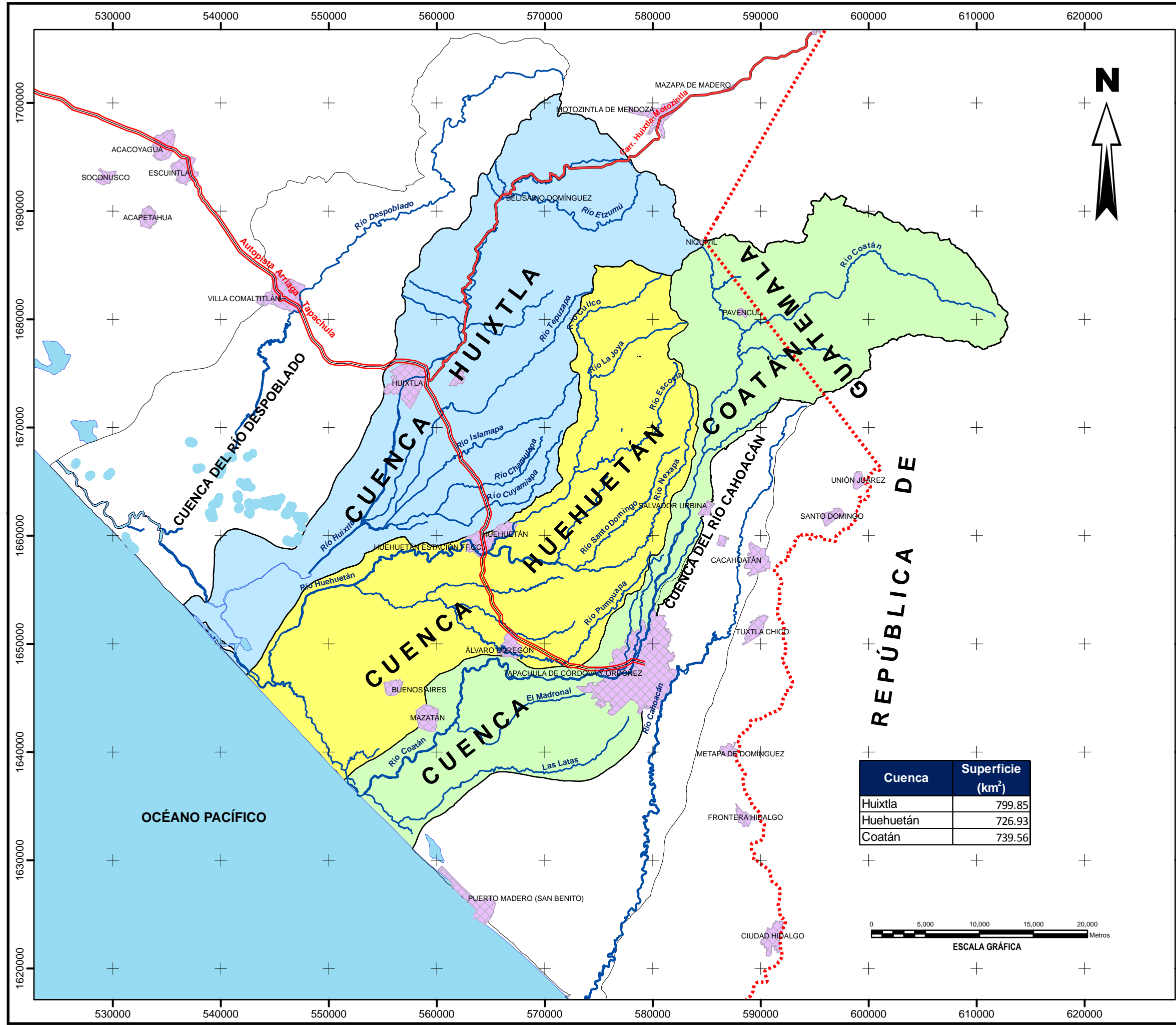
69	0.00	0.30	0.00
70	0.08	74.10	0.11
71	0.00	0.60	0.00
72	0.00	0.70	0.00
73	0.00	6.00	0.00
74	0.00	13.70	0.00
75	0.06	25.40	0.25
76	1.36	5.30	25.64
77	0.00	1.10	0.00
78	0.00	0.30	0.00
79	0.00	2.00	0.00
80	0.00	17.20	0.00
81	4.27	63.40	6.74
82	0.22	47.50	0.46
83	0.00	12.20	0.00
Media	1.26	28.63	4.80
Máxima	11.59	138.50	25.64
Mínima	0.00	0.20	0.10

Cuadro A.19. Cálculo de valores reales del Coeficiente de Escorrimento medido Cem, con los datos de campo de lámina escurrida Le y lámina precipitada Lp para la Nanocuenca Berriozábal

(1)	(10)	(11)	(12)
NÚM. DE EVENTO	Le	Lp	Cem
	(mm)	(mm)	(%)
1	0.00	20.20	0.00
2	0.08	34.00	0.24
3	0.01	3.90	0.37
4	1.10	21.60	5.08
5	1.82	37.50	4.86
6	0.78	17.30	4.48
7	0.00	2.00	0.00
8	0.00	5.60	0.00
9	0.02	10.10	0.23
10	0.45	12.00	3.73
11	0.00	2.70	0.13
12	0.00	6.70	0.00
13	2.12	17.80	11.90
14	0.00	0.60	0.00
15	1.61	28.00	5.74
16	1.00	22.40	4.45
17	0.09	9.10	0.97
18	7.11	49.20	14.45
19	0.00	5.00	0.00
20	0.43	20.30	2.11
21	2.06	20.70	9.96
22	1.17	21.80	5.36
23	0.04	5.70	0.67
24	3.46	27.60	12.53
25	0.30	13.70	2.18
26	0.00	8.40	0.00
27	0.54	19.80	2.71
Media	0.90	16.43	4.61
Máxima	7.11	49.20	14.45
Mínima	0.00	0.60	0.13

ANEXO 2

PLANOS GENERADOS



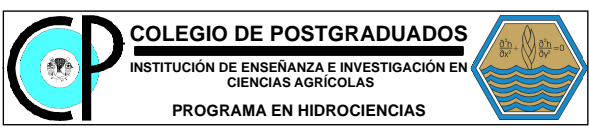
SIMBOLOGÍA

	Corriente principal
	Límite internacional
	Autopista
	Carretera Secundaria
	Cuerpos de agua
	Zona urbana
	Cuenca Huixtla
	Cuenca Huehuetán
	Cuenca Coatlán

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

Cuenca	Superficie (km ²)
Huixtla	799.85
Huehuetán	726.93
Coatlán	739.56



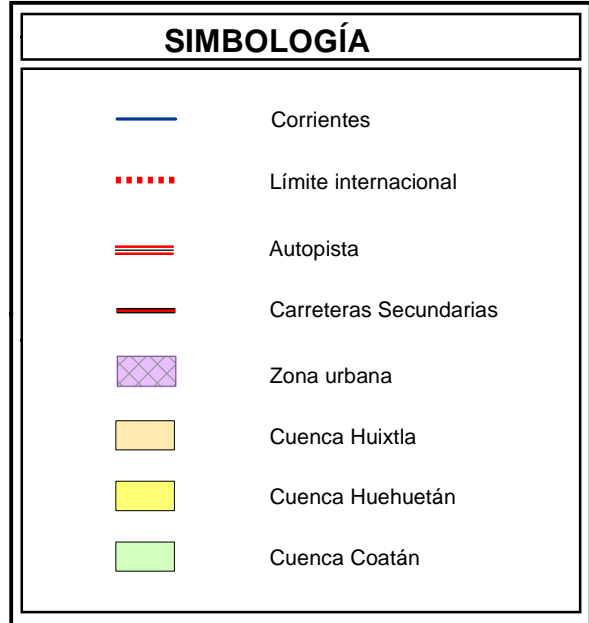
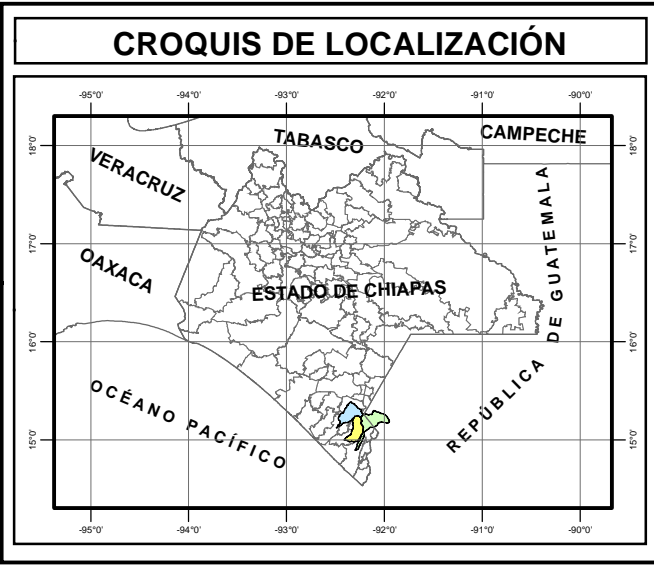
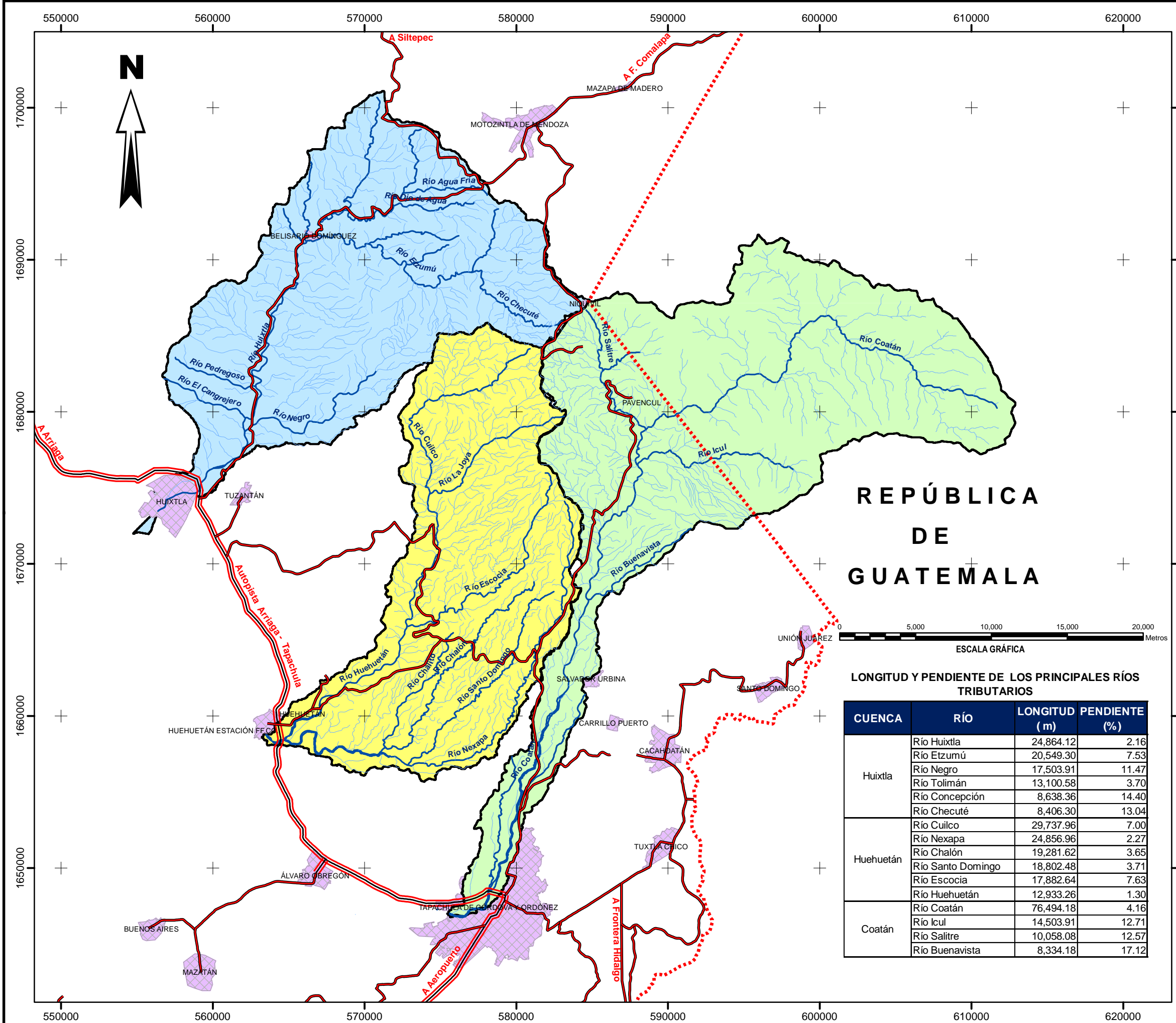
EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

TESIS DOCTORAL

LOCALIZACIÓN DE LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN, DE LA COSTA DE CHIAPAS

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

REVISARON:
 DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
 DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
 DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
 DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
 DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

LONGITUD Y PENDIENTE DE LOS PRINCIPALES RÍOS TRIBUTARIOS

CUENCA	RÍO	LONGITUD (m)	PENDIENTE (%)
Hixtla	Río Hixtla	24,864.12	2.16
	Río Etzumú	20,549.30	7.53
	Río Negro	17,503.91	11.47
	Río Tolimán	13,100.58	3.70
	Río Concepción	8,638.36	14.40
	Río Checuté	8,406.30	13.04
Huehuetán	Río Cuilco	29,737.96	7.00
	Río Nexapa	24,856.96	2.27
	Río Chalón	19,281.62	3.65
	Río Santo Domingo	18,802.48	3.71
	Río Escocia	17,882.64	7.63
	Río Huehuetán	12,933.26	1.30
Coatán	Río Coatán	76,494.18	4.16
	Río Icul	14,503.91	12.71
	Río Buenavista	8,334.18	17.12

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

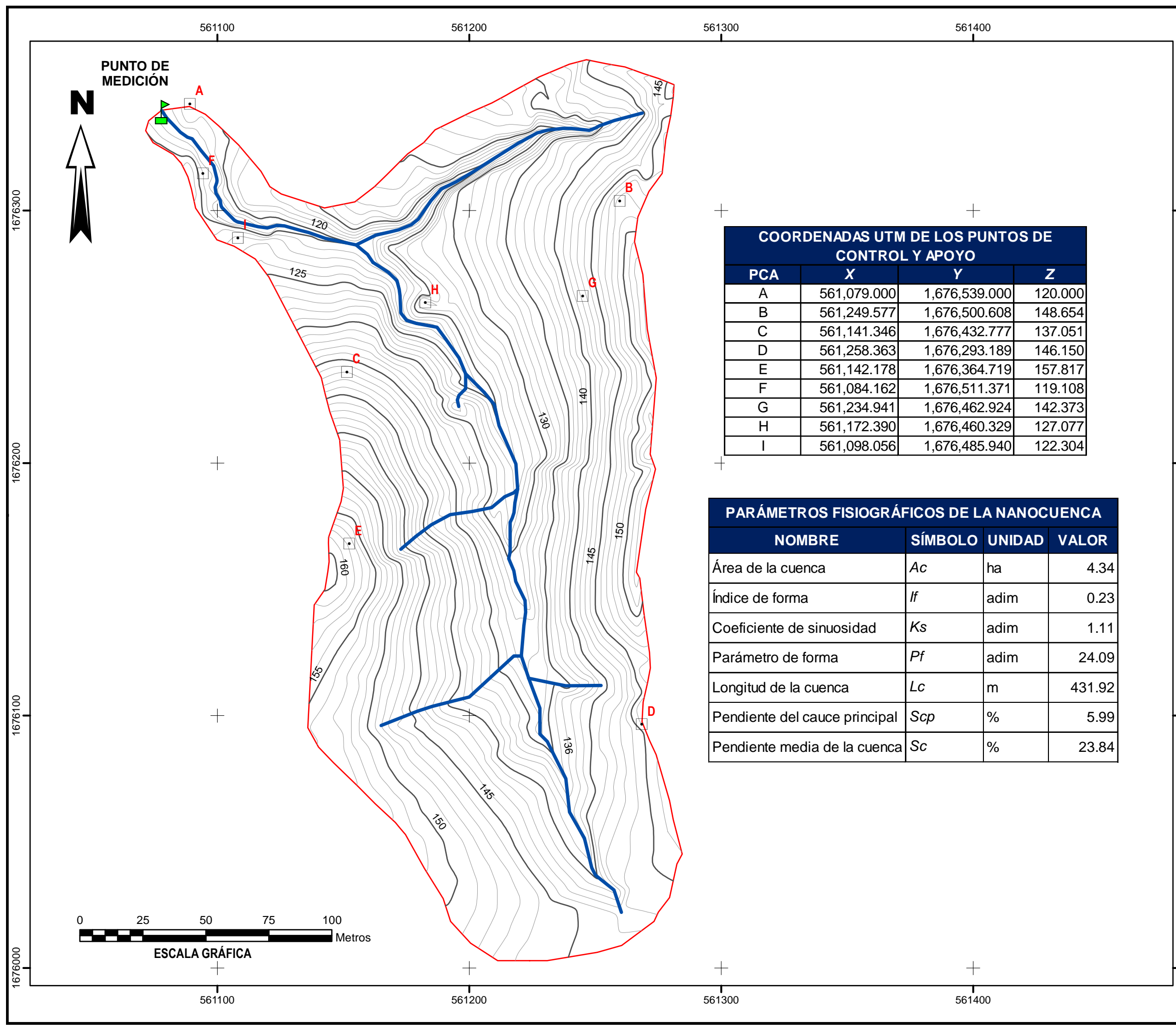
EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

TESIS DOCTORAL

HIDROLOGÍA DE LAS CUENCAS HIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN DE LA COSTA DE CHIAPAS

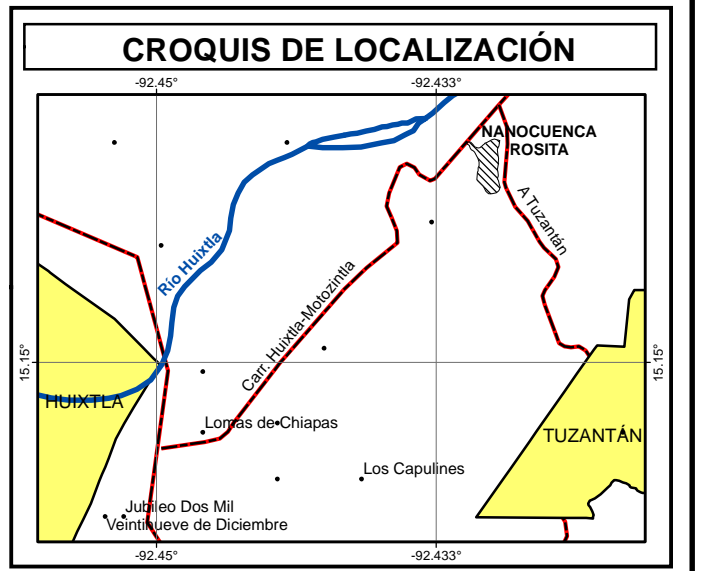
ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

REVISARON:
 DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
 DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
 DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
 DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
 DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES



COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DE CONTROL Y APOYO			
PCA	X	Y	Z
A	561,079.000	1,676,539.000	120.000
B	561,249.577	1,676,500.608	148.654
C	561,141.346	1,676,432.777	137.051
D	561,258.363	1,676,293.189	146.150
E	561,142.178	1,676,364.719	157.817
F	561,084.162	1,676,511.371	119.108
G	561,234.941	1,676,462.924	142.373
H	561,172.390	1,676,460.329	127.077
I	561,098.056	1,676,485.940	122.304

PARÁMETROS FISIGRÁFICOS DE LA NANOCUENCA			
NOMBRE	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Área de la cuenca	<i>Ac</i>	ha	4.34
Índice de forma	<i>If</i>	adim	0.23
Coefficiente de sinuosidad	<i>Ks</i>	adim	1.11
Parámetro de forma	<i>Pf</i>	adim	24.09
Longitud de la cuenca	<i>Lc</i>	m	431.92
Pendiente del cauce principal	<i>Scp</i>	%	5.99
Pendiente media de la cuenca	<i>Sc</i>	%	23.84



SIMBOLOGÍA	
	Cauce
	Parteaguas
	Curvas de nivel
	Puntos de Control y Apoyo (PCA)

NOTAS:
1. Curvas de nivel a cada metro de desnivel.

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide: GRS80
Datum Horizontal: ITRF92
Zona UTM: 15

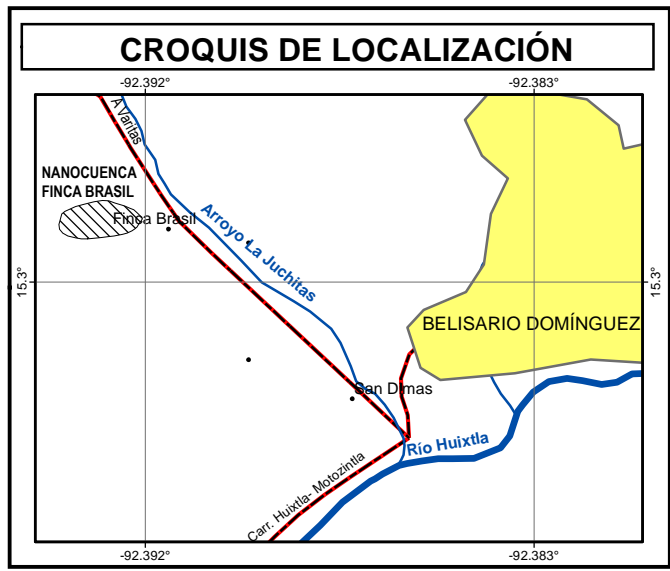
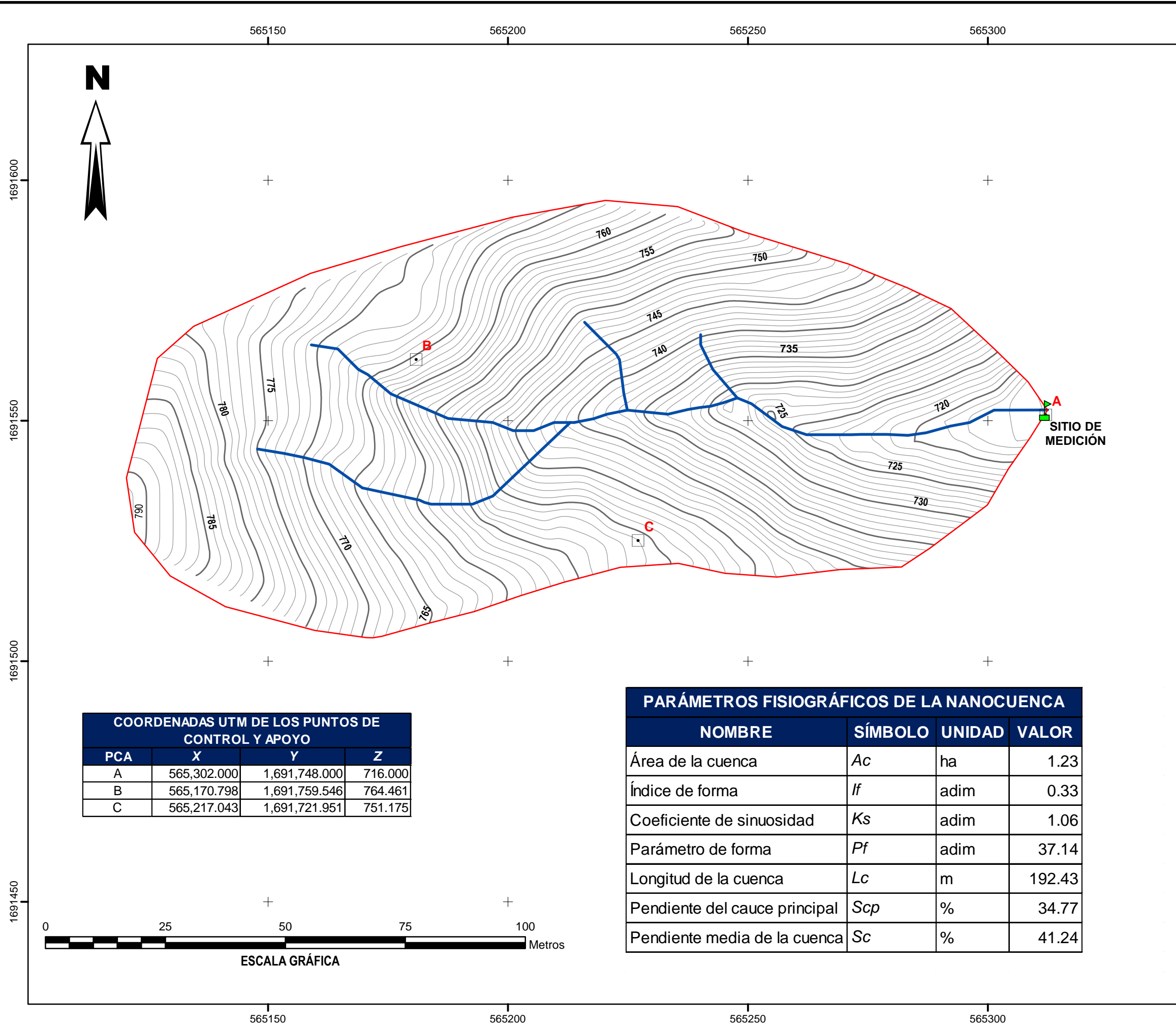
CP COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENCA ROSITA

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

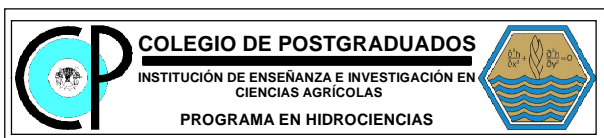
ESCALA 1:1,500 | MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO | PLANO 4 DE 28



SIMBOLOGÍA	
	Cauce
	Parteaguas
	Curvas de nivel
	Puntos de Control y Apoyo (PCA)

NOTAS:
1. Curvas de nivel a cada metro de desnivel

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide: GRS80
Datum Horizontal: ITRF92
Zona UTM: 15



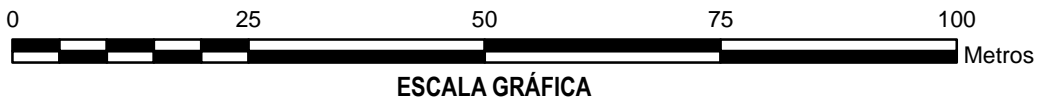
EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

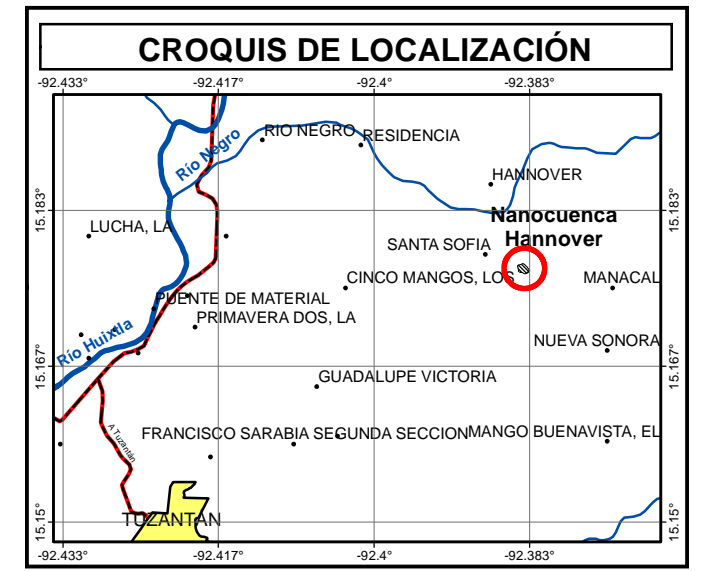
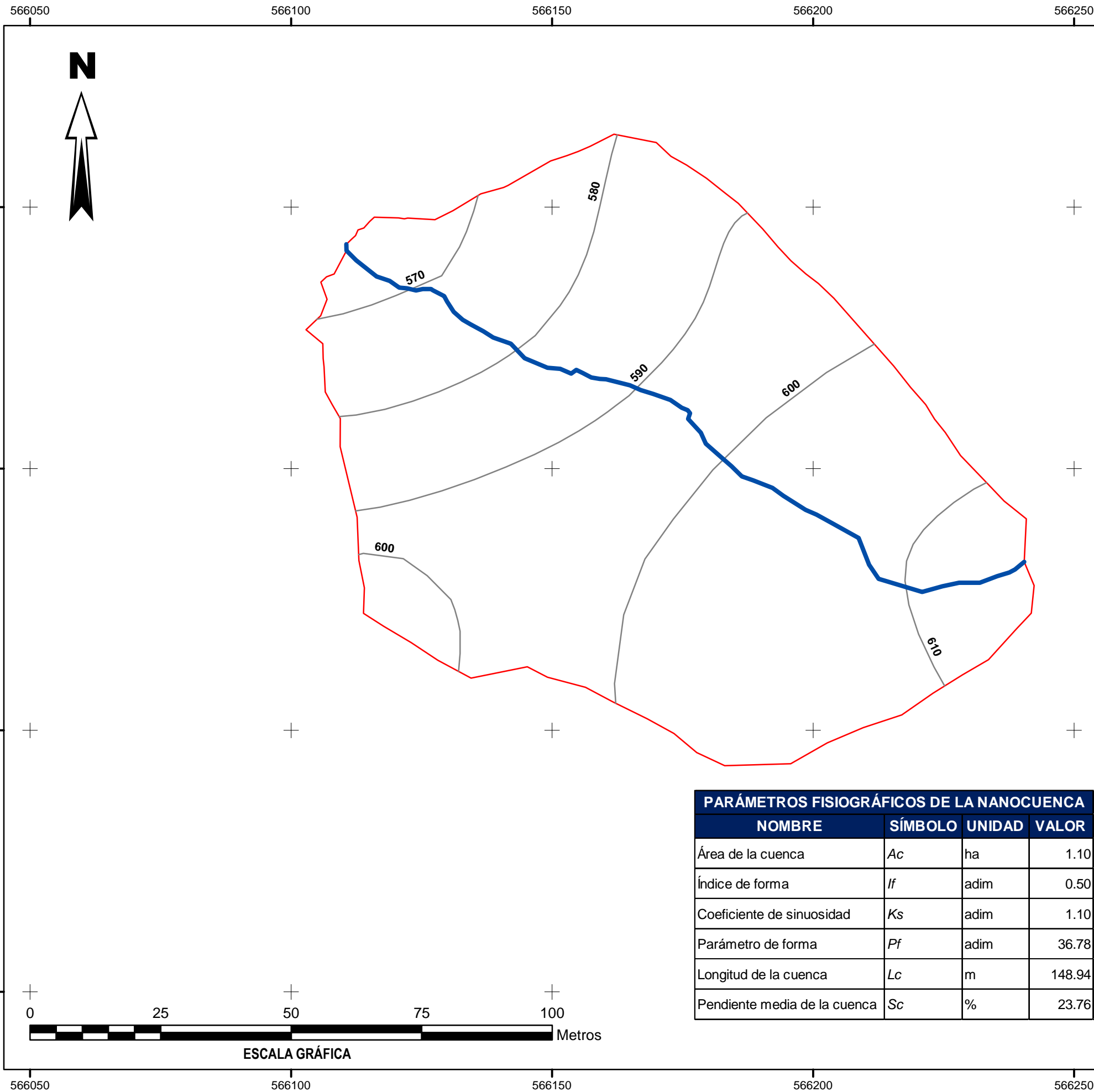
PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENA FINCA BRASIL

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

COORDENADAS UTM DE LOS PUNTOS DE CONTROL Y APOYO			
PCA	X	Y	Z
A	565,302.000	1,691,748.000	716.000
B	565,170.798	1,691,759.546	764.461
C	565,217.043	1,691,721.951	751.175

PARÁMETROS FISIAGRÁFICOS DE LA NANOCUENA			
NOMBRE	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Área de la cuenca	A_c	ha	1.23
Índice de forma	I_f	adim	0.33
Coefficiente de sinuosidad	K_s	adim	1.06
Parámetro de forma	P_f	adim	37.14
Longitud de la cuenca	L_c	m	192.43
Pendiente del cauce principal	Sc_p	%	34.77
Pendiente media de la cuenca	Sc	%	41.24





SIMBOLOGÍA	
	Cauce
	Parteaguas
	Curvas de nivel

- NOTAS:
1. Las curvas de nivel se obtuvieron del modelo digital de elevaciones del INEGI.
 2. Curvas de nivel a cada 10 metros de desnivel.

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

PARÁMETROS FISIAGRÁFICOS DE LA NANOCUENCA			
NOMBRE	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Área de la cuenca	<i>Ac</i>	ha	1.10
Índice de forma	<i>If</i>	adim	0.50
Coefficiente de sinuosidad	<i>Ks</i>	adim	1.10
Parámetro de forma	<i>Pf</i>	adim	36.78
Longitud de la cuenca	<i>Lc</i>	m	148.94
Pendiente media de la cuenca	<i>Sc</i>	%	23.76

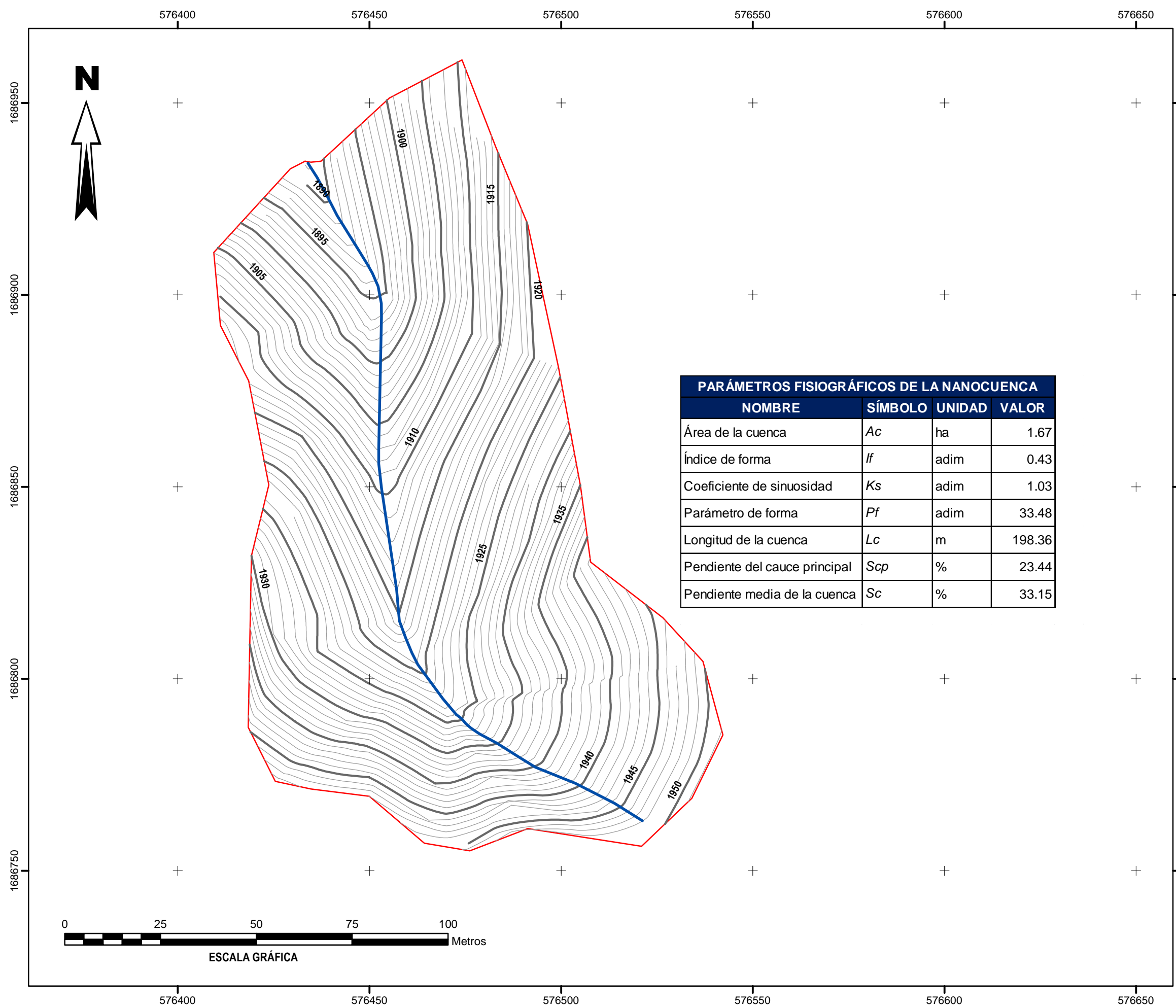
CP COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

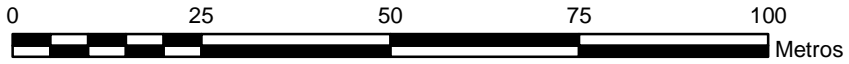
PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENCA HAMNOVER

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
 REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

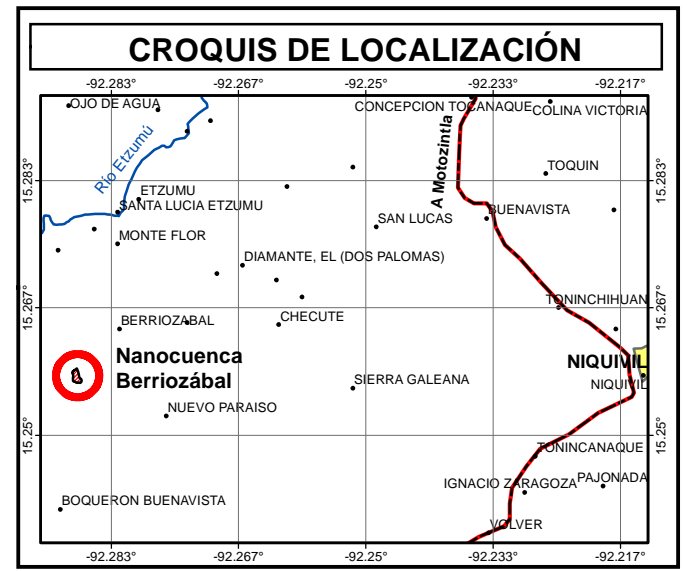
ESCALA 1:800 MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO PLANO 6 DE 28



PARÁMETROS FISIGRÁFICOS DE LA NANOCUENCA			
NOMBRE	SÍMBOLO	UNIDAD	VALOR
Área de la cuenca	<i>Ac</i>	ha	1.67
Índice de forma	<i>If</i>	adim	0.43
Coefficiente de sinuosidad	<i>Ks</i>	adim	1.03
Parámetro de forma	<i>Pf</i>	adim	33.48
Longitud de la cuenca	<i>Lc</i>	m	198.36
Pendiente del cauce principal	<i>Scp</i>	%	23.44
Pendiente media de la cuenca	<i>Sc</i>	%	33.15



ESCALA GRÁFICA



SIMBOLOGÍA	
	Cauce
	Parteaguas
	Curvas de nivel

NOTAS:
1. Curvas de nivel a cada metro de desnivel

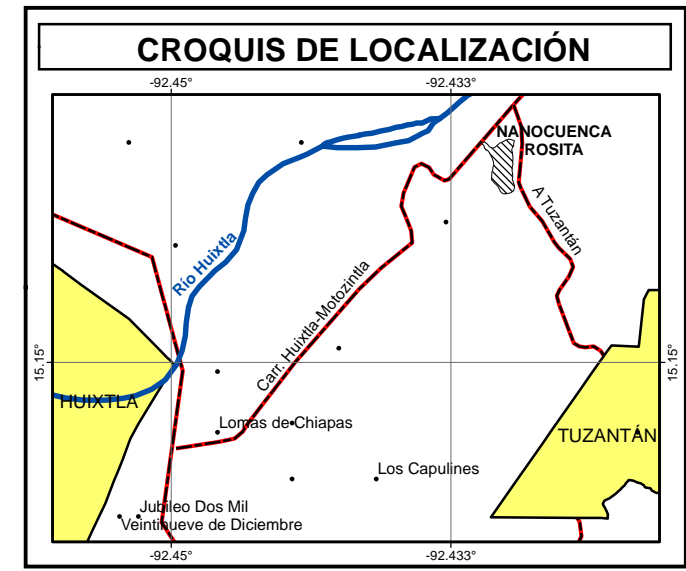
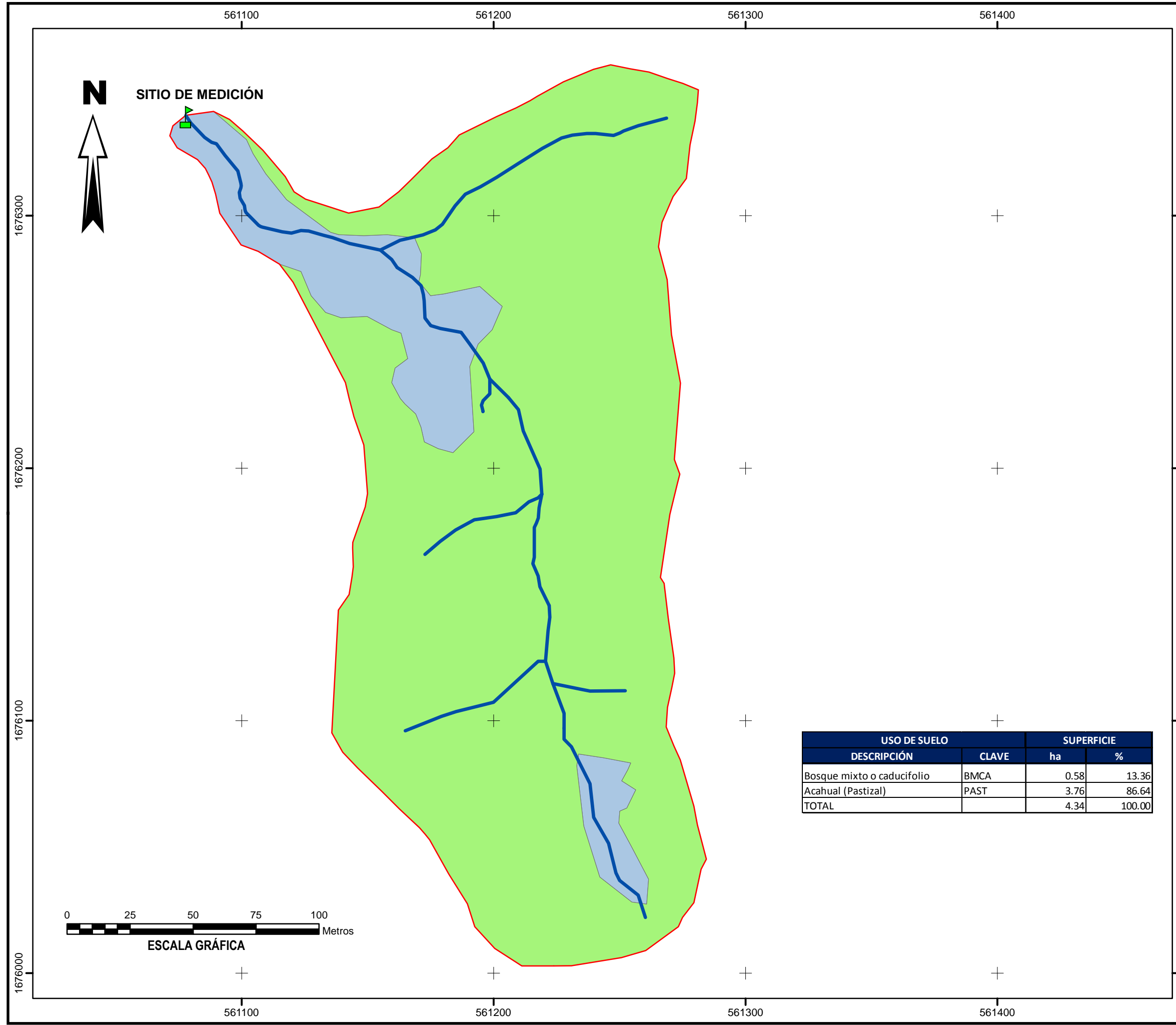
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide: GRS80
Datum Horizontal: ITRF92
Zona UTM: 15

CP COLEGIO DE POSTGRADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

PLANO TOPOGRÁFICO DE LA NANOCUENCA BERRIOZÁBAL (CONAGUA-UAQ 2008)

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES



SIMBOLOGÍA

- Cauce
- Parteaguas

Uso de suelo

- Acahual (Pastizal)
- Bosque mixto o caducifolio

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

USO DE SUELO		SUPERFICIE	
DESCRIPCIÓN	CLAVE	ha	%
Bosque mixto o caducifolio	BMCA	0.58	13.36
Acahual (Pastizal)	PAST	3.76	86.64
TOTAL		4.34	100.00

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
 CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

**EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y
 ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-
 AMBIENTAL**

TESIS DOCTORAL

USO DE SUELO DE LA NANOCUENCA ROSITA

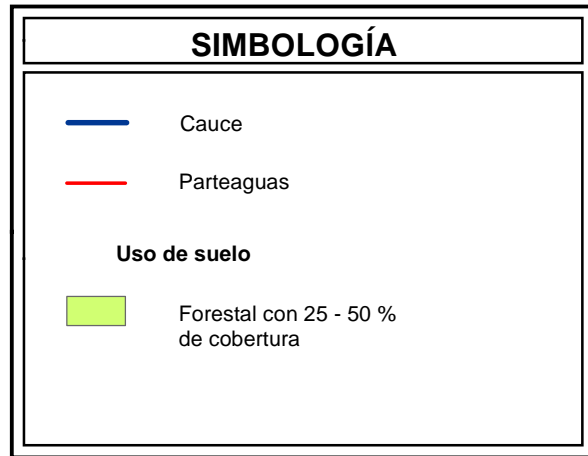
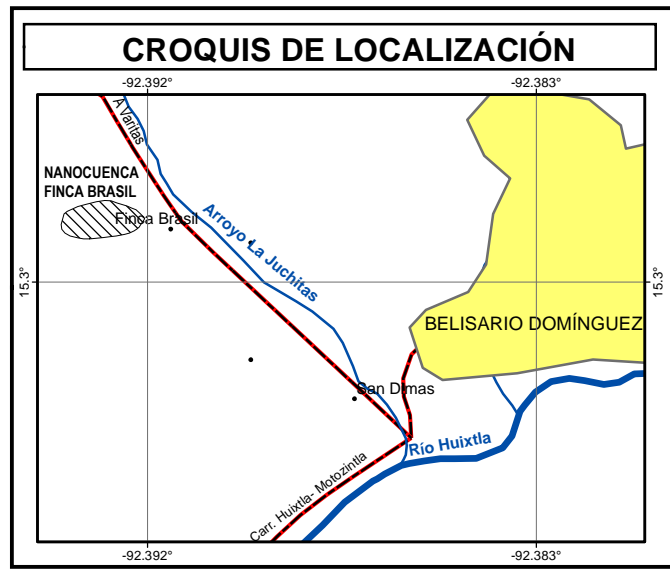
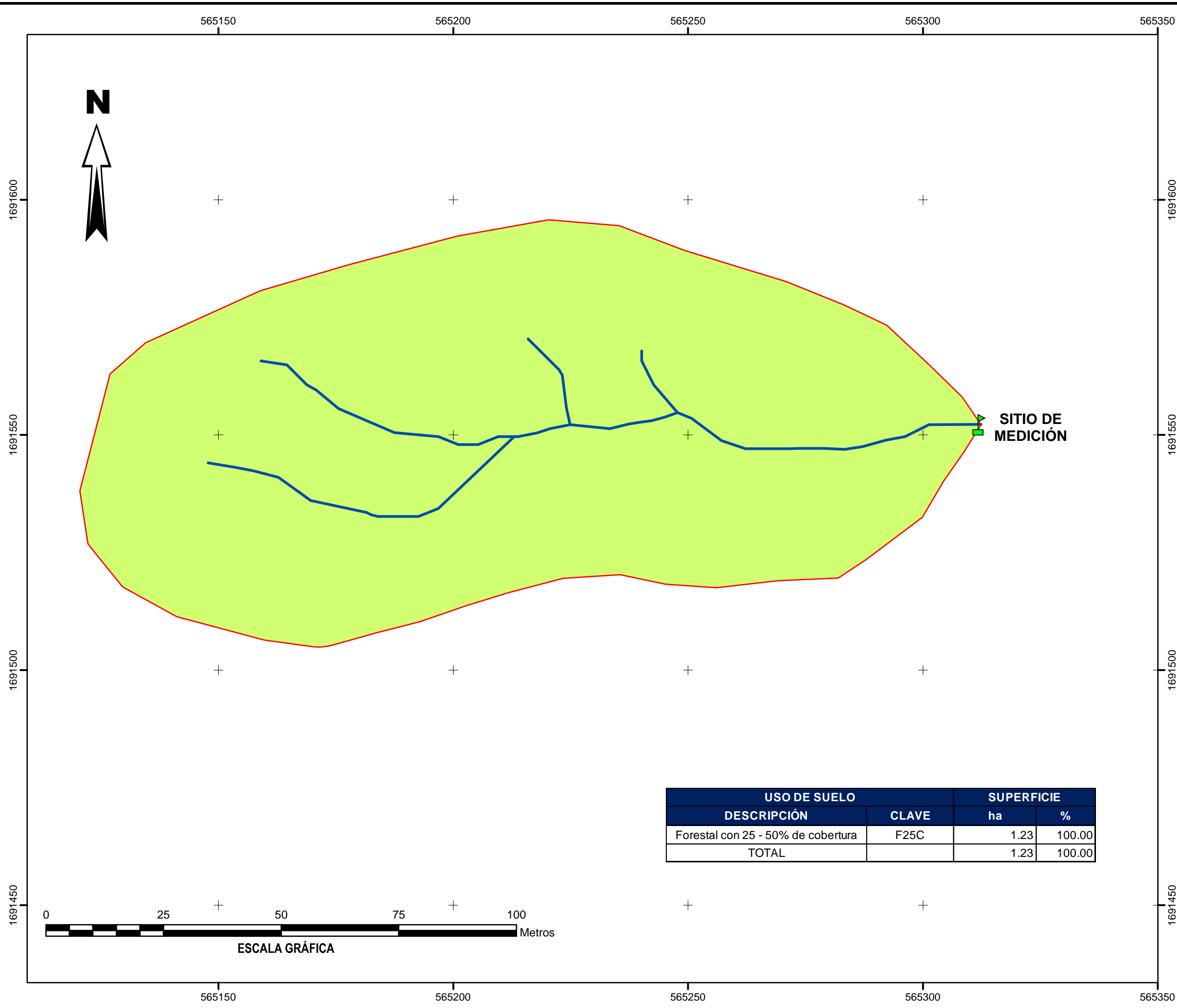
ELABORÓ:
M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

REVISARON:
 DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
 DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
 DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
 DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
 DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

ESCALA 1 : 1,500

MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO

PLANO 8 DE 28



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

USO DE SUELO		SUPERFICIE	
DESCRIPCIÓN	CLAVE	ha	%
Forestal con 25 - 50% de cobertura	F25C	1.23	100.00
TOTAL		1.23	100.00

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

TESIS DOCTORAL

USO DE SUELO DE LA NANOCUENCA FINCA BRASIL

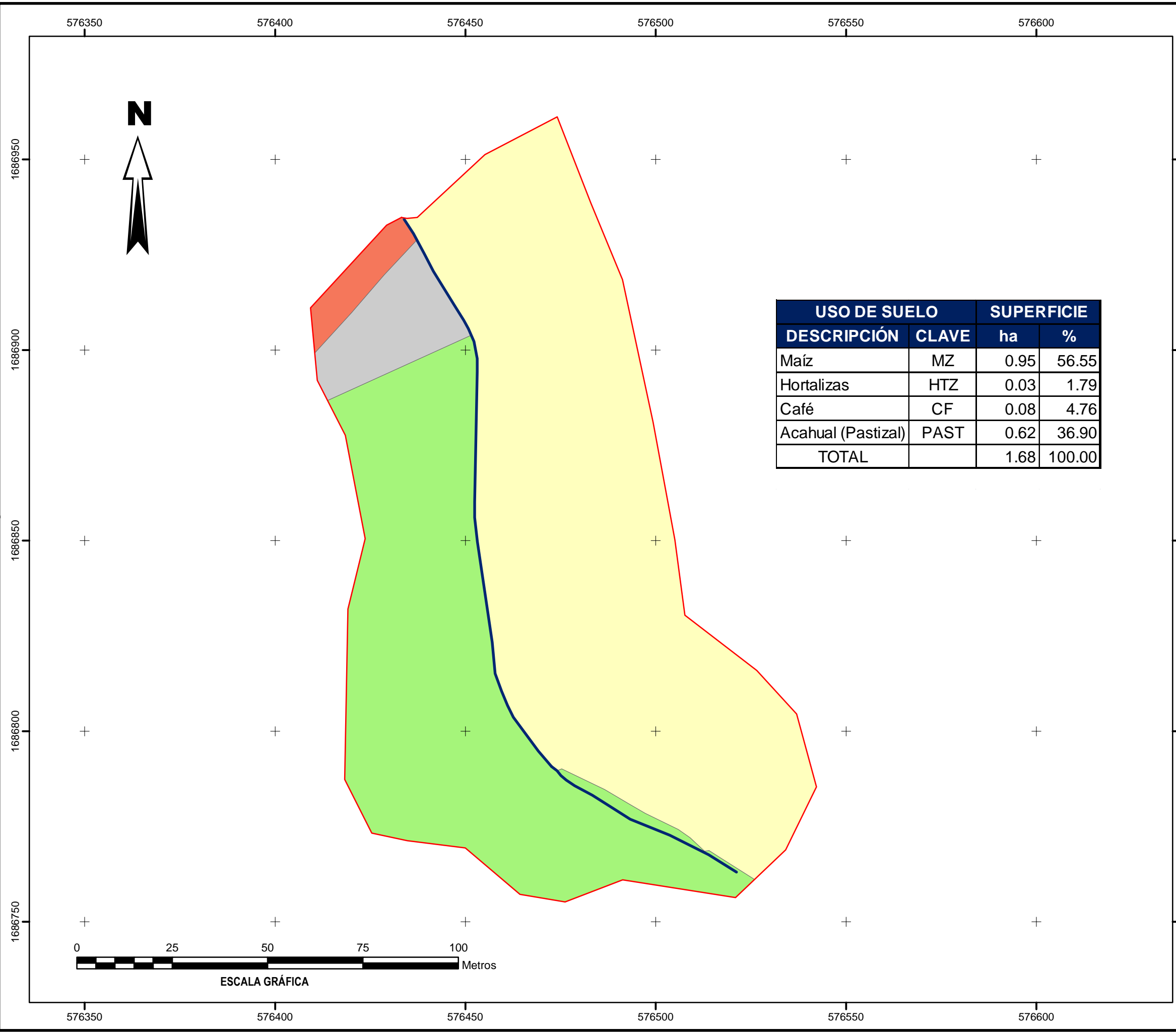
ELABORÓ:
M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

REVISARON:
 DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
 DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
 DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
 DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
 DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

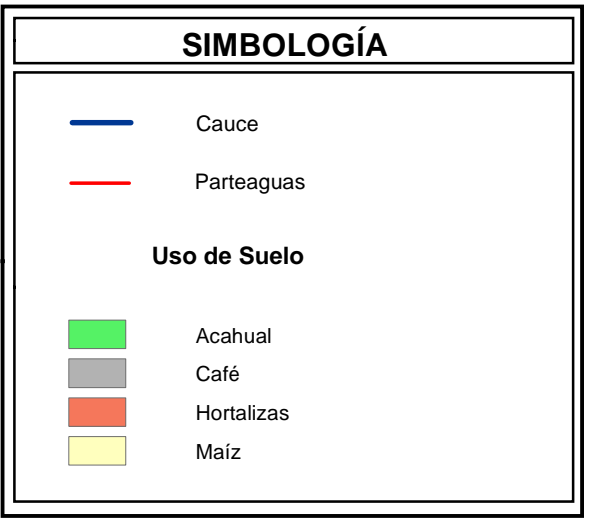
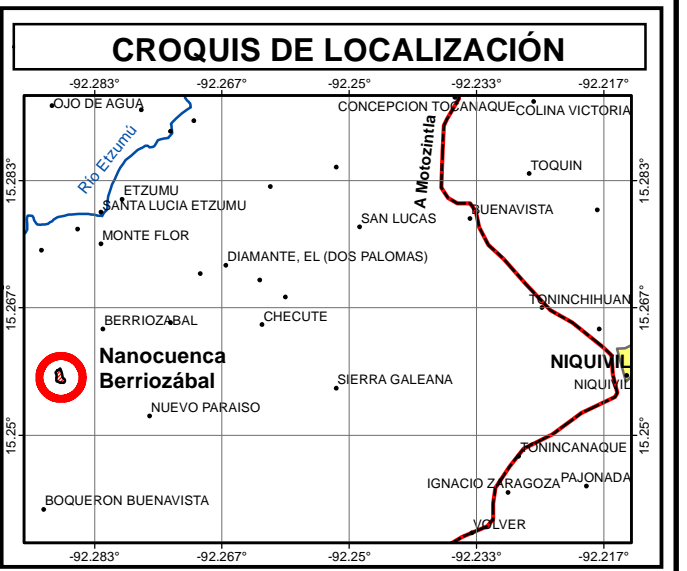
ESCALA 1 : 800

MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO

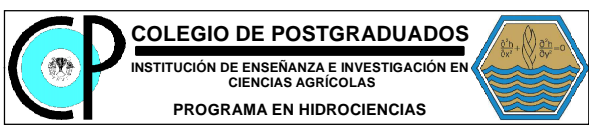
PLANO 9 DE 28



USO DE SUELO		SUPERFICIE	
DESCRIPCIÓN	CLAVE	ha	%
Maíz	MZ	0.95	56.55
Hortalizas	HTZ	0.03	1.79
Café	CF	0.08	4.76
Acahual (Pastizal)	PAST	0.62	36.90
TOTAL		1.68	100.00



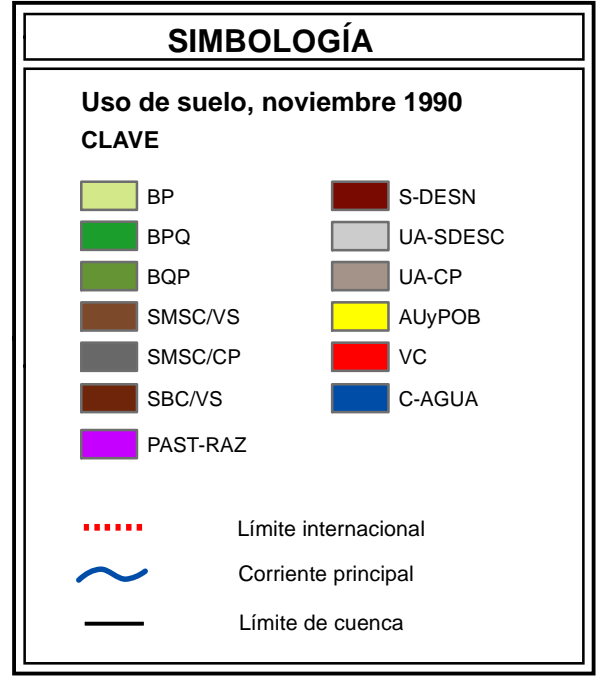
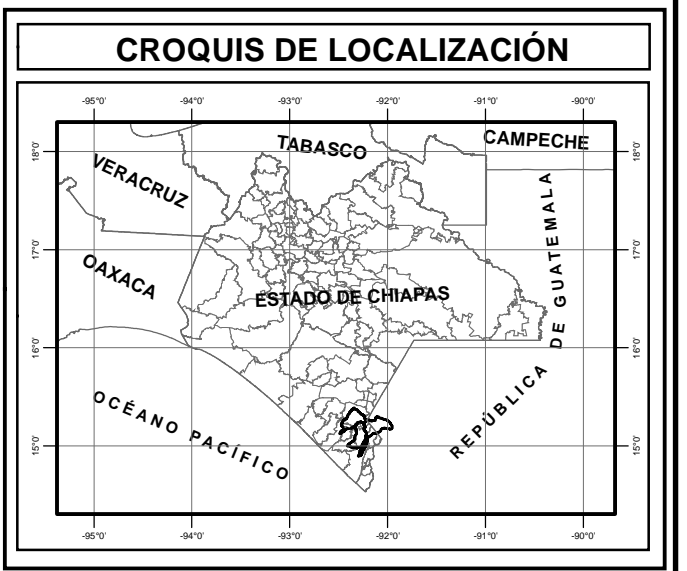
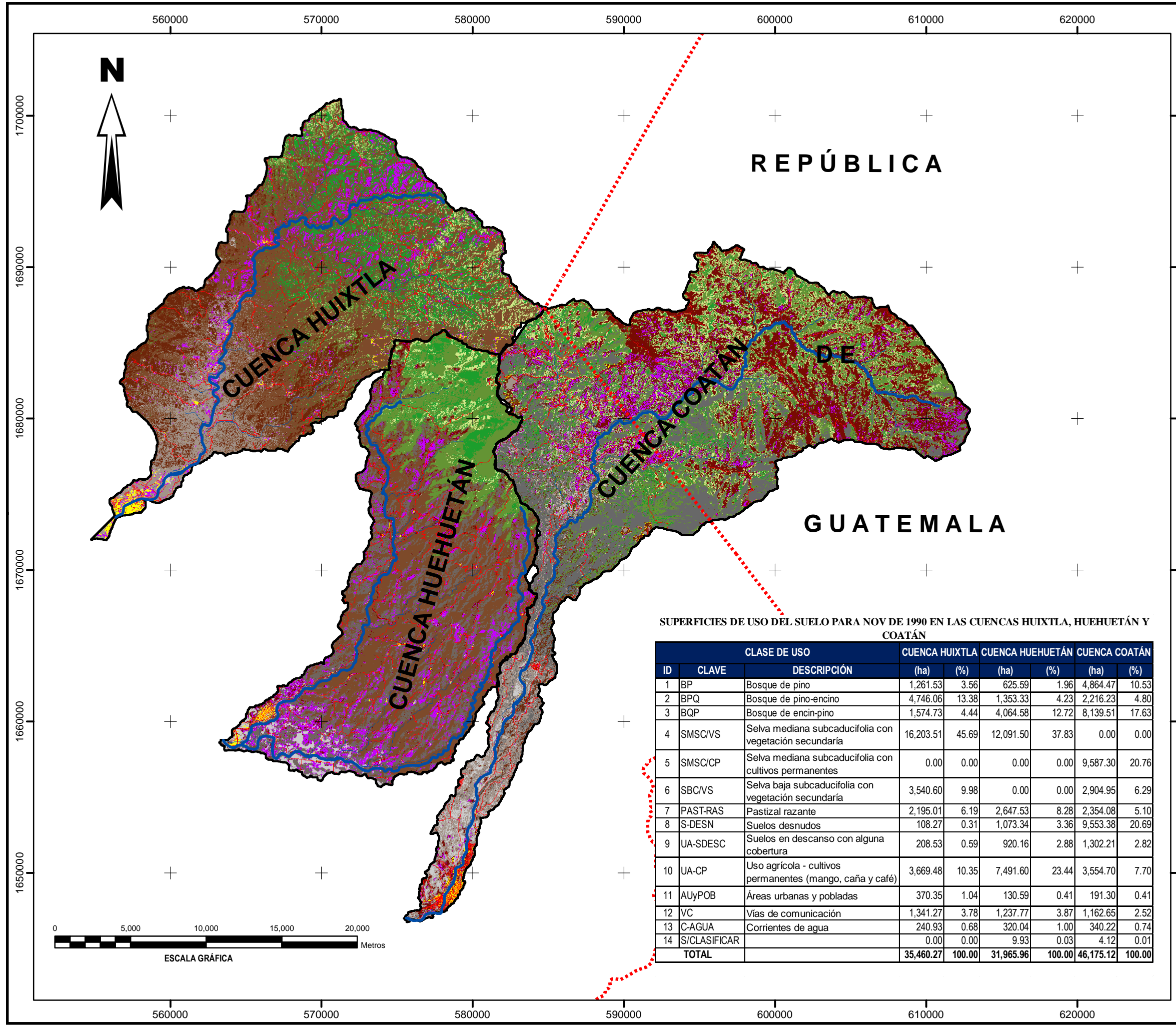
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15



EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

PLANO DE USO DEL SUELO DE LA NANOCUENCA BERRIOZÁBAL (CONAGUA-UAQ 2008)

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
 REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES



SUPERFICIES DE USO DEL SUELO PARA NOV DE 1990 EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN

ID	CLAVE	DESCRIPCIÓN	CUENCA HUIXTLA		CUENCA HUEHUETÁN		CUENCA COATÁN	
			(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
1	BP	Bosque de pino	1,261.53	3.56	625.59	1.96	4,864.47	10.53
2	BPQ	Bosque de pino-encino	4,746.06	13.38	1,353.33	4.23	2,216.23	4.80
3	BQP	Bosque de encin-pino	1,574.73	4.44	4,064.58	12.72	8,139.51	17.63
4	SMSC/VS	Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria	16,203.51	45.69	12,091.50	37.83	0.00	0.00
5	SMSC/CP	Selva mediana subcaducifolia con cultivos permanentes	0.00	0.00	0.00	0.00	9,587.30	20.76
6	SBC/VS	Selva baja subcaducifolia con vegetación secundaria	3,540.60	9.98	0.00	0.00	2,904.95	6.29
7	PAST-RAS	Pastizal razante	2,195.01	6.19	2,647.53	8.28	2,354.08	5.10
8	S-DESN	Suelos desnudos	108.27	0.31	1,073.34	3.36	9,553.38	20.69
9	UA-SDESC	Suelos en descanso con alguna cobertura	208.53	0.59	920.16	2.88	1,302.21	2.82
10	UA-CP	Uso agrícola - cultivos permanentes (mango, caña y café)	3,669.48	10.35	7,491.60	23.44	3,554.70	7.70
11	AUyPOB	Áreas urbanas y pobladas	370.35	1.04	130.59	0.41	191.30	0.41
12	VC	Vías de comunicación	1,341.27	3.78	1,237.77	3.87	1,162.65	2.52
13	C-AGUA	Corrientes de agua	240.93	0.68	320.04	1.00	340.22	0.74
14	S/CLASIFICAR		0.00	0.00	9.93	0.03	4.12	0.01
TOTAL			35,460.27	100.00	31,965.96	100.00	46,175.12	100.00

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

CP COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

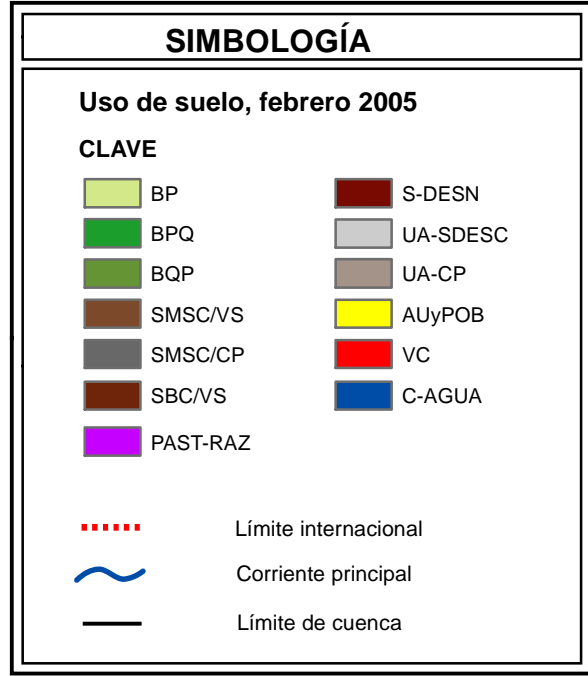
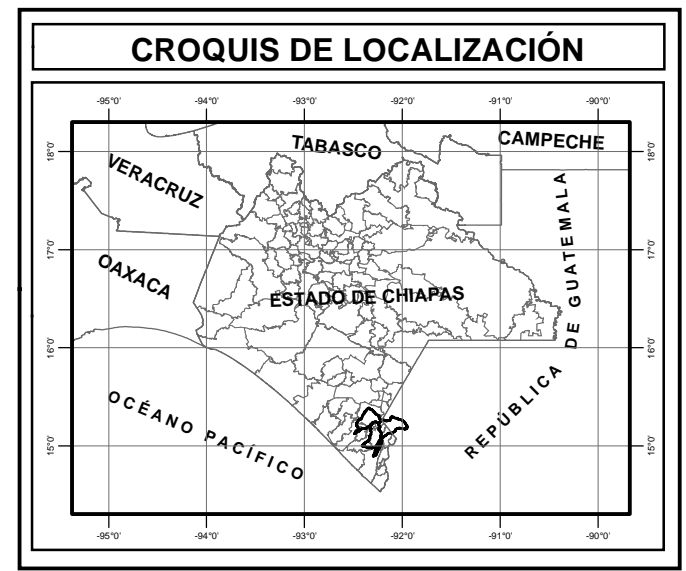
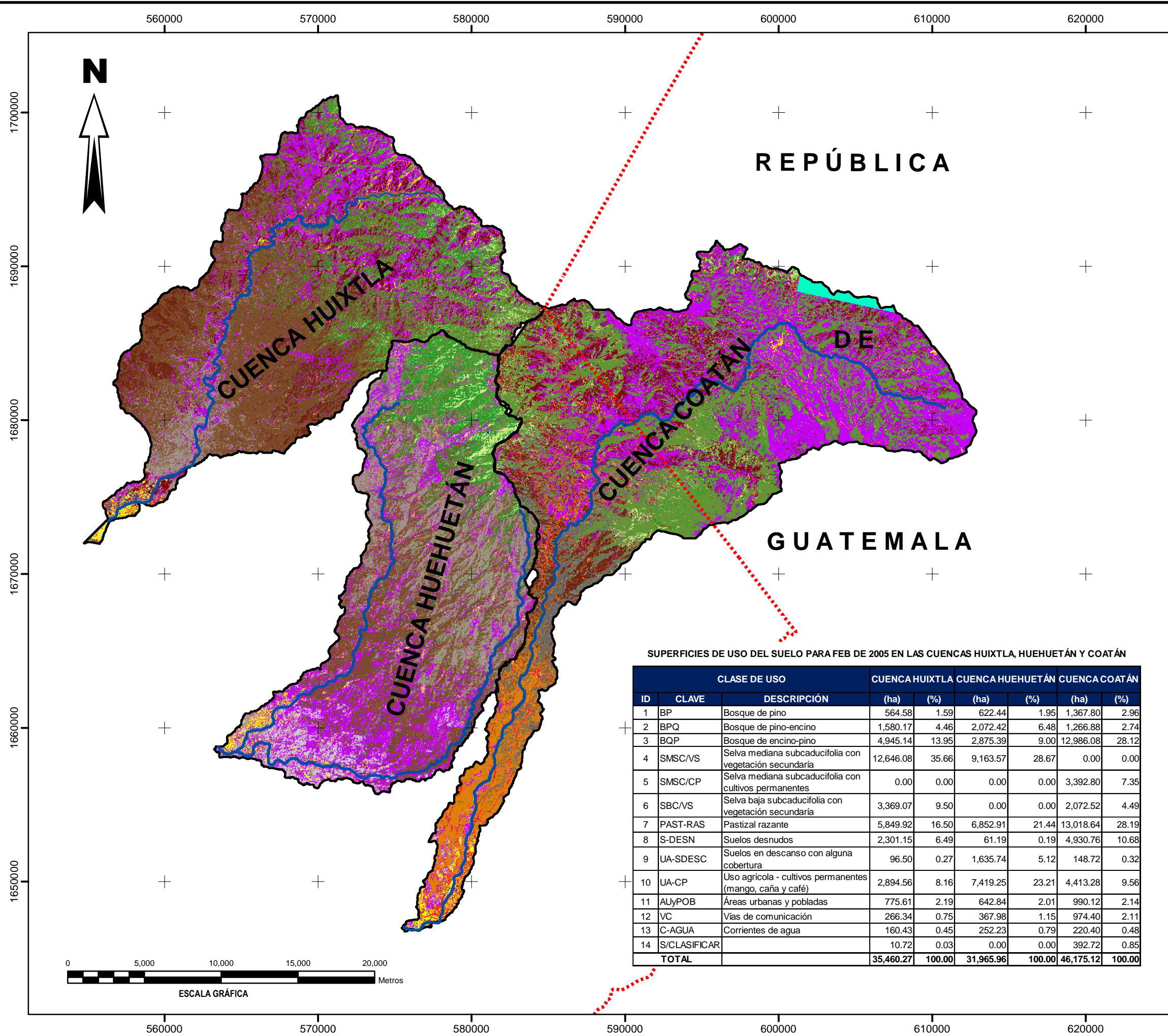
TESIS DOCTORAL

USO DE SUELO PARA NOV 1990 EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN

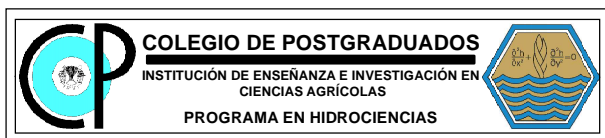
ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

REVISARON:
 DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
 DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
 DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
 DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
 DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

ESCALA 1:250,000 MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO PLANO 11 DE 28



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15



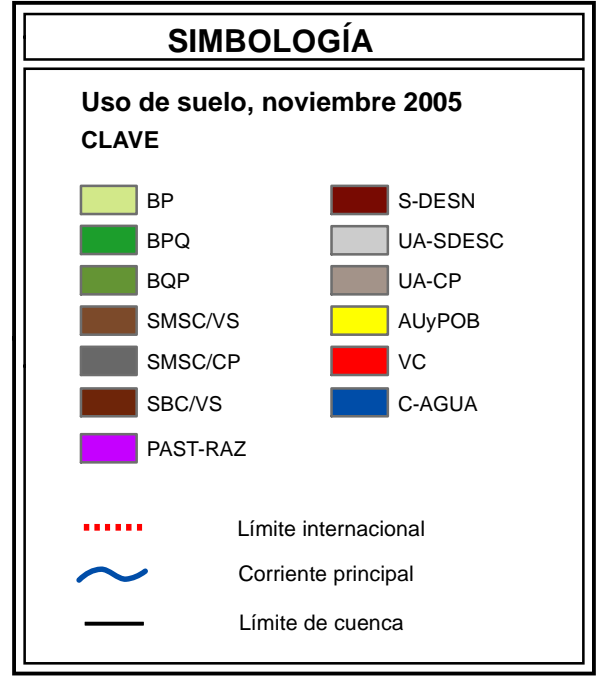
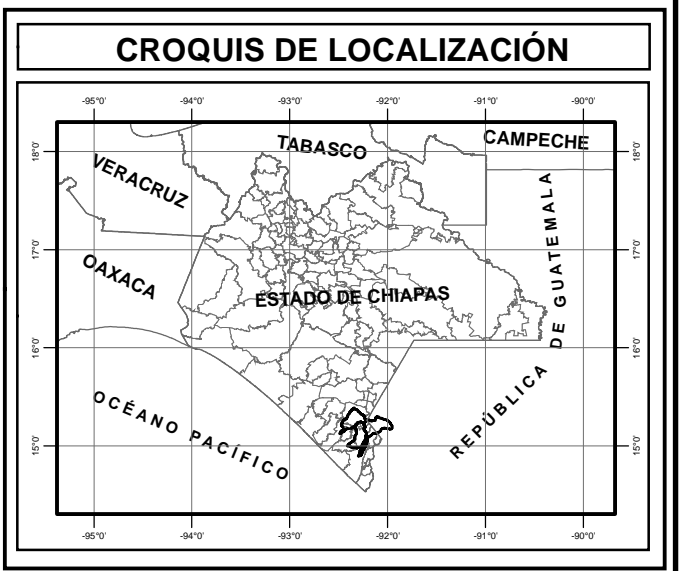
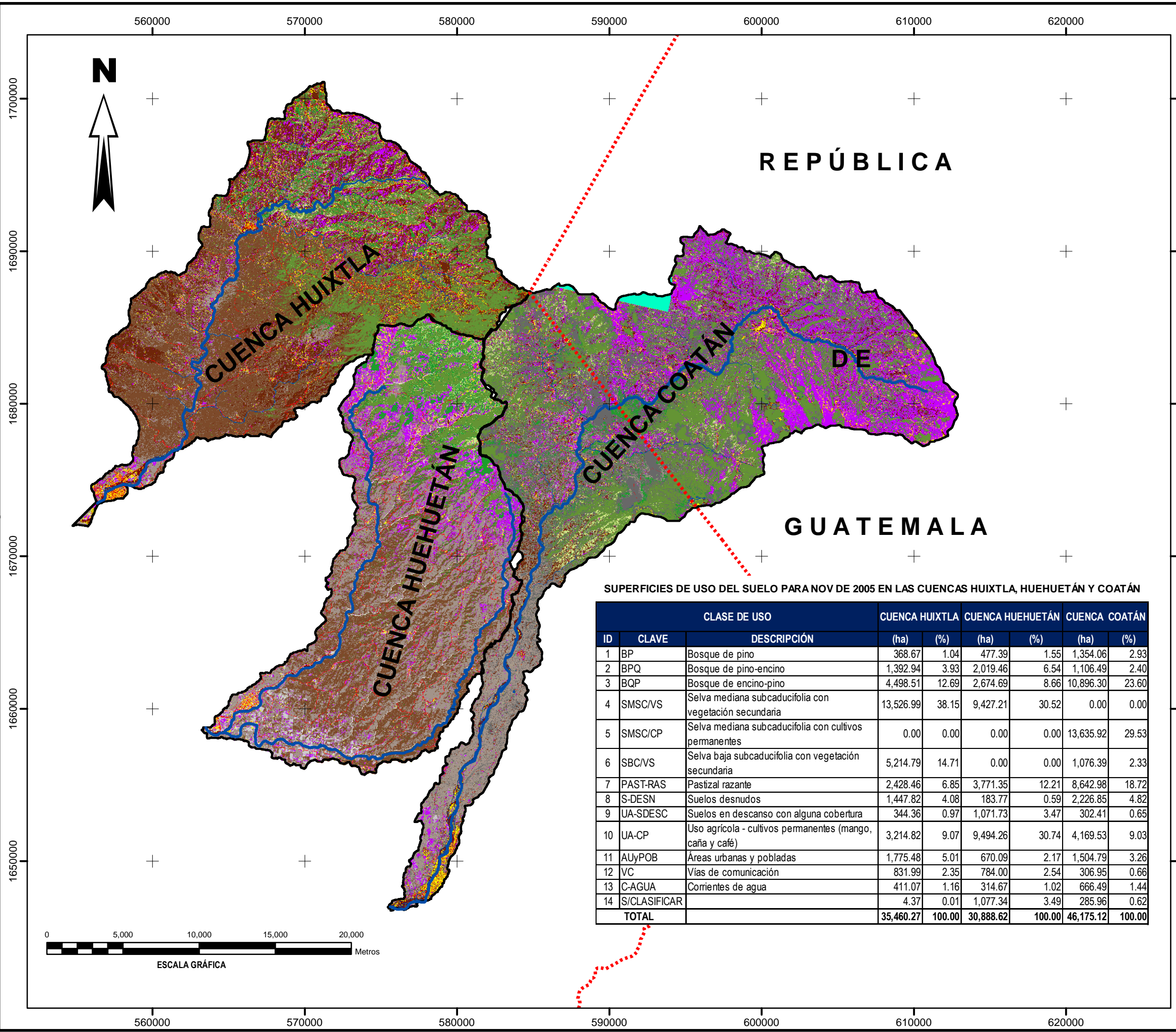
EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

USO DE SUELO PARA FEB 2005 EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN

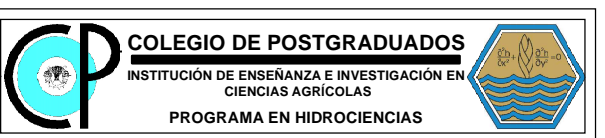
ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
 REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

SUPERFICIES DE USO DEL SUELO PARA FEB DE 2005 EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN

CLASE DE USO			CUENCA HUIXTLA		CUENCA HUEHUETÁN		CUENCA COATÁN	
ID	CLAVE	DESCRIPCIÓN	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
1	BP	Bosque de pino	564.58	1.59	622.44	1.95	1,367.80	2.96
2	BPQ	Bosque de pino-encino	1,580.17	4.46	2,072.42	6.48	1,266.88	2.74
3	BQP	Bosque de encino-pino	4,945.14	13.95	2,875.39	9.00	12,986.08	28.12
4	SMSC/VS	Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria	12,646.08	35.66	9,163.57	28.67	0.00	0.00
5	SMSC/CP	Selva mediana subcaducifolia con cultivos permanentes	0.00	0.00	0.00	0.00	3,392.80	7.35
6	SBC/VS	Selva baja subcaducifolia con vegetación secundaria	3,369.07	9.50	0.00	0.00	2,072.52	4.49
7	PAST-RAS	Pastizal razante	5,849.92	16.50	6,852.91	21.44	13,018.64	28.19
8	S-DESN	Suelos desnudos	2,301.15	6.49	61.19	0.19	4,930.76	10.68
9	UA-SDESC	Suelos en descanso con alguna cobertura	96.50	0.27	1,635.74	5.12	148.72	0.32
10	UA-CP	Uso agrícola - cultivos permanentes (mango, caña y café)	2,894.56	8.16	7,419.25	23.21	4,413.28	9.56
11	AUyPOB	Áreas urbanas y pobladas	775.61	2.19	642.84	2.01	990.12	2.14
12	VC	Vías de comunicación	266.34	0.75	367.98	1.15	974.40	2.11
13	C-AGUA	Corrientes de agua	160.43	0.45	252.23	0.79	220.40	0.48
14	S/CLASIFICAR		10.72	0.03	0.00	0.00	392.72	0.85
TOTAL			35,460.27	100.00	31,965.96	100.00	46,175.12	100.00



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15



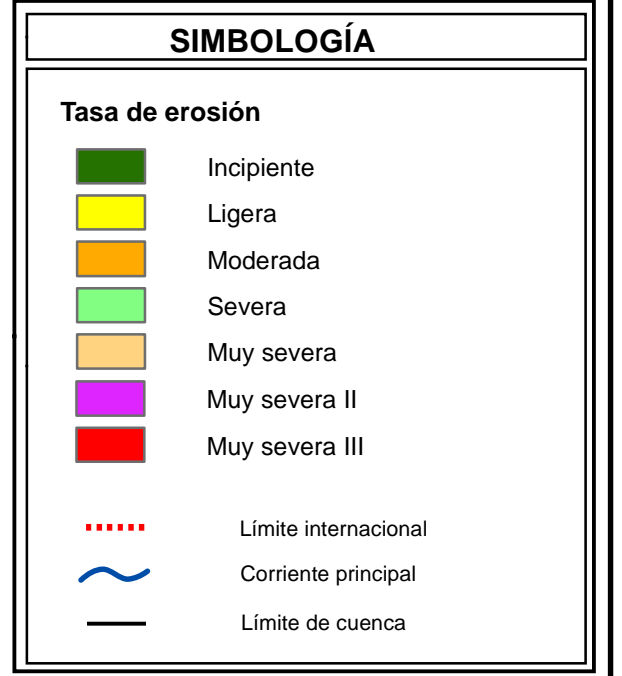
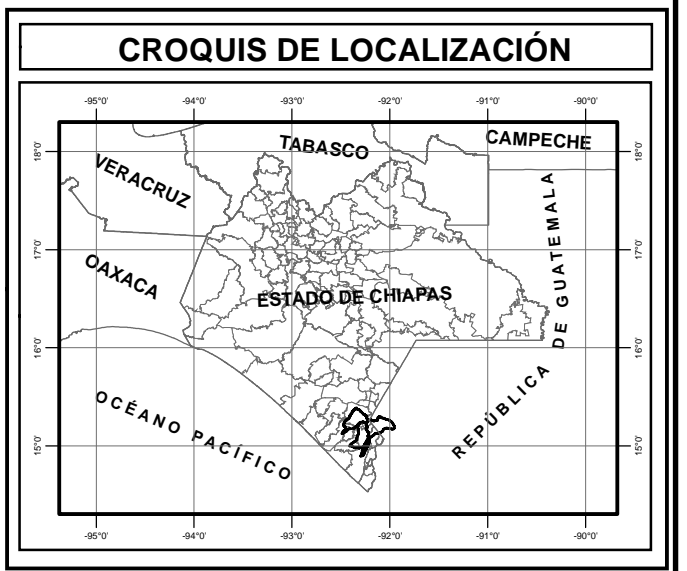
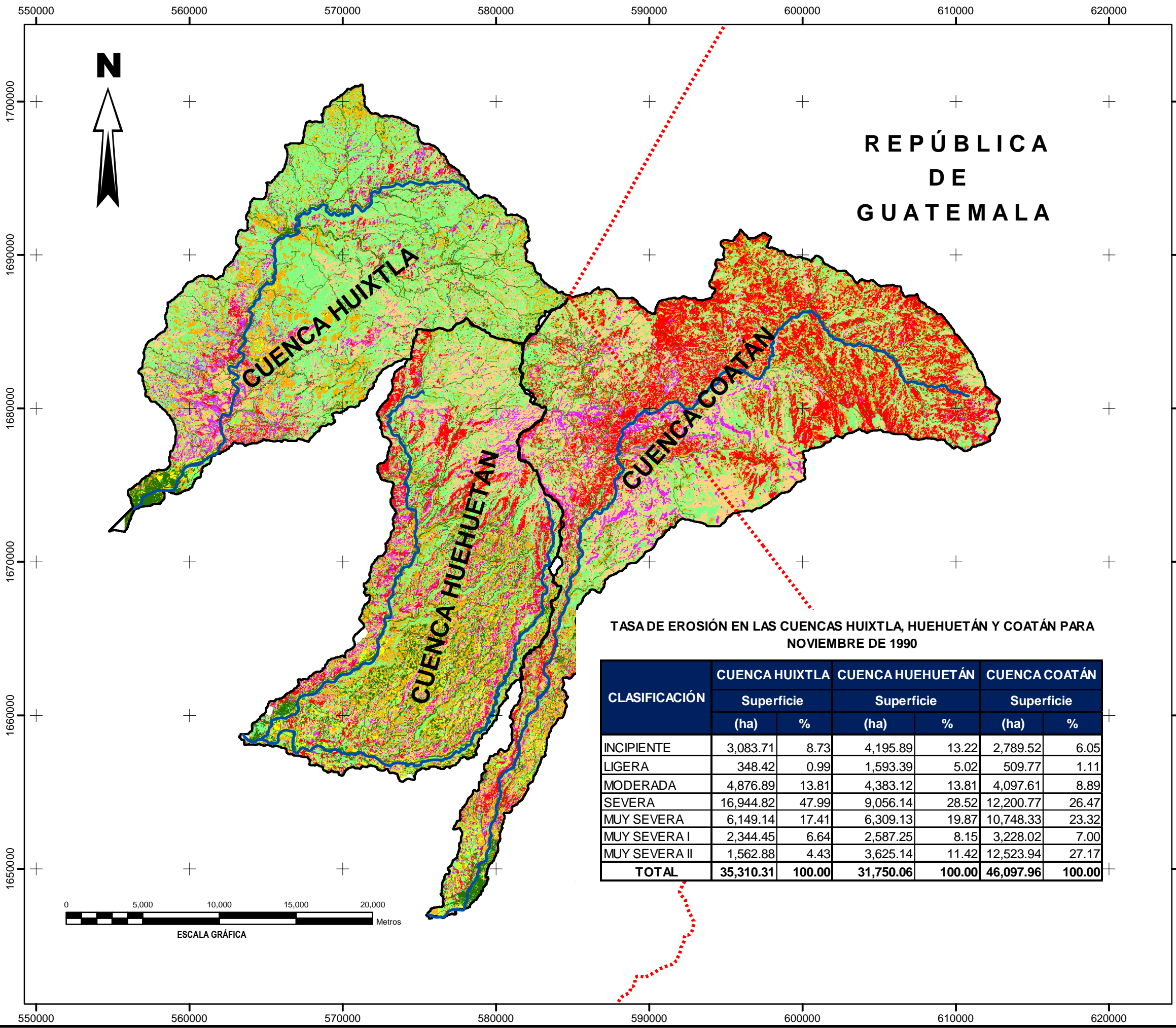
EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

USO DE SUELO PARA NOV 2005 EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
 REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTEROSSO, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

SUPERFICIES DE USO DEL SUELO PARA NOV DE 2005 EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN

CLASE DE USO			CUENCA HUIXTLA		CUENCA HUEHUETÁN		CUENCA COATÁN	
ID	CLAVE	DESCRIPCIÓN	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
1	BP	Bosque de pino	368.67	1.04	477.39	1.55	1,354.06	2.93
2	BPQ	Bosque de pino-encino	1,392.94	3.93	2,019.46	6.54	1,106.49	2.40
3	BQP	Bosque de encino-pino	4,498.51	12.69	2,674.69	8.66	10,896.30	23.60
4	SMSC/VS	Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria	13,526.99	38.15	9,427.21	30.52	0.00	0.00
5	SMSC/CP	Selva mediana subcaducifolia con cultivos permanentes	0.00	0.00	0.00	0.00	13,635.92	29.53
6	SBC/VS	Selva baja subcaducifolia con vegetación secundaria	5,214.79	14.71	0.00	0.00	1,076.39	2.33
7	PAST-RAS	Pastizal razante	2,428.46	6.85	3,771.35	12.21	8,642.98	18.72
8	S-DESN	Suelos desnudos	1,447.82	4.08	183.77	0.59	2,226.85	4.82
9	UA-SDESC	Suelos en descanso con alguna cobertura	344.36	0.97	1,071.73	3.47	302.41	0.65
10	UA-CP	Uso agrícola - cultivos permanentes (mango, caña y café)	3,214.82	9.07	9,494.26	30.74	4,169.53	9.03
11	AUyPOB	Áreas urbanas y pobladas	1,775.48	5.01	670.09	2.17	1,504.79	3.26
12	VC	Vías de comunicación	831.99	2.35	784.00	2.54	306.95	0.66
13	C-AGUA	Corrientes de agua	411.07	1.16	314.67	1.02	666.49	1.44
14	S/CLASIFICAR		4.37	0.01	1,077.34	3.49	285.96	0.62
TOTAL			35,460.27	100.00	30,888.62	100.00	46,175.12	100.00



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

CP COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

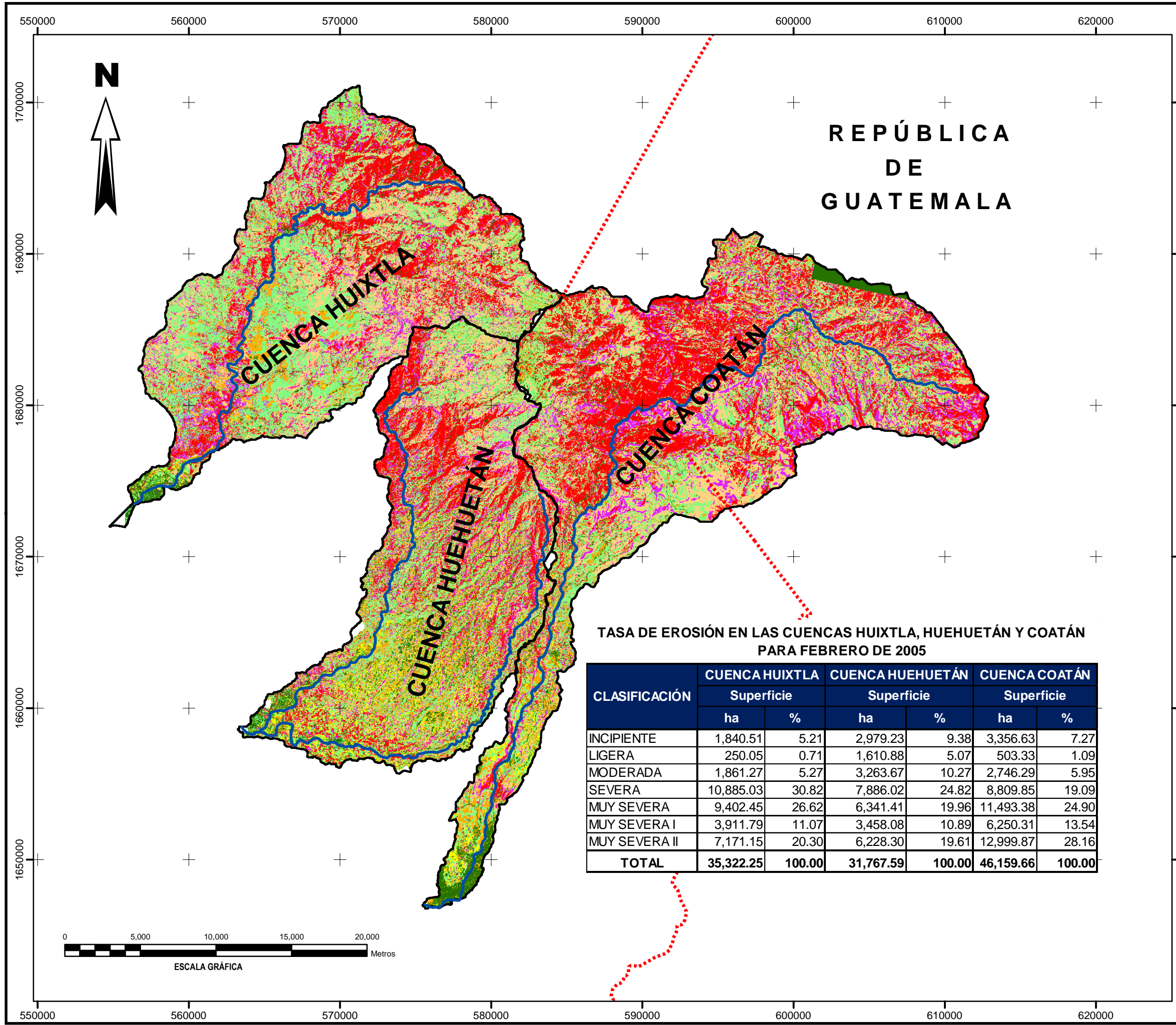
TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 1990

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
 REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

ESCALA 1:250,000 MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO PLANO 14 DE 28

TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 1990

CLASIFICACIÓN	CUENCA HUIXTLA		CUENCA HUEHUETÁN		CUENCA COATÁN	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
INCIPIENTE	3,083.71	8.73	4,195.89	13.22	2,789.52	6.05
LIGERA	348.42	0.99	1,593.39	5.02	509.77	1.11
MODERADA	4,876.89	13.81	4,383.12	13.81	4,097.61	8.89
SEVERA	16,944.82	47.99	9,056.14	28.52	12,200.77	26.47
MUY SEVERA	6,149.14	17.41	6,309.13	19.87	10,748.33	23.32
MUY SEVERA I	2,344.45	6.64	2,587.25	8.15	3,228.02	7.00
MUY SEVERA II	1,562.88	4.43	3,625.14	11.42	12,523.94	27.17
TOTAL	35,310.31	100.00	31,750.06	100.00	46,097.96	100.00



REPÚBLICA
DE
GUATEMALA

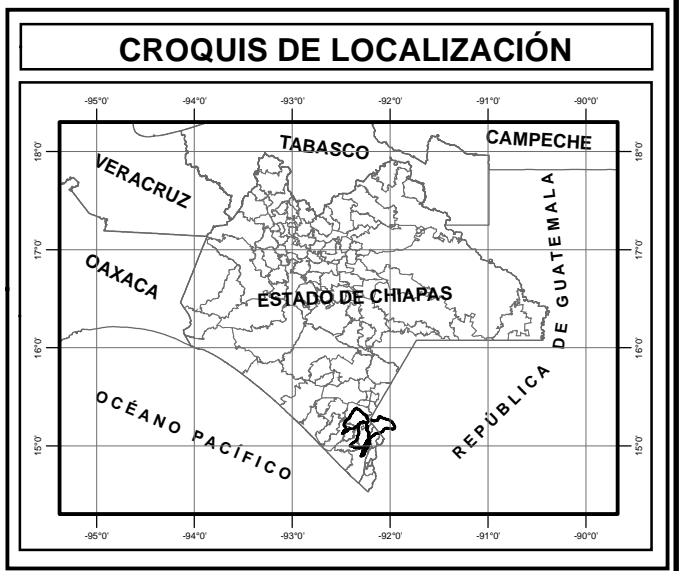
CUENCA HUIXTLA

CUENCA HUEHUETÁN

CUENCA COATÁN

TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA FEBRERO DE 2005

CLASIFICACIÓN	CUENCA HUIXTLA		CUENCA HUEHUETÁN		CUENCA COATÁN	
	Superficie ha	%	Superficie ha	%	Superficie ha	%
INCIPIENTE	1,840.51	5.21	2,979.23	9.38	3,356.63	7.27
LIGERA	250.05	0.71	1,610.88	5.07	503.33	1.09
MODERADA	1,861.27	5.27	3,263.67	10.27	2,746.29	5.95
SEVERA	10,885.03	30.82	7,886.02	24.82	8,809.85	19.09
MUY SEVERA	9,402.45	26.62	6,341.41	19.96	11,493.38	24.90
MUY SEVERA I	3,911.79	11.07	3,458.08	10.89	6,250.31	13.54
MUY SEVERA II	7,171.15	20.30	6,228.30	19.61	12,999.87	28.16
TOTAL	35,322.25	100.00	31,767.59	100.00	46,159.66	100.00



SIMBOLOGÍA

Tasa de erosión

- Incipiente
- Ligera
- Moderada
- Severa
- Muy severa
- Muy severa II
- Muy severa III

Límite internacional
 Corriente principal
 Límite de cuenca

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

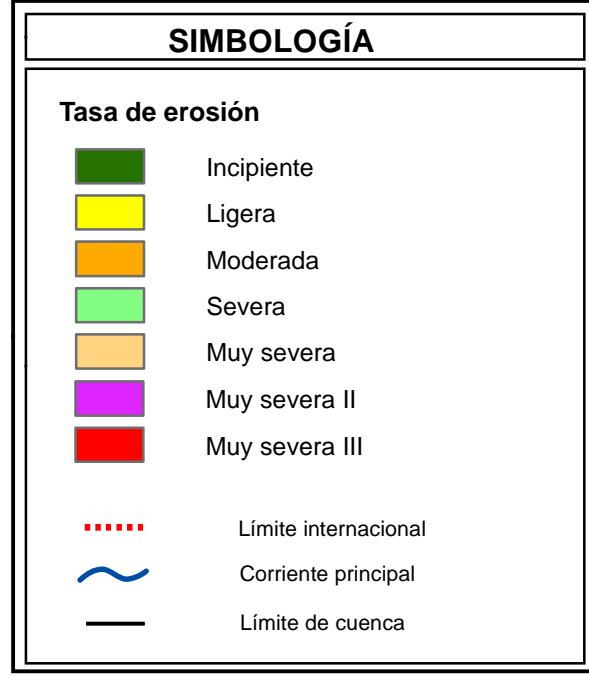
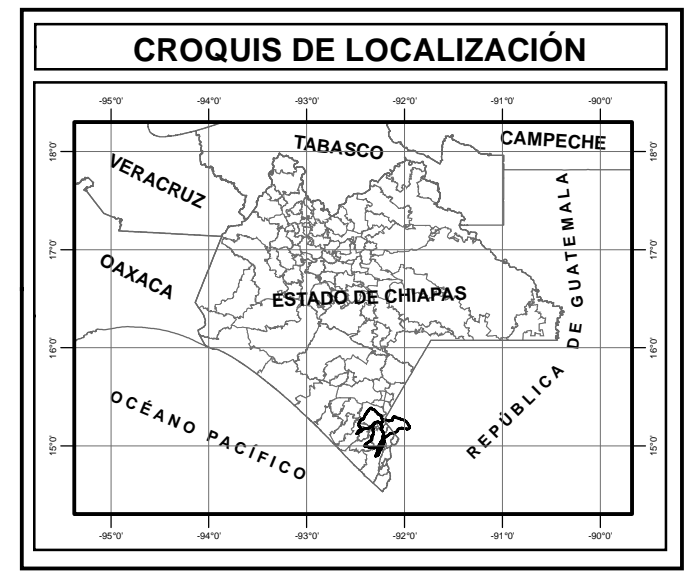
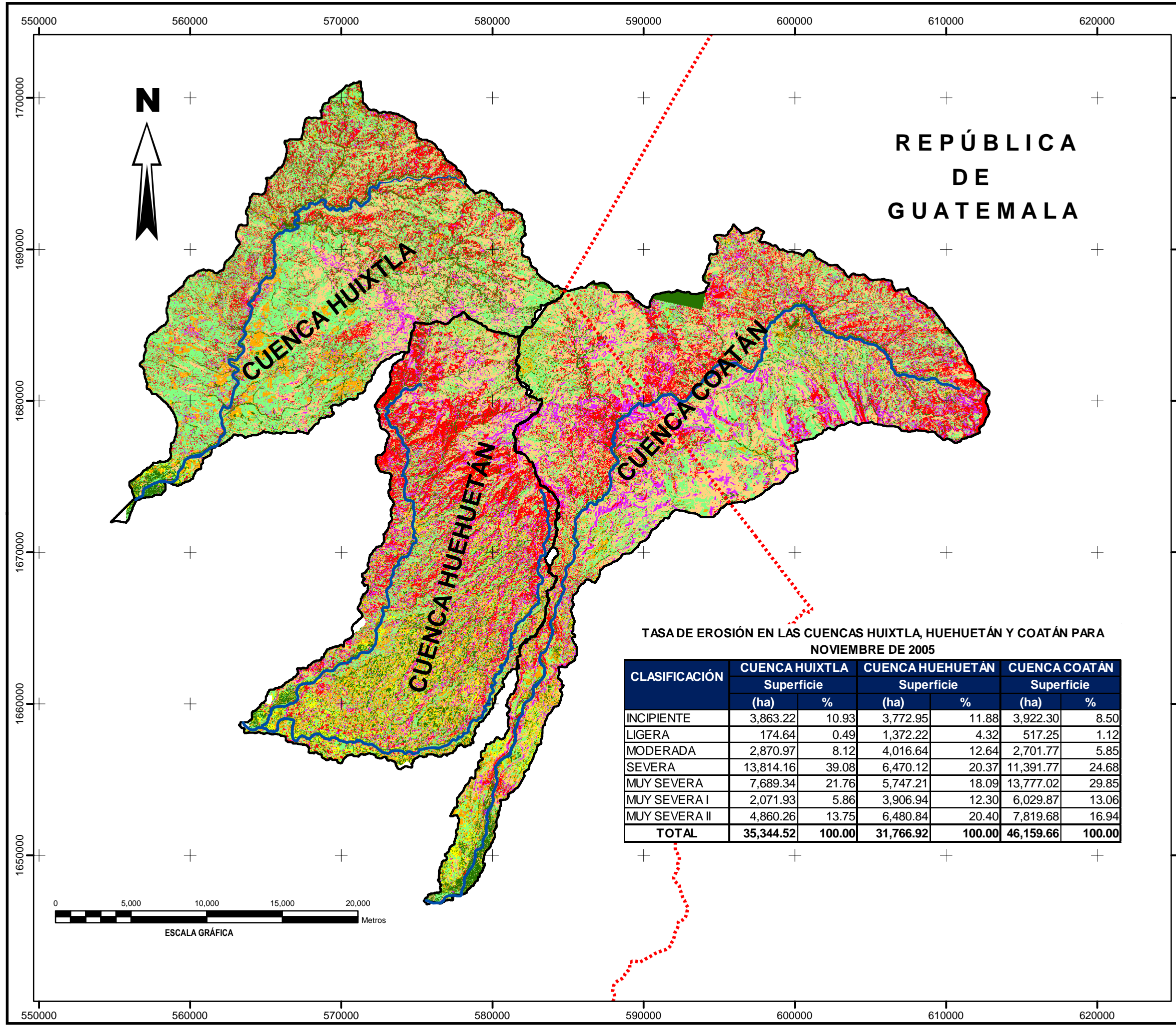
CP COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

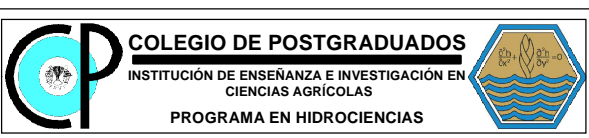
TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA FEBRERO DE 2005

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

REVISARON:
 DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
 DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
 DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
 DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
 DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universa Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15



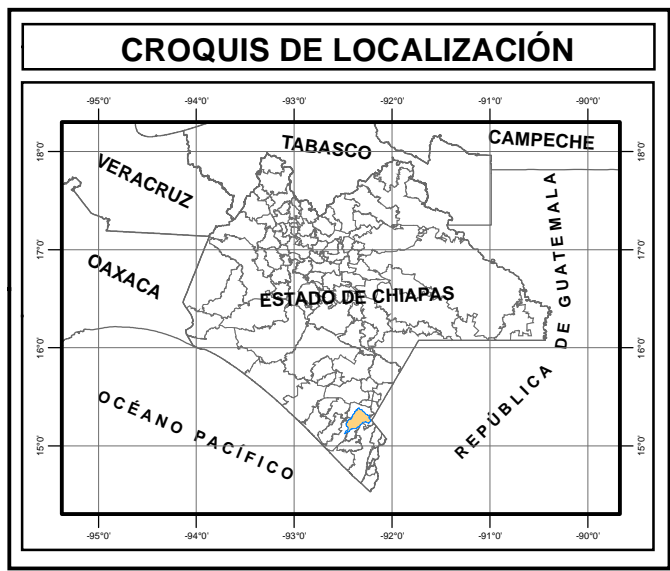
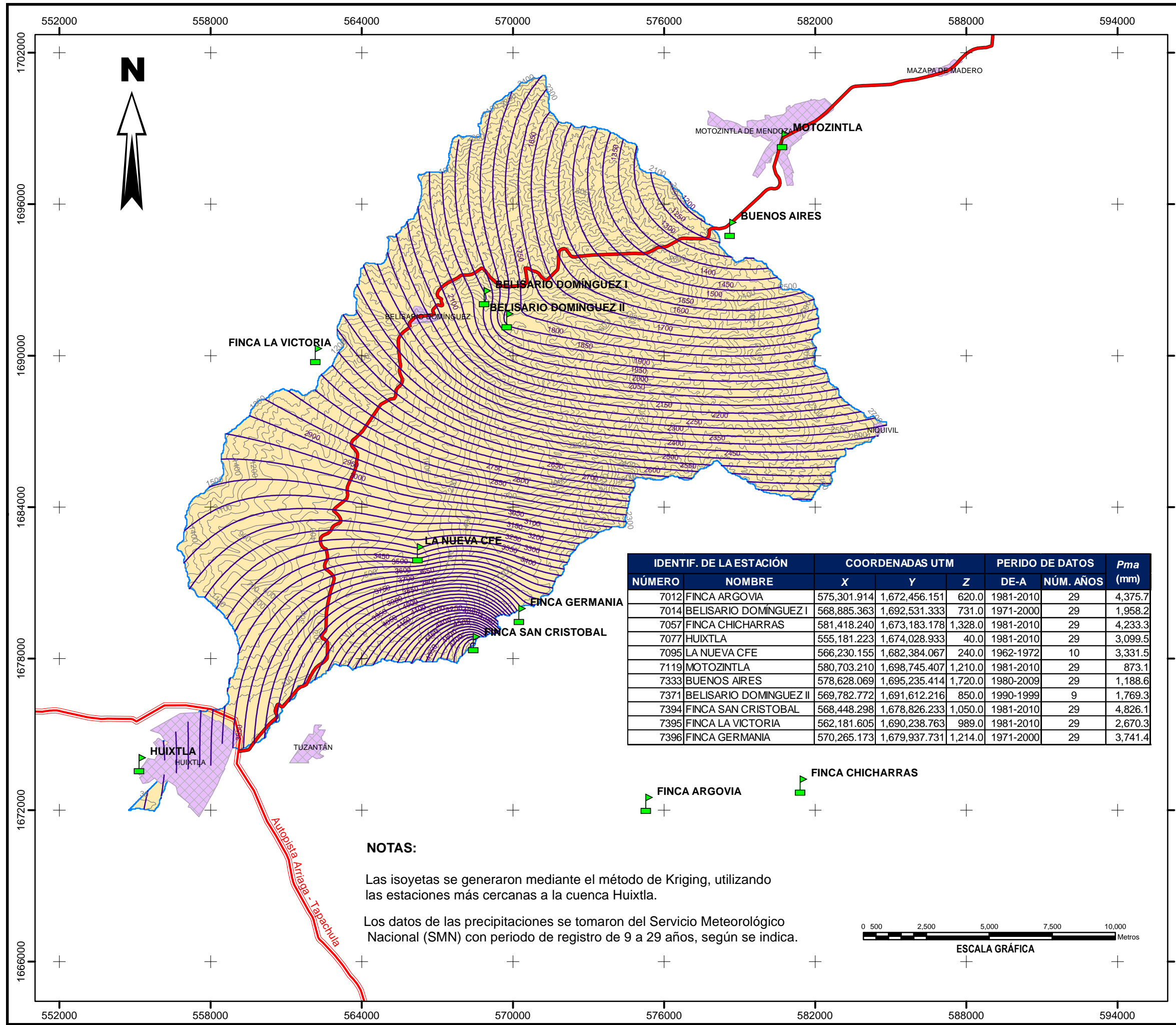
EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 2005

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

TASA DE EROSIÓN EN LAS CUENCAS HUIXTLA, HUEHUETÁN Y COATÁN PARA NOVIEMBRE DE 2005

CLASIFICACIÓN	CUENCA HUIXTLA		CUENCA HUEHUETÁN		CUENCA COATÁN	
	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%	Superficie (ha)	%
INCIPIENTE	3,863.22	10.93	3,772.95	11.88	3,922.30	8.50
LIGERA	174.64	0.49	1,372.22	4.32	517.25	1.12
MODERADA	2,870.97	8.12	4,016.64	12.64	2,701.77	5.85
SEVERA	13,814.16	39.08	6,470.12	20.37	11,391.77	24.68
MUY SEVERA	7,689.34	21.76	5,747.21	18.09	13,777.02	29.85
MUY SEVERA I	2,071.93	5.86	3,906.94	12.30	6,029.87	13.06
MUY SEVERA II	4,860.26	13.75	6,480.84	20.40	7,819.68	16.94
TOTAL	35,344.52	100.00	31,766.92	100.00	46,159.66	100.00



SIMBOLOGÍA

	Zona urbana
	Cuenca Huixtla
	Isoyetas
	Curva de nivel
	Estaciones
	Autopista
	Carretera Secundaria

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

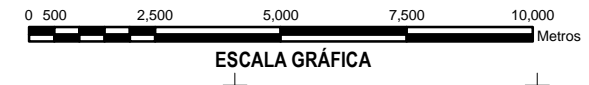
Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

IDENTIF. DE LA ESTACIÓN		COORDENADAS UTM			PERIDO DE DATOS		P _{ma} (mm)
NÚMERO	NOMBRE	X	Y	Z	DE-A	NÚM. AÑOS	
7012	FINCA ARGOVIA	575,301.914	1,672,456.151	620.0	1981-2010	29	4,375.7
7014	BELISARIO DOMÍNGUEZ I	568,885.363	1,692,531.333	731.0	1971-2000	29	1,958.2
7057	FINCA CHICHARRAS	581,418.240	1,673,183.178	1,328.0	1981-2010	29	4,233.3
7077	HUIXTLA	555,181.223	1,674,028.933	40.0	1981-2010	29	3,099.5
7095	LA NUEVA CFE	566,230.155	1,682,384.067	240.0	1962-1972	10	3,331.5
7119	MOTOZINTLA	580,703.210	1,698,745.407	1,210.0	1981-2010	29	873.1
7333	BUENOS AIRES	578,628.069	1,695,235.414	1,720.0	1980-2009	29	1,188.6
7371	BELISARIO DOMÍNGUEZ II	569,782.772	1,691,612.216	850.0	1990-1999	9	1,769.3
7394	FINCA SAN CRISTOBAL	568,448.298	1,678,826.233	1,050.0	1981-2010	29	4,826.1
7395	FINCA LA VICTORIA	562,181.605	1,690,238.763	989.0	1981-2010	29	2,670.3
7396	FINCA GERMANIA	570,265.173	1,679,937.731	1,214.0	1971-2000	29	3,741.4

NOTAS:

Las isoyetas se generaron mediante el método de Kriging, utilizando las estaciones más cercanas a la cuenca Huixtla.

Los datos de las precipitaciones se tomaron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) con periodo de registro de 9 a 29 años, según se indica.



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO AMBIENTAL

TESIS DOCTORAL

ISOYETAS DE LA CUENCA HUIXTLA

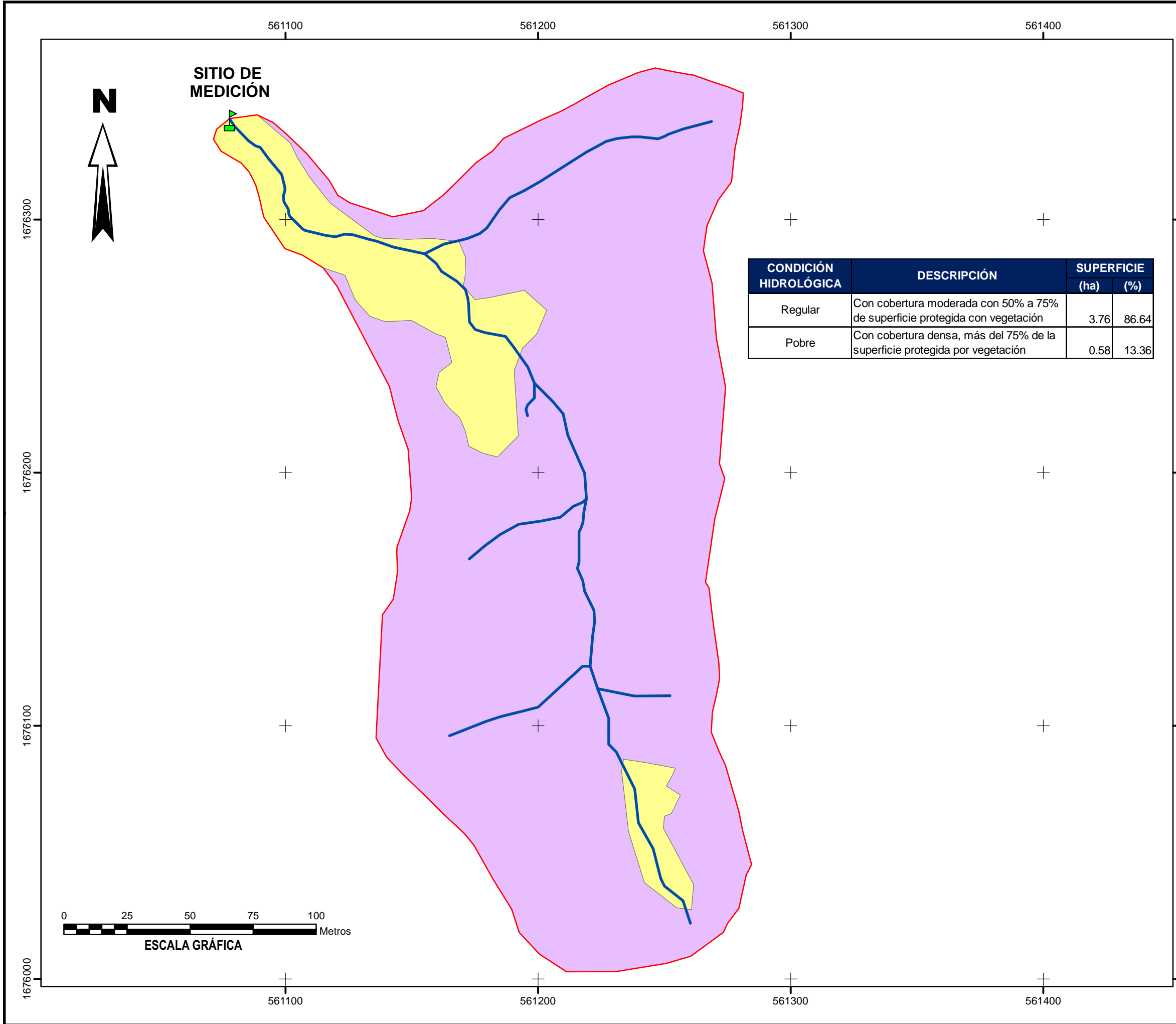
ELABORÓ:
M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

REVISARON:
DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSSA
DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

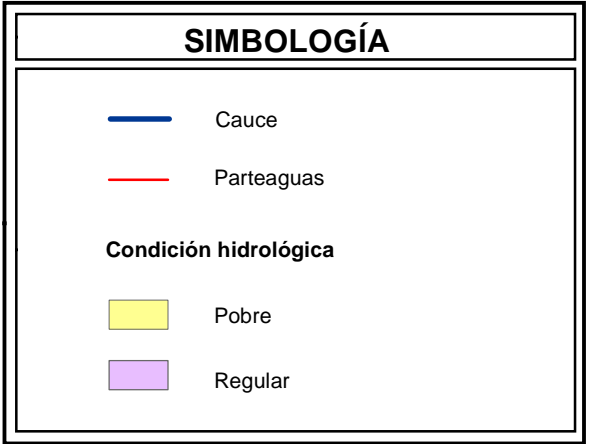
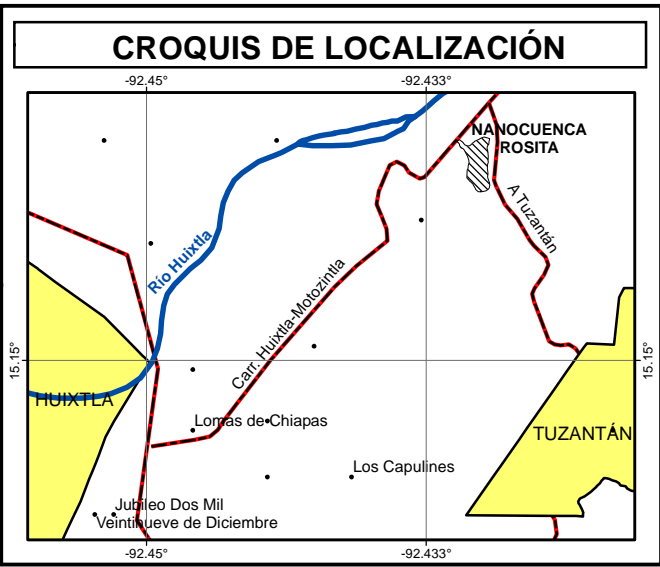
ESCALA 1:150,000

MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO

PLANO 17 DE 28



CONDICIÓN HIDROLÓGICA	DESCRIPCIÓN	SUPERFICIE	
		(ha)	(%)
Regular	Con cobertura moderada con 50% a 75% de superficie protegida con vegetación	3.76	86.64
Pobre	Con cobertura densa, más del 75% de la superficie protegida por vegetación	0.58	13.36



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

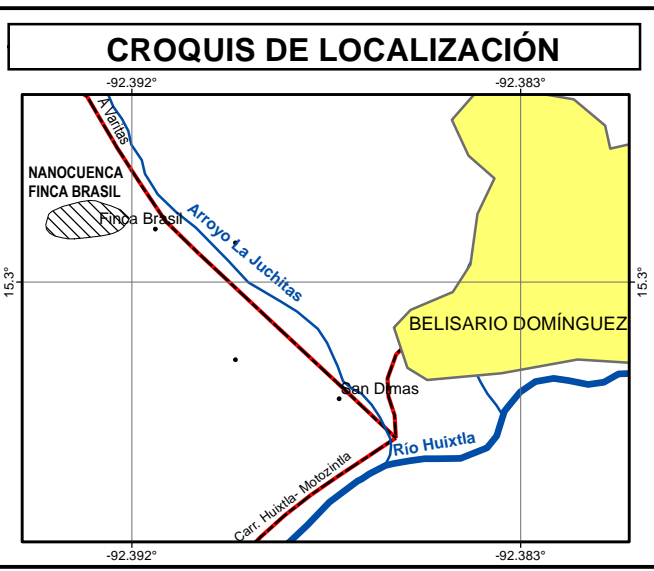
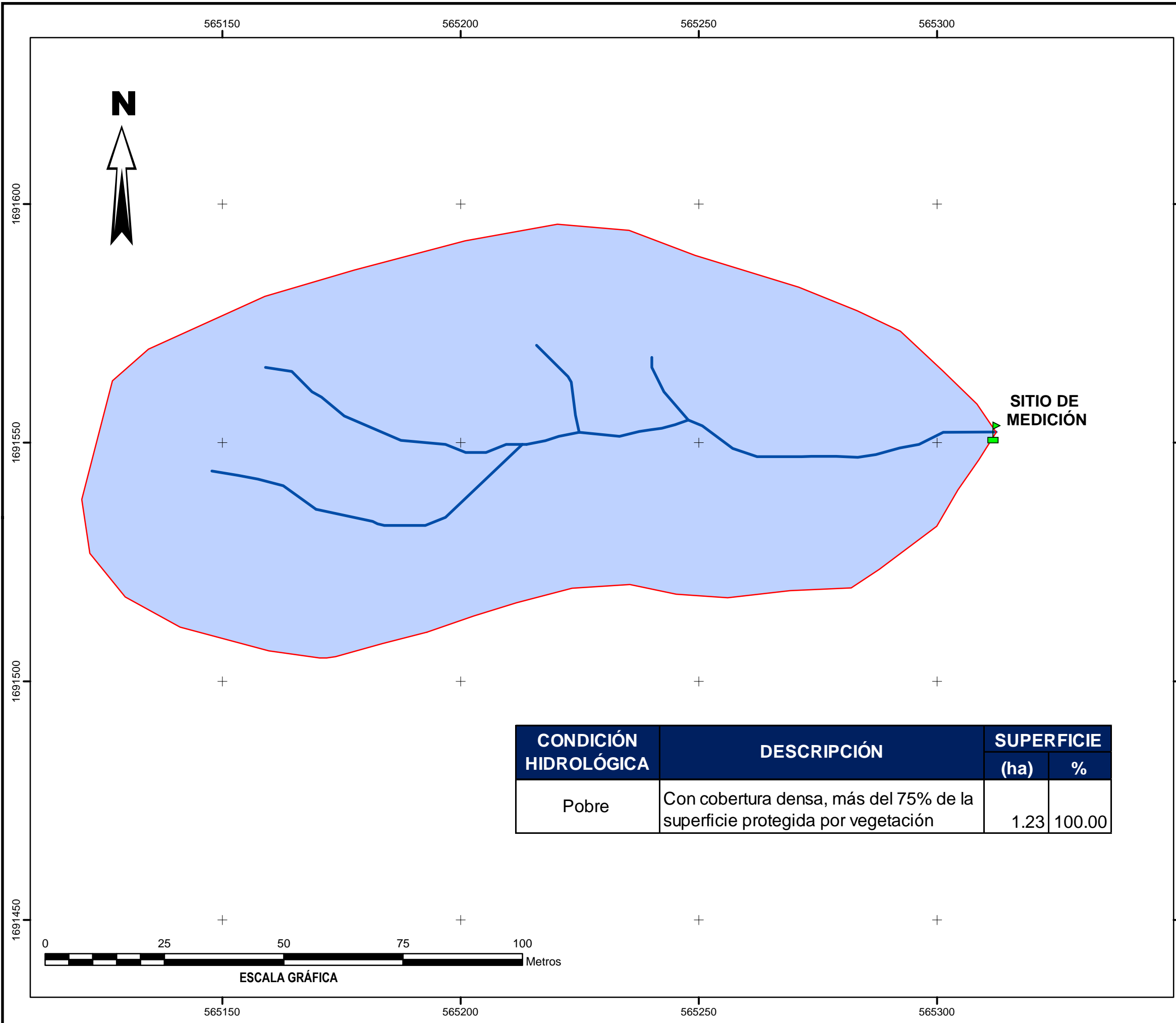
CP COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

PLANO DE CONDICIÓN HIDROLÓGICA DE LA NANOCUENCA ROSITA

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
 REVISÓ: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

ESCALA 1 : 1,500 MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO PLANO 18 DE 28



SIMBOLOGÍA

	Cauce
	Parteaguas
Condición hidrológica	
	Pobre

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

CONDICIÓN HIDROLÓGICA	DESCRIPCIÓN	SUPERFICIE	
		(ha)	%
Pobre	Con cobertura densa, más del 75% de la superficie protegida por vegetación	1.23	100.00

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

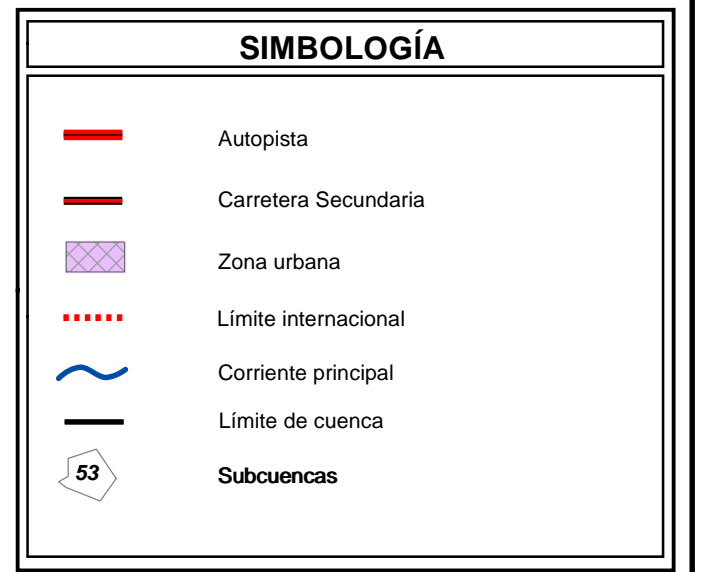
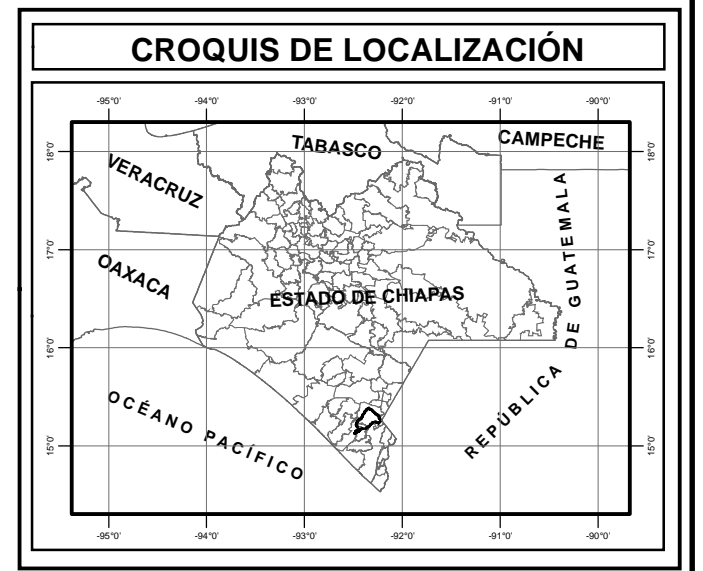
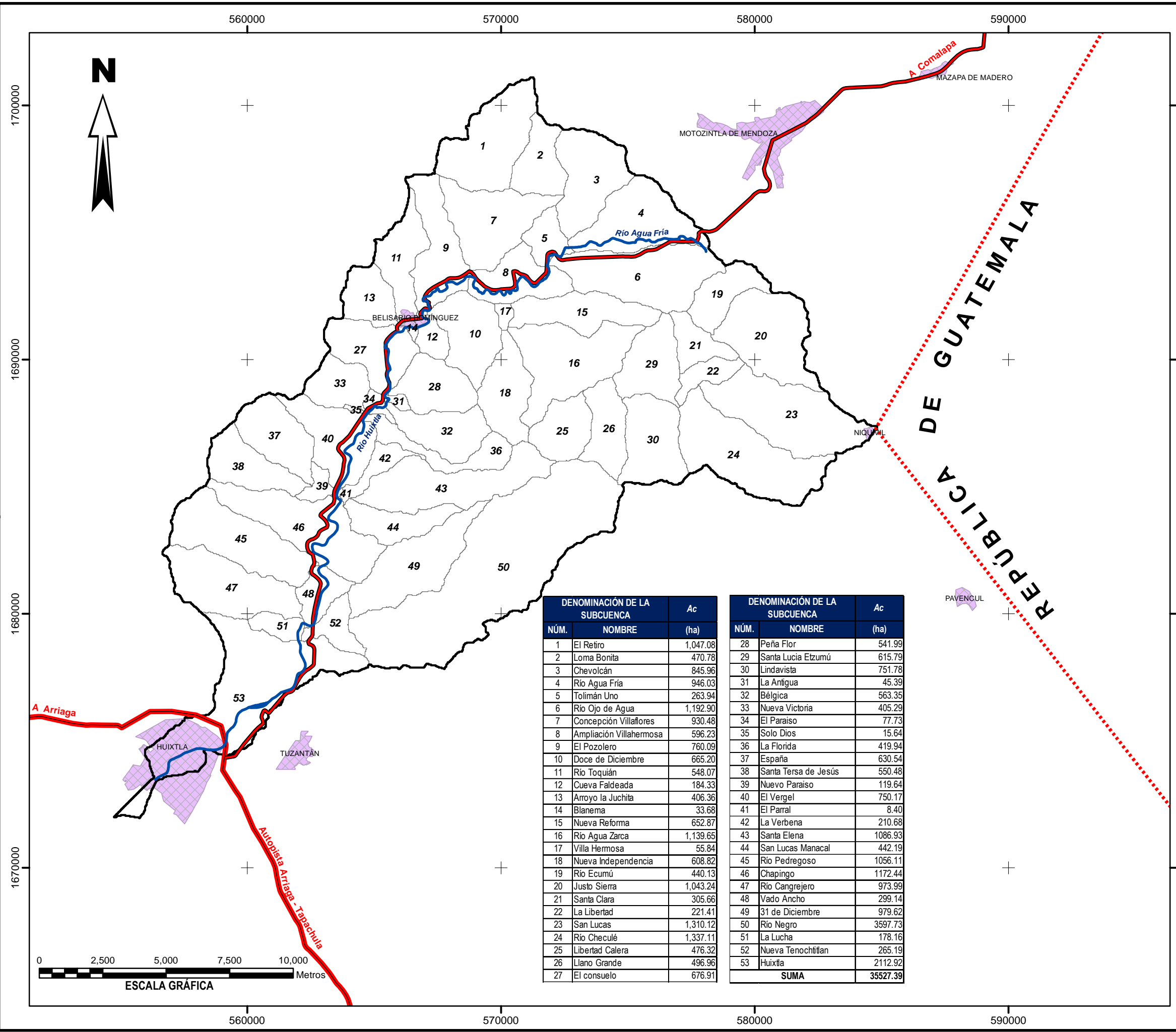
TESIS DOCTORAL

PLANO DE CONDICIÓN HIDROLÓGICA DE LA NANOCUENCA FINCA BRASIL

<p>ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO</p>	<p>REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES</p>
--	---

ESCALA 1 : 800 MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO PLANO 19 DE 28





INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
 CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

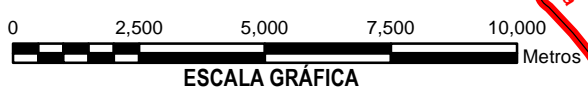
TESIS DOCTORAL

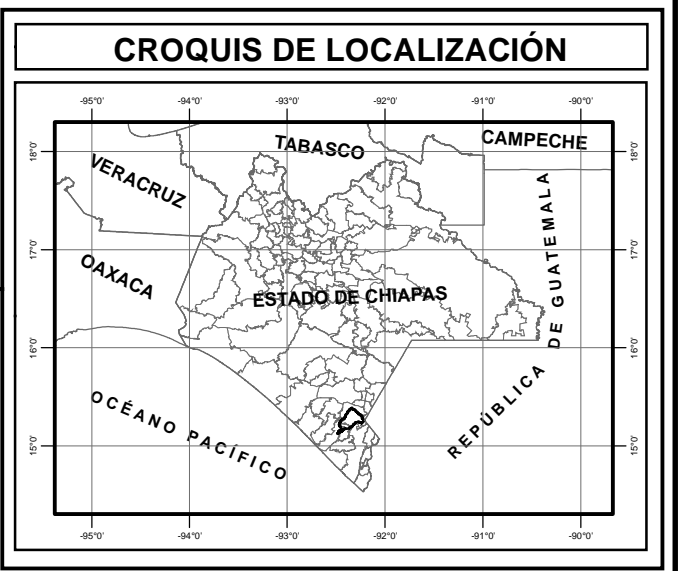
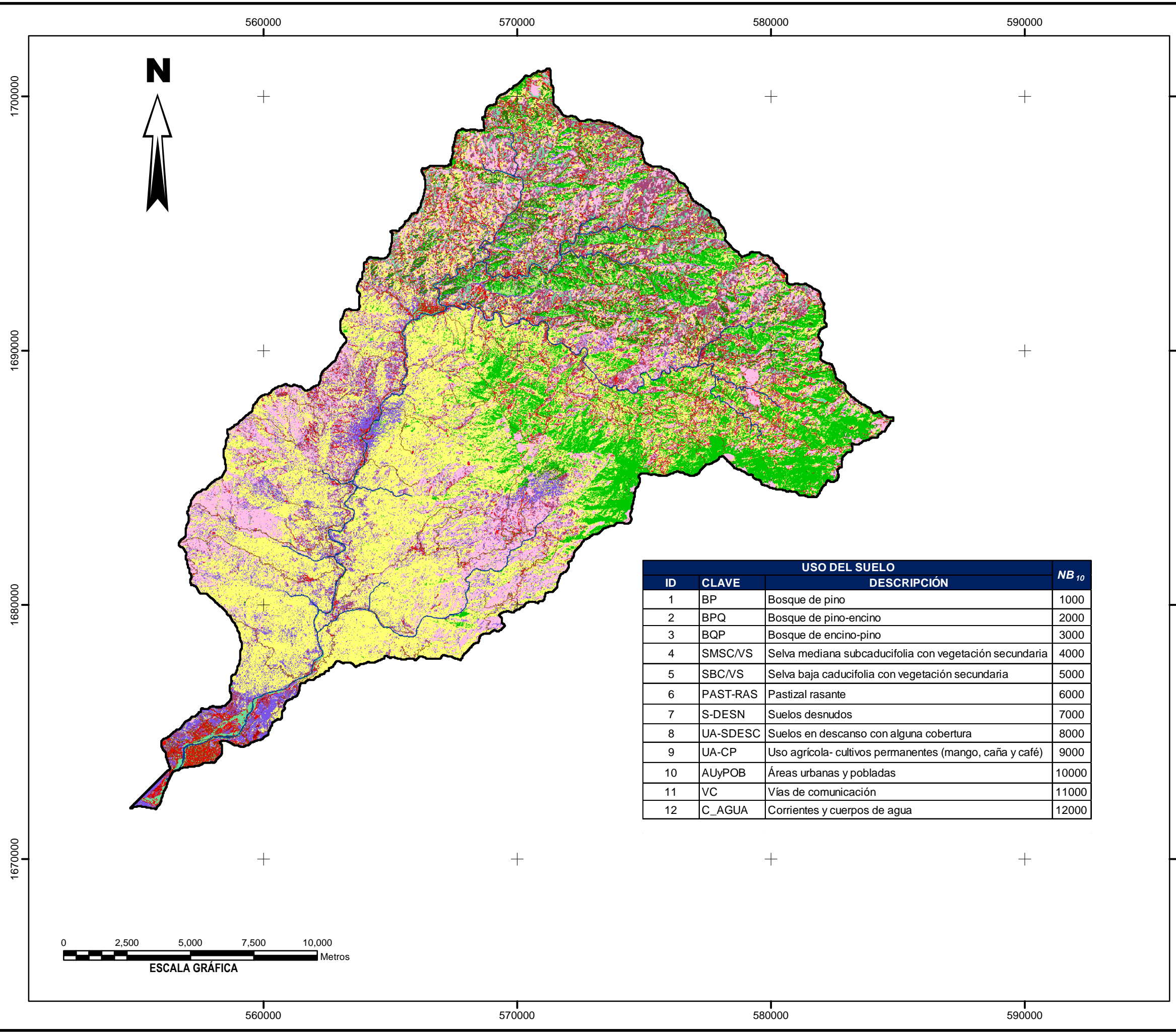
SUBCUENCAS DE LA CUENCA HUIXTLA Y SUS SUPERFICIES

ELABORÓ: **M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO**

REVISARON:
 DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
 DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
 DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
 DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
 DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA			DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA		
NÚM.	NOMBRE	Ac (ha)	NÚM.	NOMBRE	Ac (ha)
1	El Retiro	1,047.08	28	Peña Flor	541.99
2	Loma Bonita	470.78	29	Santa Lucía Etzumú	615.79
3	Chevolcán	845.96	30	Lindavista	751.78
4	Río Agua Fria	946.03	31	La Antigua	45.39
5	Tolimán Uno	263.94	32	Bélgica	563.35
6	Río Ojo de Agua	1,192.90	33	Nueva Victoria	405.29
7	Concepción Villaflores	930.48	34	El Paraíso	77.73
8	Ampliación Villahermosa	596.23	35	Solo Dios	15.64
9	El Pozolero	760.09	36	La Florida	419.94
10	Doce de Diciembre	665.20	37	España	630.54
11	Río Toquián	548.07	38	Santa Tera de Jesús	550.48
12	Cueva Faldeada	184.33	39	Nuevo Paraíso	119.64
13	Arroyo la Juchita	406.36	40	El Vergel	750.17
14	Blanema	33.68	41	El Parral	8.40
15	Nueva Reforma	652.87	42	La Verbena	210.68
16	Río Agua Zarca	1,139.65	43	Santa Elena	1086.93
17	Villa Hermosa	55.84	44	San Lucas Manacal	442.19
18	Nueva Independencia	608.82	45	Río Pedregoso	1056.11
19	Río Ecumú	440.13	46	Chapingo	1172.44
20	Justo Sierra	1,043.24	47	Río Cangrejero	973.99
21	Santa Clara	305.66	48	Vado Ancho	299.14
22	La Libertad	221.41	49	31 de Diciembre	979.62
23	San Lucas	1,310.12	50	Río Negro	3597.73
24	Río Checulé	1,337.11	51	La Lucha	178.16
25	Libertad Calera	476.32	52	Nueva Tenochtitlan	265.19
26	Llano Grande	496.96	53	Huixtla	2112.92
27	El consuelo	676.91		SUMA	35527.39





SIMBOLOGÍA

Codificación del uso del suelo con base en el NB10

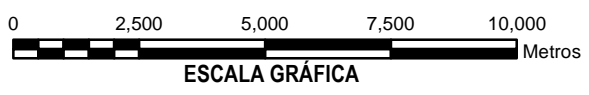
1,000	7,000
2,000	8,000
3,000	9,000
4,000	10,000
5,000	11,000
6,000	12,000


— Límite de cuenca

USO DEL SUELO			
ID	CLAVE	DESCRIPCIÓN	NB ₁₀
1	BP	Bosque de pino	1000
2	BPQ	Bosque de pino-encino	2000
3	BQP	Bosque de encino-pino	3000
4	SMSC/VS	Selva mediana subcaducifolia con vegetación secundaria	4000
5	SBC/VS	Selva baja caducifolia con vegetación secundaria	5000
6	PAST-RAS	Pastizal rasante	6000
7	S-DESN	Suelos desnudos	7000
8	UA-SDESC	Suelos en descanso con alguna cobertura	8000
9	UA-CP	Uso agrícola- cultivos permanentes (mango, caña y café)	9000
10	AUyPOB	Áreas urbanas y pobladas	10000
11	VC	Vías de comunicación	11000
12	C_AGUA	Corrientes y cuerpos de agua	12000

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15





COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS



EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

TESIS DOCTORAL

PLANO CODIFICADO DE USO DEL SUELO DE LA CUENCA HUIXTLA

ELABORÓ: **M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO**

REVISARON:
 DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
 DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
 DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
 DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
 DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

ESCALA 1:150,000 MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO PLANO 21 DE 28

560000

570000

580000

590000

N

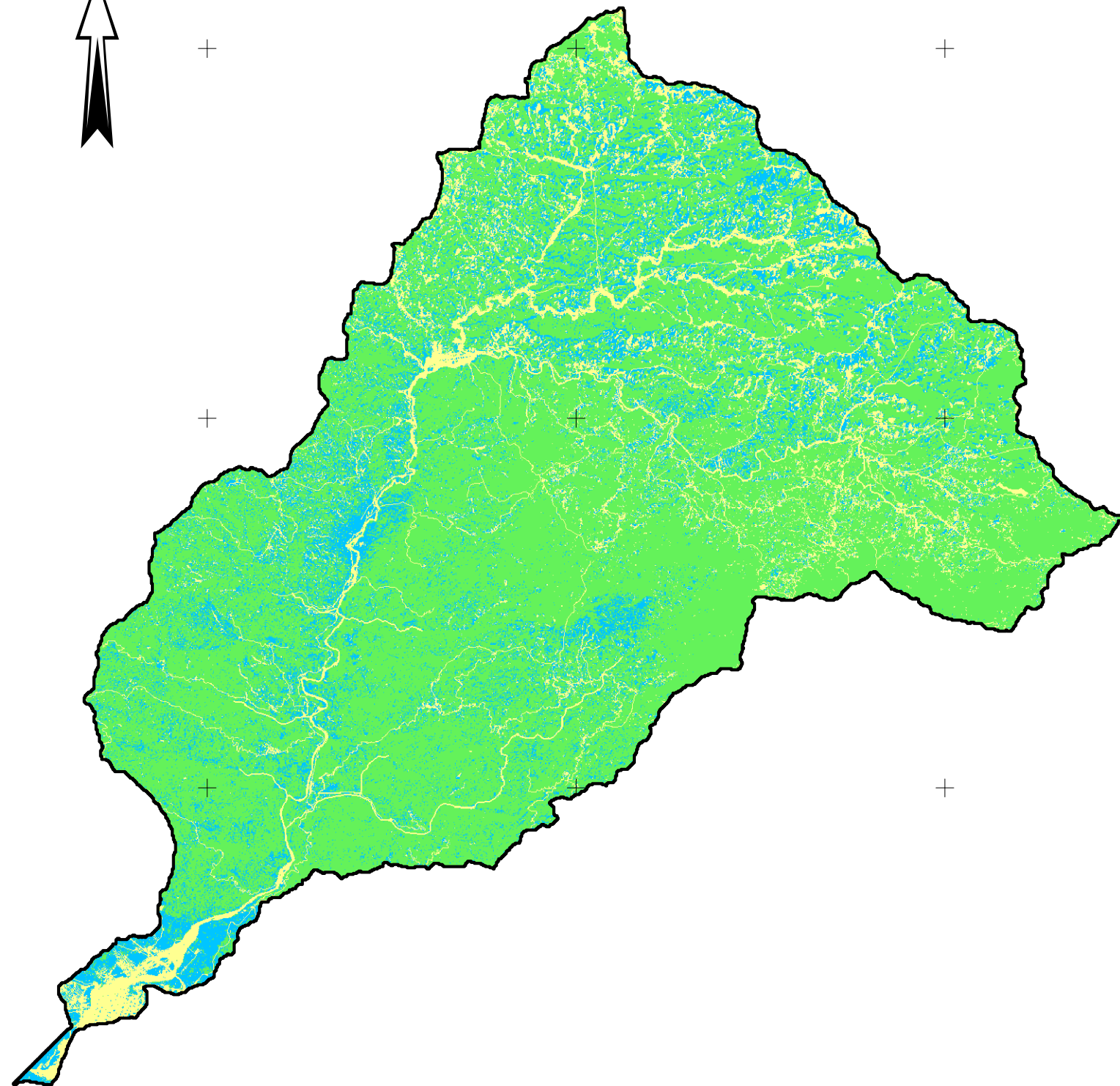


1700000

1690000

1680000

1670000



ESCALA GRÁFICA

560000

570000

580000

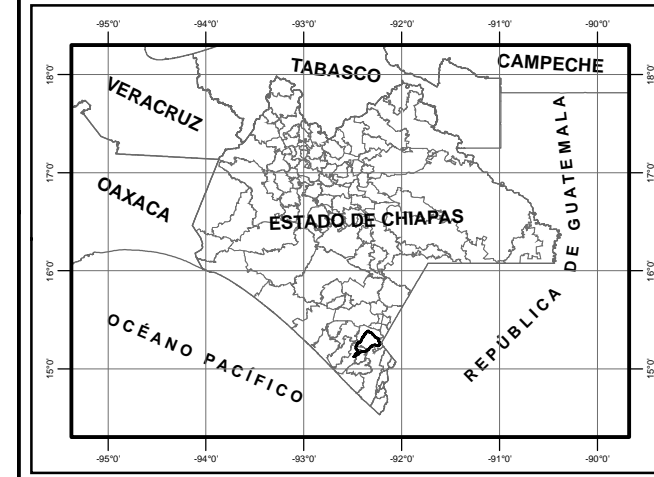
590000

CONDICIÓN HIDROLÓGICA

NB₁₀

Clases de bosque	
Buena: protegido del pastoreo de manera que el suelo siempre está cubierto de arroyo y arbustos.	100
Regular: tiene poco pastoreo, pero no se queman; pueden tener escaso mantillo o arroyo y, generalmente están protegidos del pastoreo.	200
Pobre: Tiene excesivo pastoreo, árboles pequeños, y el arroyo se destruye regularmente por incendio.	300
Clases de pradera	
Buena: tiene pastoreo ligero y las plantas cubren más del 75 % del área.	100
Regular: no tiene pastoreo excesivo y las plantas cubren del 50 % al 75 % de la superficie.	200
Pobre: tienen pastoreo excesivo y las plantas o vegetación cubren menos del 50 % del área.	300
Terrenos agrícolas o cultivos permanentes	
Buenos: Cultivos o árboles de cobertura completa, como praderas, alfalfas, cereales y completamente desarrollados	100
Regulares: Cultivos establecidos en surcos, árboles grandes y con espacios entre matas, y/o en crecimiento que implica áreas descubiertas	200
Pobres: Cultivos de escasa cobertura por el tipo de especie o por su escaso crecimiento o estado de salud precaria, que implica amplias áreas desprotegidas.	300
Terrenos agrícolas no cultivados o en pastoreo	
Buenos: tiene pastoreo ligero y restos de cosecha o malas hierbas que cubren más del 50 % del área.	100
Regulares: pastoreo intermedio y restos de cosecha o malas hierbas que cubren del 25 % al 50 % de la superficie.	200
Pobres: tienen pastoreo excesivo y restos de cosecha o malas hierbas cubren menos del 25 % del área.	300
Suelos desnudos	
Pobre. Sin ningún tipo de cobertura y laboreo.	300
Uso urbano	
Buena. Con amplias áreas planas y/o sin construir (más del 50 %) y calles sin revestir que son permeables o limitan el escurrimiento.	100
Regular. Con áreas con pendientes suaves o planas y/o con áreas sin construir (entre el 25 y el 50 %) y calles sin revestir o con revestimiento de grava, tezontle o adoquín que reducen la permeabilidad pero permiten la infiltración y reducen el escurrimiento.	200
Pobre. Con áreas con pendientes fuertes y/o con áreas sin construir menores del 25 % y calles revestidas con arcilla, asfalto o concreto que por completo la permeabilidad y propician el escurrimiento.	300
Carreteras y caminos	
Terracería. Caminos sin revestir o revestidos con grava, o tezontle, que reduce la permeabilidad pero permite aun la infiltración.	200
Pavimento. Caminos revestidos con arcilla, asfalto, concreto o mampostería junteada, que reducen por completo la permeabilidad del terreno.	300
cuerpos de agua	
Pobre. Superficies con agua estancada o con flujo que facilitan el escurrimiento.	300

CROQUIS DE LOCALIZACIÓN



SIMBOLOGÍA

Codificación de la Condición Hidrológica con base en el NB10



— Límite de cuenca

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
Elipsoide: GRS80
Datum Horizontal: ITRF92
Zona UTM: 15



EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

TESIS DOCTORAL

PLANO CODIFICADO DE CONDICIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA HUIXTLA

ELABORÓ:

M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

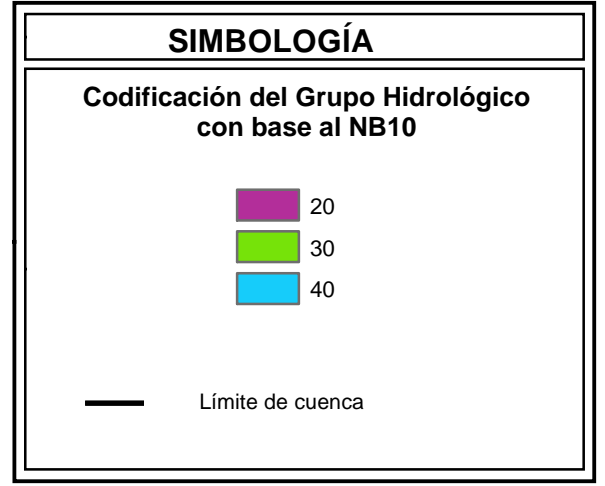
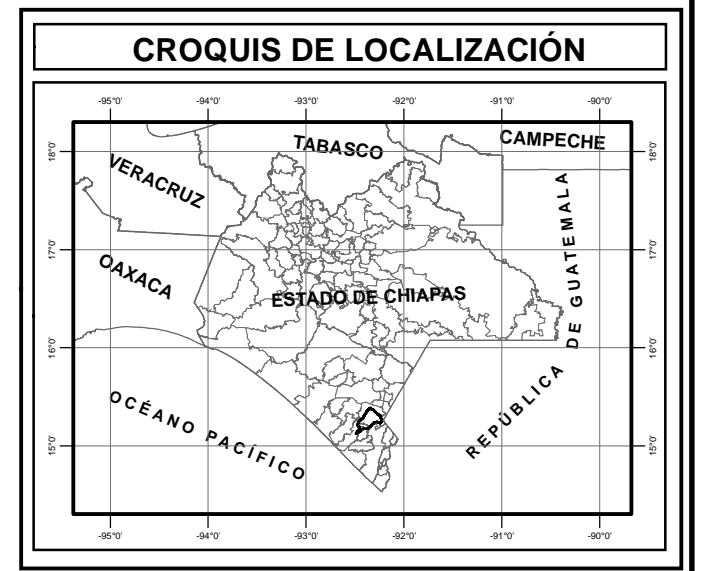
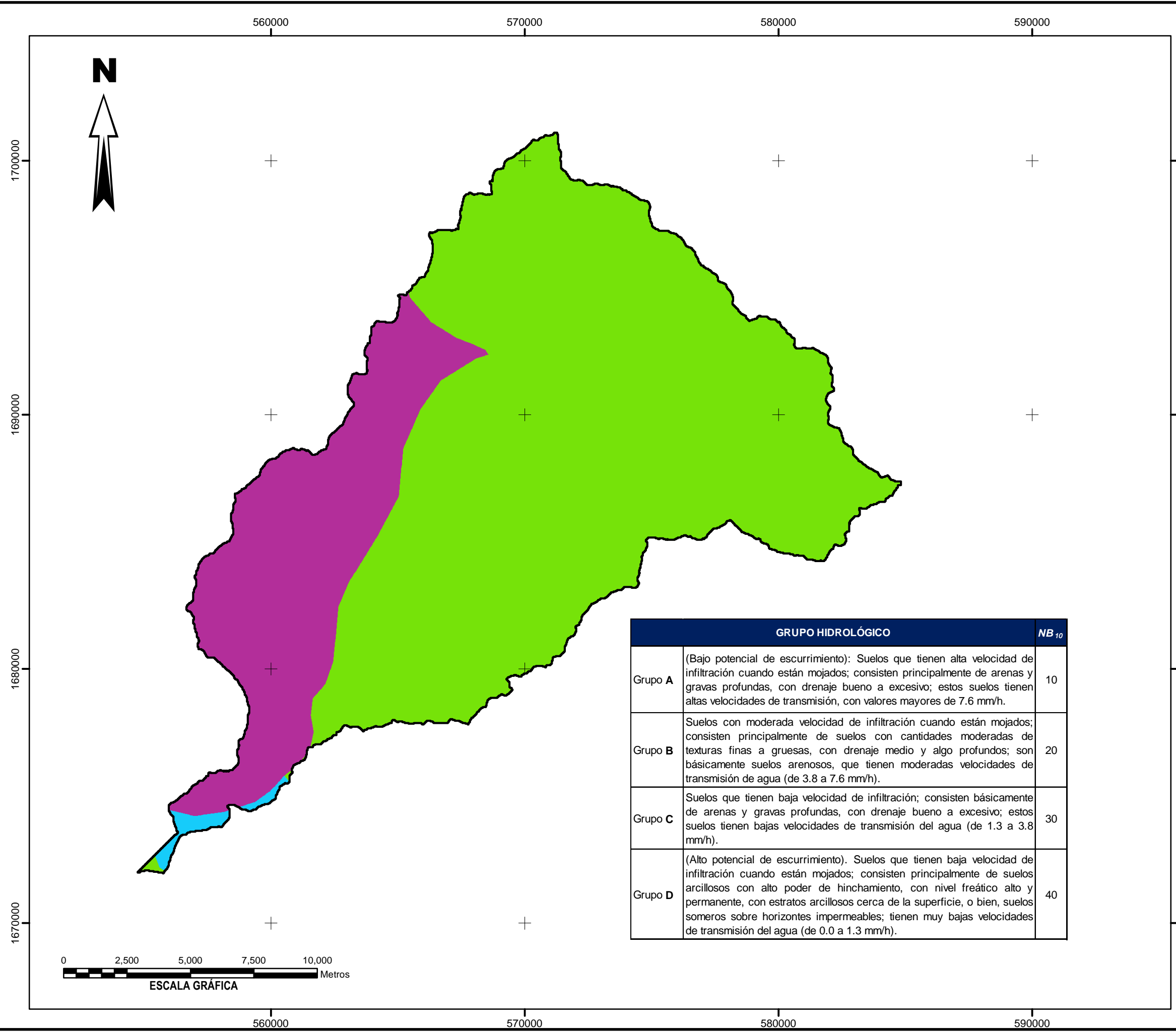
REVISARON:

DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

ESCALA 1:150,000

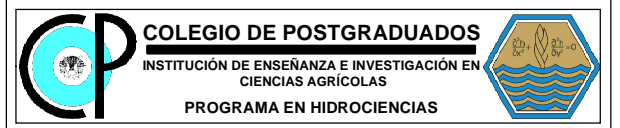
MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO

PLANO 22 DE 28



GRUPO HIDROLÓGICO		NB ₁₀
Grupo A	(Bajo potencial de escurrimiento): Suelos que tienen alta velocidad de infiltración cuando están mojados; consisten principalmente de arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo; estos suelos tienen altas velocidades de transmisión, con valores mayores de 7.6 mm/h.	10
Grupo B	Suelos con moderada velocidad de infiltración cuando están mojados; consisten principalmente de suelos con cantidades moderadas de texturas finas a gruesas, con drenaje medio y algo profundos; son básicamente suelos arenosos, que tienen moderadas velocidades de transmisión de agua (de 3.8 a 7.6 mm/h).	20
Grupo C	Suelos que tienen baja velocidad de infiltración; consisten básicamente de arenas y gravas profundas, con drenaje bueno a excesivo; estos suelos tienen bajas velocidades de transmisión del agua (de 1.3 a 3.8 mm/h).	30
Grupo D	(Alto potencial de escurrimiento). Suelos que tienen baja velocidad de infiltración cuando están mojados; consisten principalmente de suelos arcillosos con alto poder de hinchamiento, con nivel freático alto y permanente, con estratos arcillosos cerca de la superficie, o bien, suelos someros sobre horizontes impermeables; tienen muy bajas velocidades de transmisión del agua (de 0.0 a 1.3 mm/h).	40

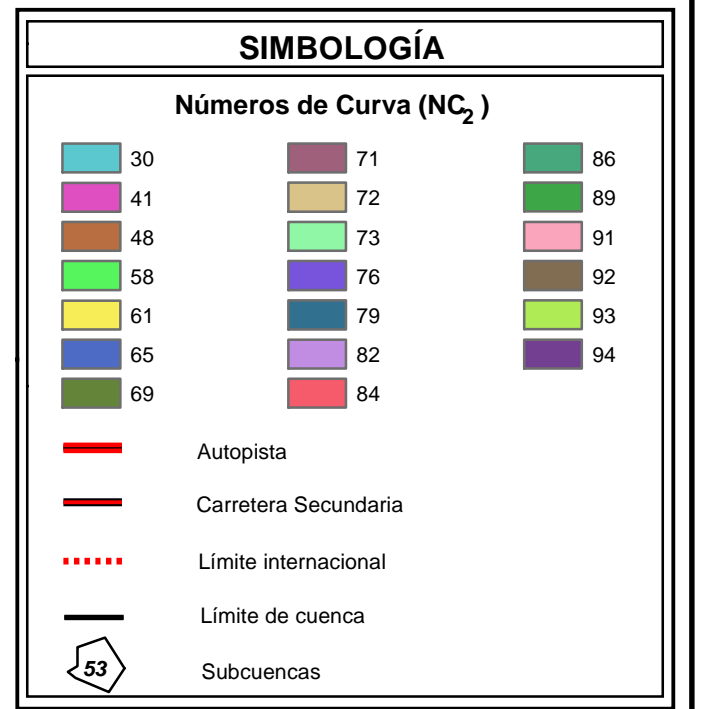
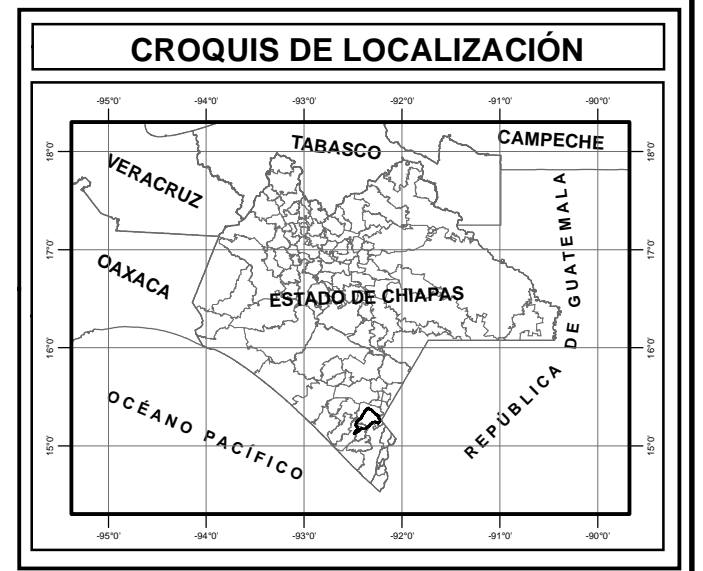
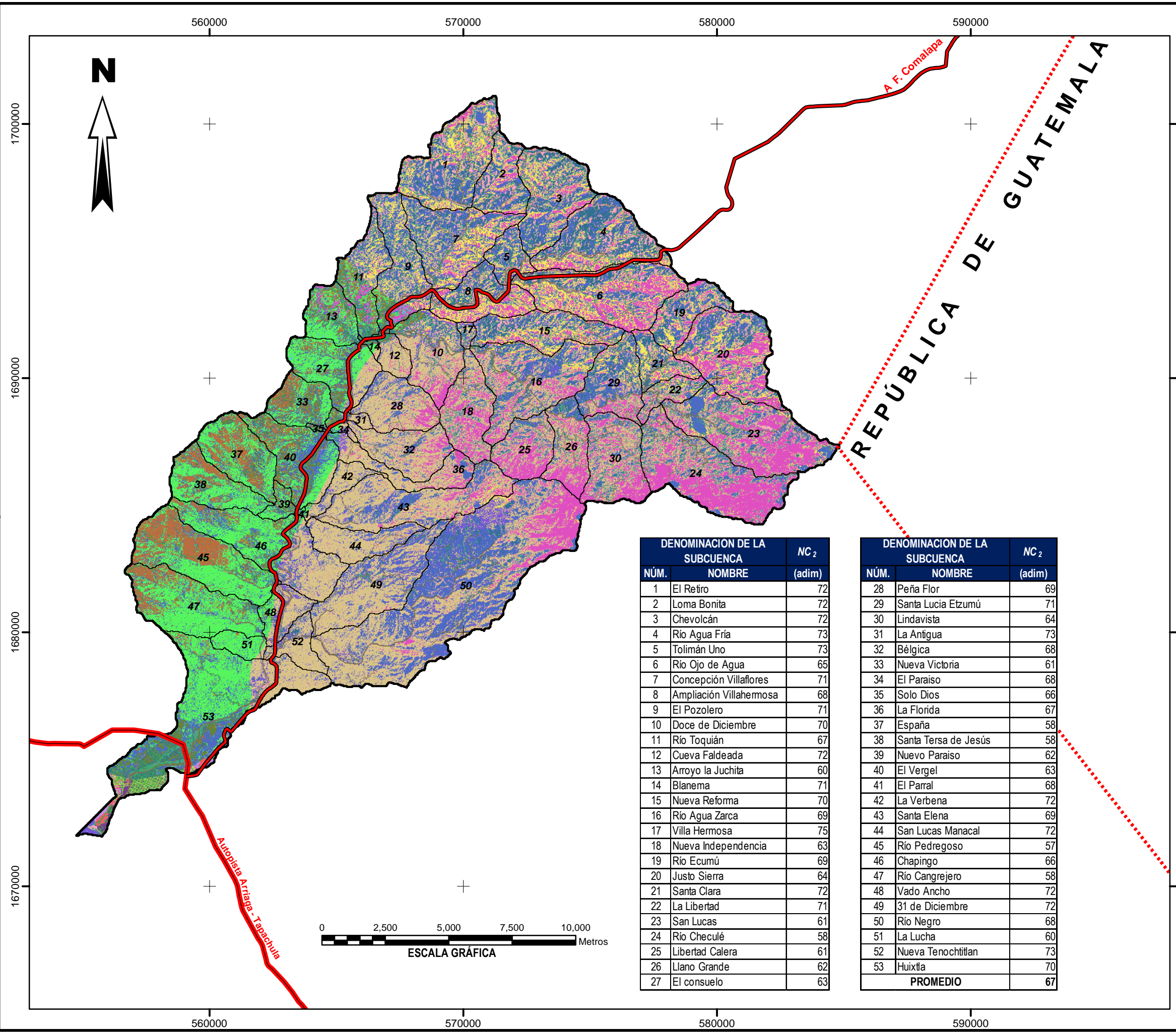
INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15



EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

PLANO CODIFICADO PARA EL GRUPO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA HUIXTLA

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
 REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DR. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
 CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

TESIS DOCTORAL

NÚMEROS DE CURVA NC₂ PARA LA CUENCA HUIXTLA DETERMINADOS POR SIG, NB10 Y TAM

ELABORÓ:
M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

REVISARON:
DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

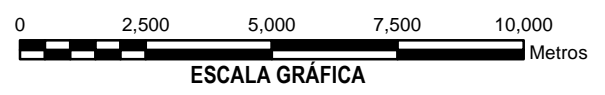
ESCALA 1:150,000

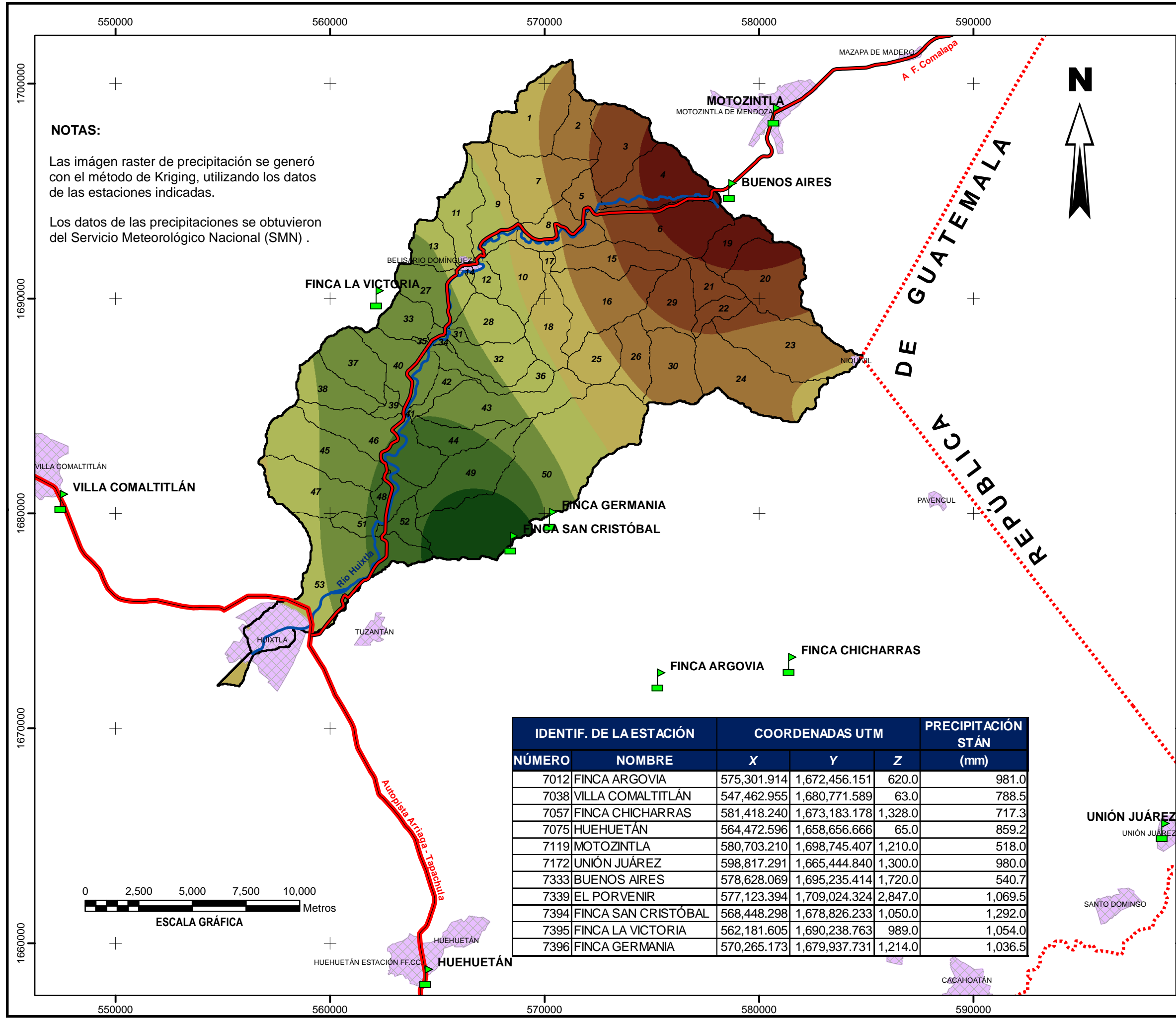
MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO

PLANO 24 DE 28

NÚM.	DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA	NC ₂ (adim)
1	El Retiro	72
2	Loma Bonita	72
3	Chevolcán	72
4	Río Agua Fría	73
5	Tolimán Uno	73
6	Río Ojo de Agua	65
7	Concepción Villaflores	71
8	Ampliación Villahermosa	68
9	El Pozolero	71
10	Doce de Diciembre	70
11	Río Toquián	67
12	Cueva Faldeada	72
13	Arroyo la Juchita	60
14	Blanema	71
15	Nueva Reforma	70
16	Río Agua Zarca	69
17	Villa Hermosa	75
18	Nueva Independencia	63
19	Río Ecumú	69
20	Justo Sierra	64
21	Santa Clara	72
22	La Libertad	71
23	San Lucas	61
24	Río Checulé	58
25	Libertad Calera	61
26	Llano Grande	62
27	El consuelo	63

NÚM.	DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA	NC ₂ (adim)
28	Peña Flor	69
29	Santa Lucia Etzumú	71
30	Lindavista	64
31	La Antigua	73
32	Bélgica	68
33	Nueva Victoria	61
34	El Paraiso	68
35	Solo Dios	66
36	La Florida	67
37	España	58
38	Santa Terna de Jesús	58
39	Nuevo Paraiso	62
40	El Vergel	63
41	El Parral	68
42	La Verbena	72
43	Santa Elena	69
44	San Lucas Manacal	72
45	Río Pedregoso	57
46	Chapingo	66
47	Río Cangrejero	58
48	Vado Ancho	72
49	31 de Diciembre	72
50	Río Negro	68
51	La Lucha	60
52	Nueva Tenochtitlan	73
53	Huixtla	70
PROMEDIO		67

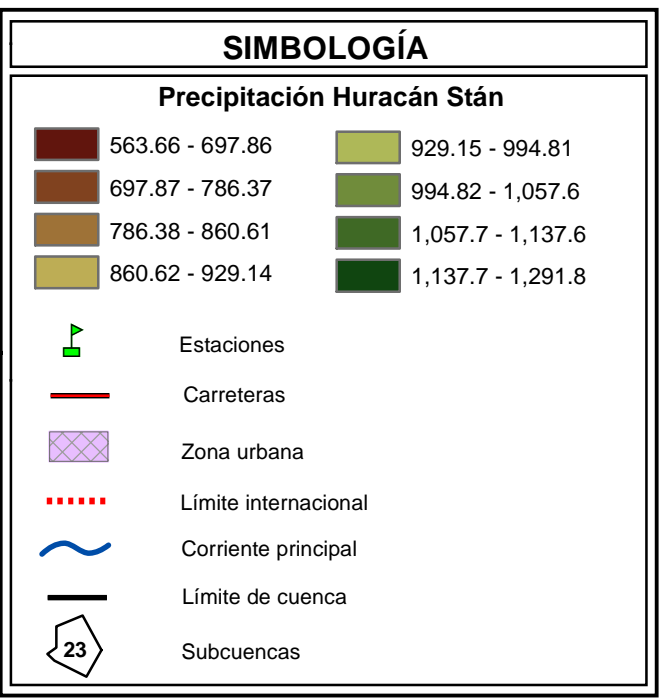
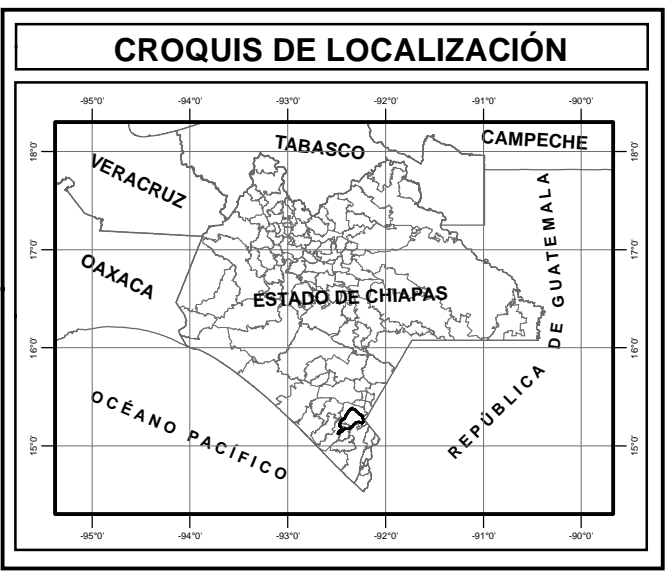




NOTAS:

Las imágenes raster de precipitación se generó con el método de Kriging, utilizando los datos de las estaciones indicadas.

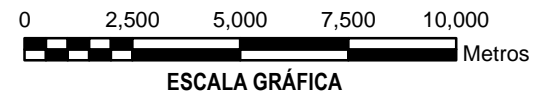
Los datos de las precipitaciones se obtuvieron del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

IDENTIF. DE LA ESTACIÓN		COORDENADAS UTM			PRECIPITACIÓN STÁN (mm)
NÚMERO	NOMBRE	X	Y	Z	
7012	FINCA ARGOVIA	575,301.914	1,672,456.151	620.0	981.0
7038	VILLA COMALTITLÁN	547,462.955	1,680,771.589	63.0	788.5
7057	FINCA CHICHARRAS	581,418.240	1,673,183.178	1,328.0	717.3
7075	HUEHUETÁN	564,472.596	1,658,656.666	65.0	859.2
7119	MOTOZINTLA	580,703.210	1,698,745.407	1,210.0	518.0
7172	UNIÓN JUÁREZ	598,817.291	1,665,444.840	1,300.0	980.0
7333	BUENOS AIRES	578,628.069	1,695,235.414	1,720.0	540.7
7339	EL PORVENIR	577,123.394	1,709,024.324	2,847.0	1,069.5
7394	FINCA SAN CRISTÓBAL	568,448.298	1,678,826.233	1,050.0	1,292.0
7395	FINCA LA VICTORIA	562,181.605	1,690,238.763	989.0	1,054.0
7396	FINCA GERMANIA	570,265.173	1,679,937.731	1,214.0	1,036.5



CP COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

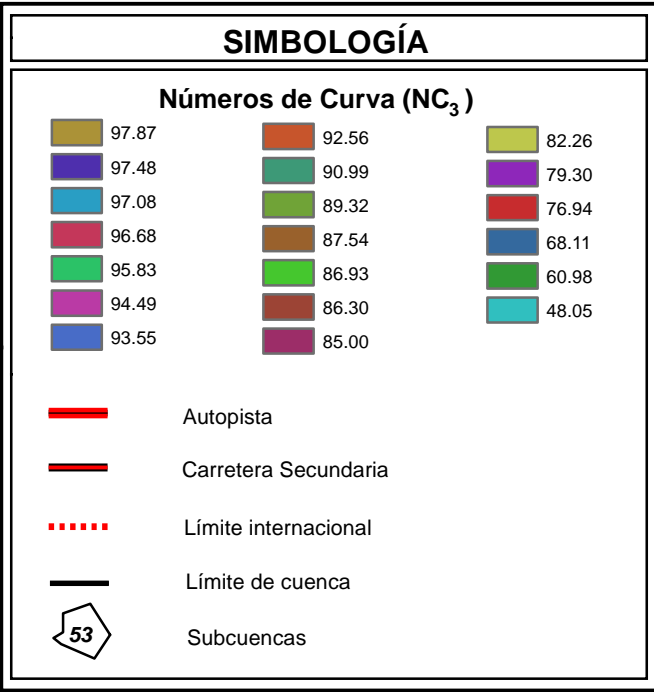
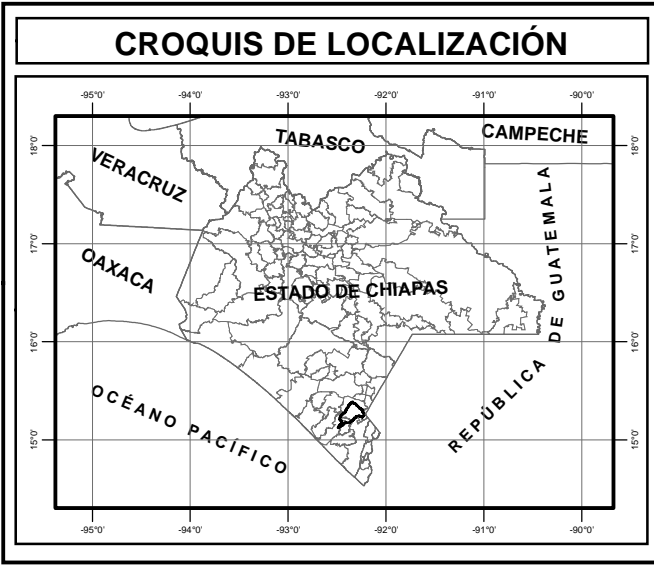
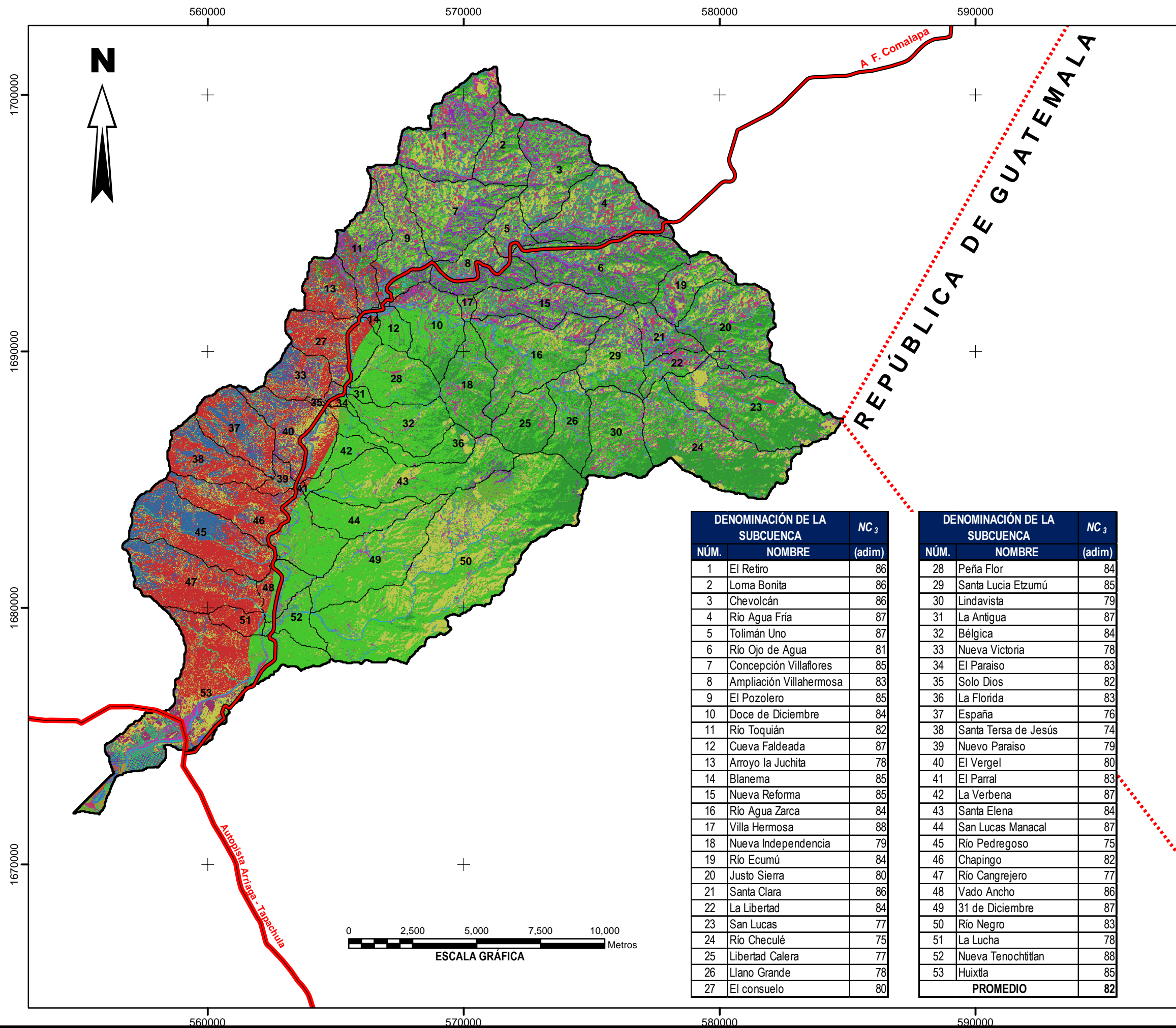
TESIS DOCTORAL

PLANO DE PRECIPITACIÓN DEL HURACÁN STÁN DE LA CUENCA HUIXTLA

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

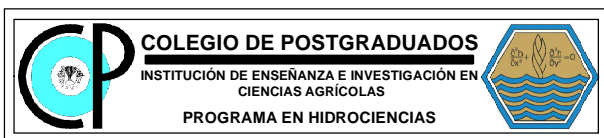
REVISARON:
 DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
 DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
 DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
 DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
 DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

ESCALA 1:175,000 MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO PLANO 25 DE 28



INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15



EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

TESIS DOCTORAL

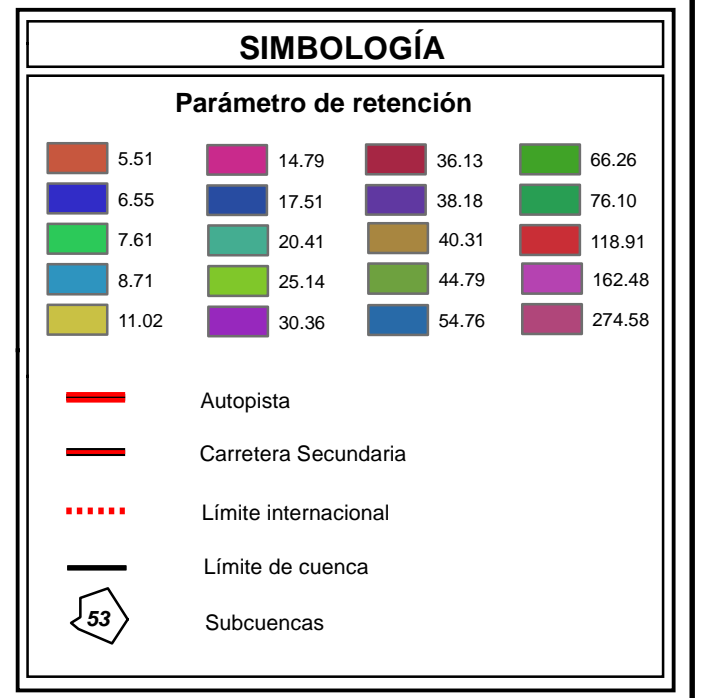
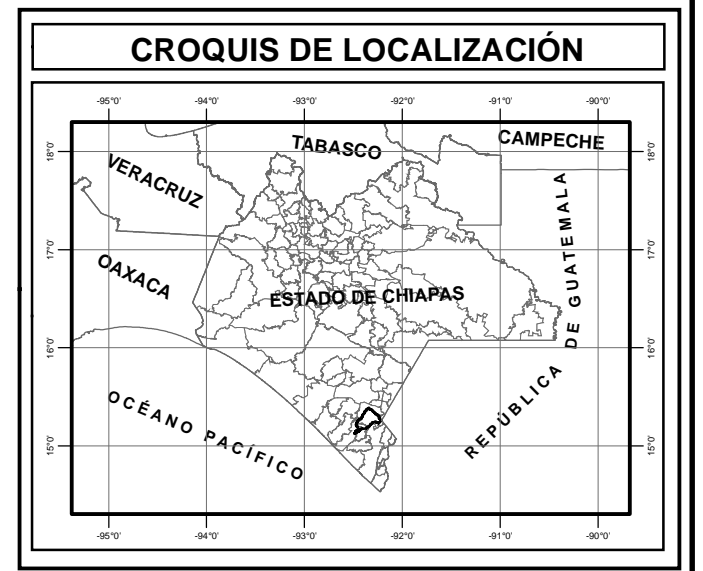
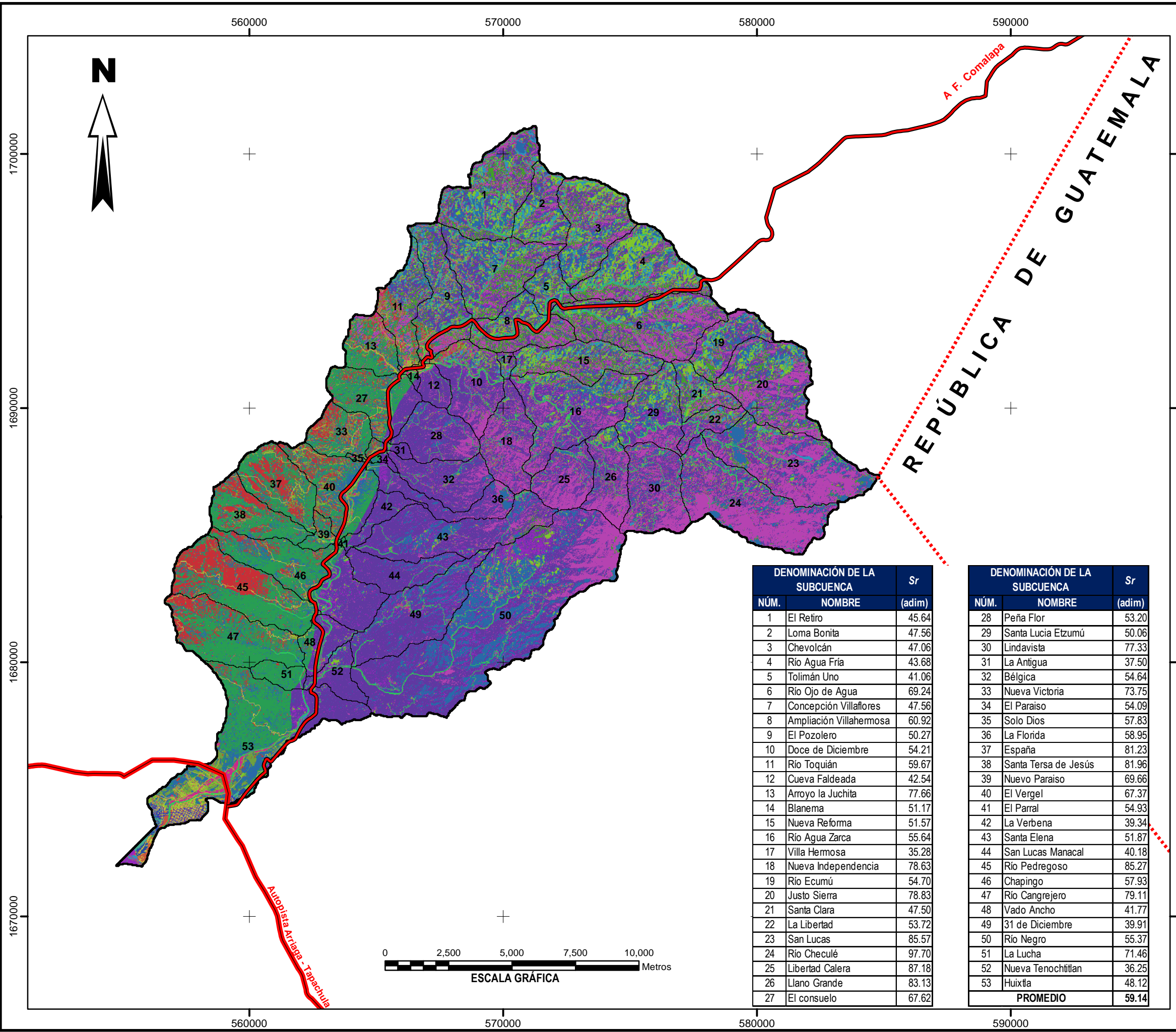
NÚMEROS DE CURVA CORREGIDOS POR HUMEDAD ANTECEDENTE NC₃ PARA LA CUENCA HUIXTLA

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

REVISARON:
 DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
 DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
 DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
 DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
 DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

NÚM.	DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA	NC ₃ (adim)
1	El Retiro	86
2	Loma Bonita	86
3	Chevolcán	86
4	Río Agua Fria	87
5	Tolimán Uno	87
6	Río Ojo de Agua	81
7	Concepción Villaflores	85
8	Ampliación Villahermosa	83
9	El Pozolero	85
10	Doce de Diciembre	84
11	Río Toquián	82
12	Cueva Faldeada	87
13	Arroyo la Juchita	78
14	Blanema	85
15	Nueva Reforma	85
16	Río Agua Zarca	84
17	Villa Hermosa	88
18	Nueva Independencia	79
19	Río Ecumú	84
20	Justo Sierra	80
21	Santa Clara	86
22	La Libertad	84
23	San Lucas	77
24	Río Checulé	75
25	Libertad Calera	77
26	Llano Grande	78
27	El consuelo	80

NÚM.	DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA	NC ₃ (adim)
28	Peña Flor	84
29	Santa Lucia Etzumú	85
30	Lindavista	79
31	La Antigua	87
32	Bélgica	84
33	Nueva Victoria	78
34	El Paraiso	83
35	Solo Dios	82
36	La Florida	83
37	España	76
38	Santa Tera de Jesús	74
39	Nuevo Paraiso	79
40	El Vergel	80
41	El Parral	83
42	La Verbena	87
43	Santa Elena	84
44	San Lucas Manacal	87
45	Río Pedregoso	75
46	Chapingo	82
47	Río Cangrejero	77
48	Vado Ancho	86
49	31 de Diciembre	87
50	Río Negro	83
51	La Lucha	78
52	Nueva Tenochtitlan	88
53	Huixtla	85
PROMEDIO		82

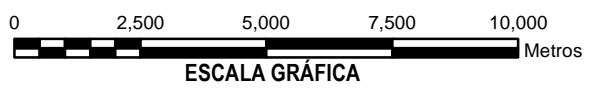


INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA

Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15

DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA		
NÚM.	NOMBRE	Sr (adim)
1	El Retiro	45.64
2	Loma Bonita	47.56
3	Chevolcán	47.06
4	Río Agua Fría	43.68
5	Tolimán Uno	41.06
6	Río Ojo de Agua	69.24
7	Concepción Villaflores	47.56
8	Ampliación Villahermosa	60.92
9	El Pozolero	50.27
10	Doce de Diciembre	54.21
11	Río Toquián	59.67
12	Cueva Faldeada	42.54
13	Arroyo la Juchita	77.66
14	Blanema	51.17
15	Nueva Reforma	51.57
16	Río Agua Zarca	55.64
17	Villa Hermosa	35.28
18	Nueva Independencia	78.63
19	Río Ecumú	54.70
20	Justo Sierra	78.83
21	Santa Clara	47.50
22	La Libertad	53.72
23	San Lucas	85.57
24	Río Checulé	97.70
25	Libertad Calera	87.18
26	Llano Grande	83.13
27	El consuelo	67.62

DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA		
NÚM.	NOMBRE	Sr (adim)
28	Peña Flor	53.20
29	Santa Lucia Etzumú	50.06
30	Lindavista	77.33
31	La Antigua	37.50
32	Bélgica	54.64
33	Nueva Victoria	73.75
34	El Paraiso	54.09
35	Solo Dios	57.83
36	La Florida	58.95
37	España	81.23
38	Santa Tera de Jesús	81.96
39	Nuevo Paraiso	69.66
40	El Vergel	67.37
41	El Parral	54.93
42	La Verbena	39.34
43	Santa Elena	51.87
44	San Lucas Manacal	40.18
45	Río Pedregoso	85.27
46	Chapingo	57.93
47	Río Cangrejero	79.11
48	Vado Ancho	41.77
49	31 de Diciembre	39.91
50	Río Negro	55.37
51	La Lucha	71.46
52	Nueva Tenochtitlan	36.25
53	Huixtla	48.12
PROMEDIO		59.14



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
 INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN
 CIENCIAS AGRÍCOLAS
 PROGRAMA EN HIDROCIENCIAS

EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL

TESIS DOCTORAL

PARÁMETRO DE RETENCIÓN PARA LA CUENCA HUIXTLA

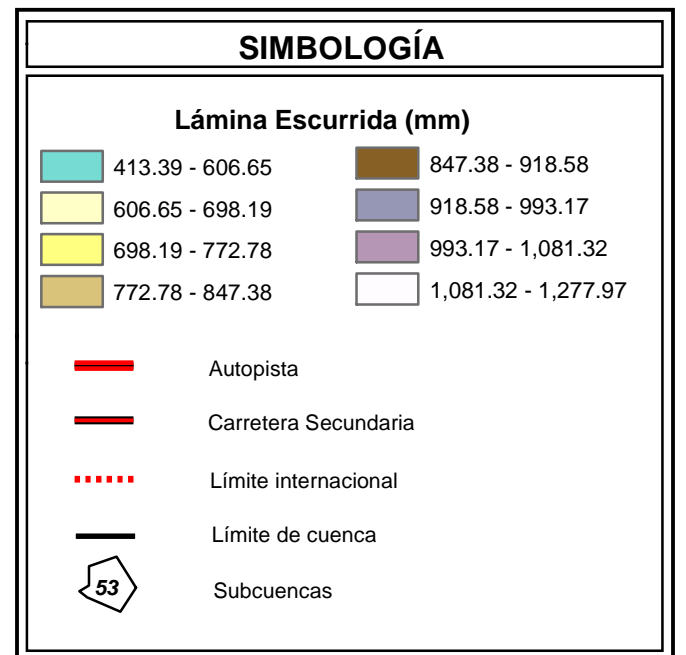
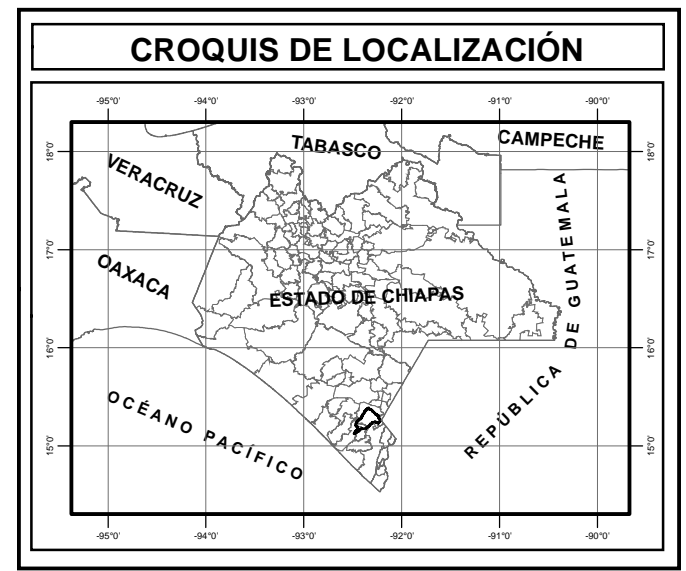
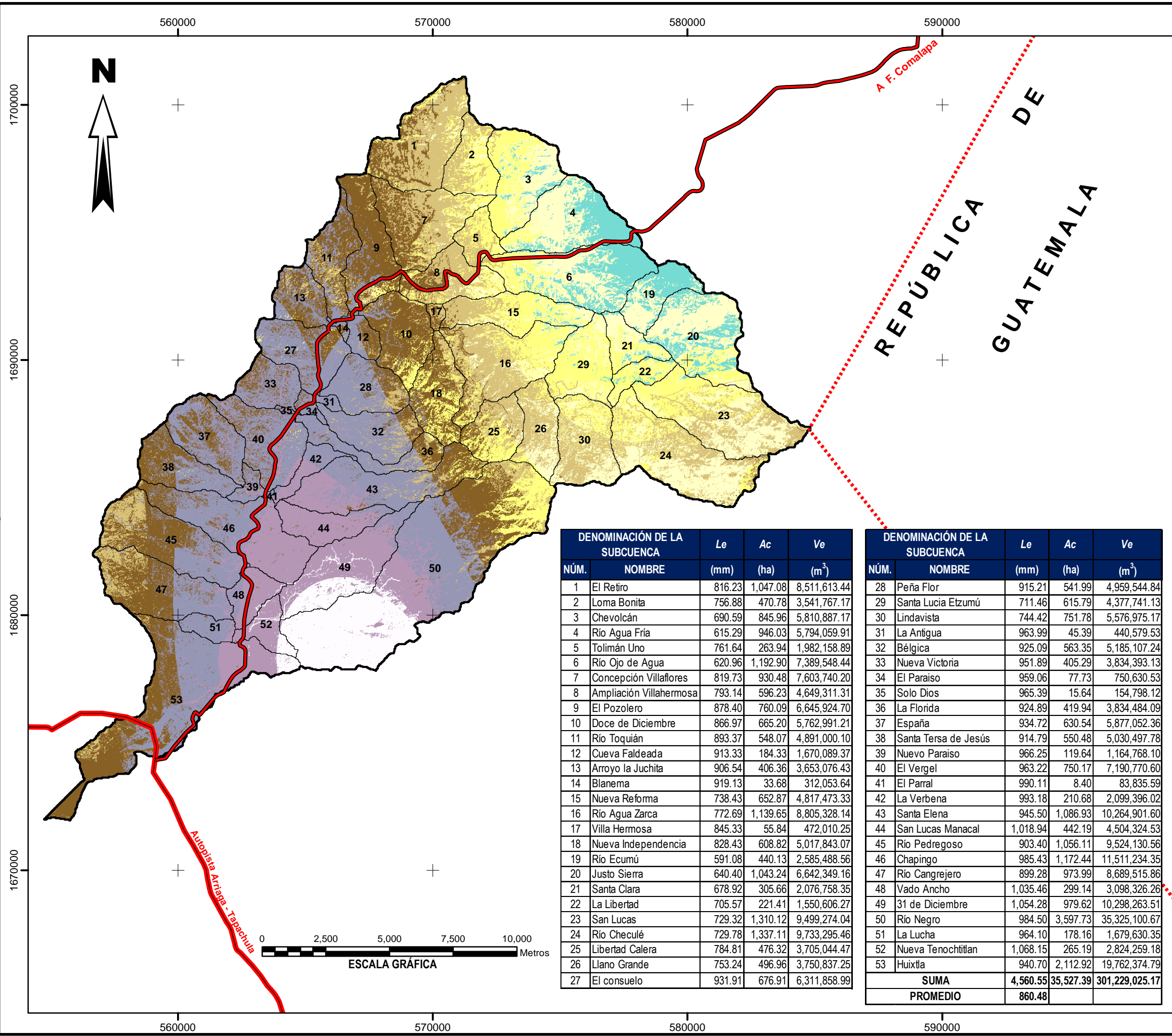
ELABORÓ:
M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO

REVISARON:
DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA
DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO
DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS
DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO
DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES

ESCALA 1:150,000

MONTECILLO, ESTADO DE MÉXICO

PLANO 27 DE 28



DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA				
NÚM.	NOMBRE	Le (mm)	Ac (ha)	Ve (m ³)
1	El Retiro	816.23	1,047.08	8,511,613.44
2	Loma Bonita	756.88	470.78	3,541,767.17
3	Chevolcán	690.59	845.96	5,810,887.17
4	Río Agua Fria	615.29	946.03	5,794,059.91
5	Tolimán Uno	761.64	263.94	1,982,158.89
6	Río Ojo de Agua	620.96	1,192.90	7,389,548.44
7	Concepción Villaflores	819.73	930.48	7,603,740.20
8	Ampliación Villahermosa	793.14	596.23	4,649,311.31
9	El Pozolero	878.40	760.09	6,645,924.70
10	Doce de Diciembre	866.97	665.20	5,762,991.21
11	Río Toquián	893.37	548.07	4,891,000.10
12	Cueva Faldeada	913.33	184.33	1,670,089.37
13	Arroyo la Juchita	906.54	406.36	3,653,076.43
14	Blanema	919.13	33.68	312,053.64
15	Nueva Reforma	738.43	652.87	4,817,473.33
16	Río Agua Zarca	772.69	1,139.65	8,805,328.14
17	Villa Hermosa	845.33	55.84	472,010.25
18	Nueva Independencia	828.43	608.82	5,017,843.07
19	Río Ecumú	591.08	440.13	2,585,488.56
20	Justo Sierra	640.40	1,043.24	6,642,349.16
21	Santa Clara	678.92	305.66	2,076,758.35
22	La Libertad	705.57	221.41	1,550,606.27
23	San Lucas	729.32	1,310.12	9,499,274.04
24	Río Checulé	729.78	1,337.11	9,733,295.46
25	Libertad Calera	784.81	476.32	3,705,044.47
26	Llano Grande	753.24	496.96	3,750,837.25
27	El consuelo	931.91	676.91	6,311,858.99

DENOMINACIÓN DE LA SUBCUENCA				
NÚM.	NOMBRE	Le (mm)	Ac (ha)	Ve (m ³)
28	Peña Flor	915.21	541.99	4,959,544.84
29	Santa Lucia Etzumú	711.46	615.79	4,377,741.13
30	Lindavista	744.42	751.78	5,576,975.17
31	La Antigua	963.99	45.39	440,579.53
32	Bélgica	925.09	563.35	5,185,107.24
33	Nueva Victoria	951.89	405.29	3,834,393.13
34	El Paraiso	959.06	77.73	750,630.53
35	Solo Dios	965.39	15.64	154,798.12
36	La Florida	924.89	419.94	3,834,484.09
37	España	934.72	630.54	5,877,052.36
38	Santa Tera de Jesús	914.79	550.48	5,030,497.78
39	Nuevo Paraiso	966.25	119.64	1,164,768.10
40	El Vergel	963.22	750.17	7,190,770.60
41	El Parral	990.11	8.40	83,835.59
42	La Verbena	993.18	210.68	2,099,396.02
43	Santa Elena	945.50	1,086.93	10,264,901.60
44	San Lucas Manacal	1,018.94	442.19	4,504,324.53
45	Río Pedregoso	903.40	1,056.11	9,524,130.56
46	Chapingo	985.43	1,172.44	11,511,234.35
47	Río Cangrejero	899.28	973.99	8,689,515.86
48	Vado Ancho	1,035.46	299.14	3,098,326.26
49	31 de Diciembre	1,054.28	979.62	10,298,263.51
50	Río Negro	984.50	3,597.73	35,325,100.67
51	La Lucha	964.10	178.16	1,679,630.35
52	Nueva Tenochtitlan	1,068.15	265.19	2,824,259.18
53	Huixtla	940.70	2,112.92	19,762,374.79
SUMA		4,560.55	35,527.39	301,229,025.17
PROMEDIO		860.48		

INFORMACIÓN GEOGRÁFICA DE REFERENCIA
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)
 Elipsoide: GRS80
 Datum Horizontal: ITRF92
 Zona UTM: 15



EROSIÓN HÍDRICA EN CUENCAS COSTERAS DE CHIAPAS Y ESTRATEGIAS PARA SU RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-AMBIENTAL
TESIS DOCTORAL

VOLUMEN DE ESCURRIMIENTO DETERMINADO POR EL MÉTODO DISTRIBUIDO EMPLEANDO SIG, TAM Y Nc

ELABORÓ: M. C. SAMUEL PÉREZ NIETO
 REVISARON: DR. JOSÉ LUIS OROPEZA MOTA, DRA. LAURA ALICIA IBÁÑEZ CASTILLO, DR. JOSÉ LUIS L. ARELLANO MONTERROSAS, DR. DEMETRIO FERNÁNDEZ REYNOSO, DR. JESÚS CHÁVEZ MORALES