



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**“EVALUACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO
HIDROLÓGICO WATEM/SEDEM PARA LA
CUENCA DEL RÍO TEXCOCO”**

MAURICIO CARRILLO CARRILLO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2015

La presente tesis titulada: “Evaluación y calibración del modelo hidrológico WATEM/SEDEM para la cuenca del Río Texcoco” fue realizada por el alumno **Mauricio Carrillo Carrillo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

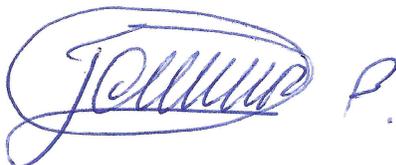
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: _____



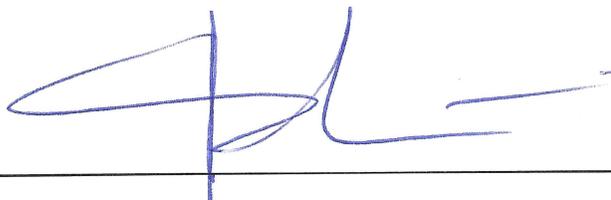
DR. MARIO R. MARTÍNEZ MÉNES

ASESOR: _____



M.C. JOSÉ DONALDO RÍOS BERBER

ASESOR: _____



M.C. ERASMO RUBIO GRANADOS

Montecillo, Texcoco, Estado de México, 2015

1 RESUMEN

EVALUACIÓN Y CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO WATEM/SEDEM PARA LA CUENCA DEL RÍO TEXCOCO

Mauricio Carrillo Carrillo

Colegio de Postgraduados, 2015

La cuenca del río Texcoco tenía un importante aporte de escurrimiento y sedimentos que ponían en riesgo la rehabilitación y recuperación del ex lago de Texcoco, razón por la cual, en la década de los setentas, se inició un proceso de recuperación de áreas degradadas, mediante la implementación de obras de conservación, cambio de uso de suelo para recuperar la agricultura y proteger las zonas con vegetación. Se analizó la información de precipitación, escurrimientos y la degradación específica de los suelos para dos períodos antes (1960-1977) y después (1978-1990) de las obras, para analizar los cambios de estas variables hidrológicas producto del manejo. Se calibró y aplicó el modelo WATEM/SEDEM alimentado con información de precipitación y parámetros estimados de erosionabilidad, longitud y grado de pendiente, cobertura y prácticas de manejo para los diferentes períodos para estimar la producción de sedimentos o degradación específica. Los resultados muestran que los escurrimientos y la degradación específica disminuyen y que existen diferencias estadísticas significativas obtenidas con las pruebas de F y de t de Student que indican los servicios ambientales de las obras. El proceso iterativo de calibración permitió obtener los parámetros óptimos que requieren el modelo obteniendo eficiencias del modelo (ME) de 0.47 y de 0.69 y valores de RRMSE de 0.49 y 0.52 para antes y después de las obras respectivamente y encontrando que la producción de sedimentos estimada con el modelo WATEM/SEDEM mostró un alta correlación ($R=0.86$) con la producción de sedimentos y un ajuste lineal con un coeficiente de determinación R^2 de 0.73 que indica una buena eficiencia en la predicción.

Palabras clave: WATEM/SEDEM, calibración, degradación específica, Obras de conservación.

ABSTRACT
**EVALUATION AND CALIBRATION OF THE HYDROLOGICAL MODEL WATEM/SEDEM FOR
THE BASIN OF THE TEXCOCO RIVER**

Mauricio Carrillo Carrillo

Colegio de Postgraduados, 2015

The basin of the Texcoco river had an important contribution of the runoff and sediment that threatened the rehabilitation and restoration of the former Lake of Texcoco, for these reason, in the late seventies, a recovery of the degraded areas was initiated by implementing soil conservation works, the change of land use for an agriculture recovery and protect areas with vegetation. Information on precipitation, runoff, and specific degradation for the two periods before (1960-1977) and after (1978-1990) the conservation works, was analyze the changes of these hydrological variables due to the watershed management. It was calibrated and applied the model WATEM/SEDEM fed with information of rainfall and estimated parameters of erodibility, length and degree of slope, cover and management practices for different periods to estimate the sediment yield or specific degradation. The results show that runoff and specific degradation decrease and there are a statistically significant differences obtained with the F test and t of Student indicating the environmental services of the soil conservation works. The iterative calibration process yielded optimal model parameters that require obtaining efficiency model (ME) of 0.47 and 0.69 and RRMSE values of 0.49 and 0.52 before and after works respectively and finding that sediment production estimated with model WATEM/SEDEM showed a high correlation ($R = 0.86$) with the production of sediment and a linear fit with a coefficient of determination R^2 of 0.73 which indicates a good efficiency in the prediction.

Keywords: Texcoco river, WATEM/SEDEM, calibration, specific degradation, soil conservation works.

Dedicado a la memoria del Dr. José Luis Oropeza Mota⁺

A mi Familia, mi Alma mater y México

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico brindado durante mis estudios de postgrado.

Al Colegio de Postgraduados y al a comunidad científica y administrativa, por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría.

A mi director el Dr. José Luis Oropeza Mota⁺ por creer en mí y en este trabajo desde el inicio. Por la amistad, consejos y anécdotas de vida.

Al Dr. Mario R. Martínez Menes por su confianza, dedicación y tiempo en la continuación bajo su guía de la presente tesis.

Al M.C. José Donald Ríos Berber, por su apoyo y consejos para la realización del trabajo de investigación.

Al M.C. Erasmo Rubio Granados, por su confianza y apoyo durante el desarrollo del presente trabajo.

A Mariel Hernández, por la amistad y apoyo administrativo durante y al final del desarrollo de este trabajo.

Contenido

1	RESUMEN	iii
2	Introducción	7
2.1	Antecedentes	8
2.2	Planteamiento del problema	9
2.3	Justificación	10
3	Objetivos e hipótesis	11
3.1	Objetivos	11
3.1.1	Objetivo General	11
3.1.2	Objetivos particulares	11
3.2	Hipótesis.....	11
3.3	Supuestos	11
4	Revisión bibliográfica	12
4.1	Ciclo hidrológico.....	12
4.2	Hidrología en cuencas	13
4.3	Transporte de sedimentos	14
4.4	Proceso de erosión.....	15
4.5	Dinámica de la erosión hídrica	16
4.6	Modelos de erosión del suelo	17
4.6.1	Predicción de pérdidas de suelo	17
4.6.2	La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo.....	17
4.6.3	Efecto del escurrimiento superficial	18
4.7	El transporte de materiales.....	19
4.7.1	Formas de transporte.....	19
4.7.2	Granulometría de los materiales.....	20
4.7.3	Diferencias entre acarreo y suspensión	22
4.8	Transporte de sedimentos	23
4.8.1	Definición y conceptos	24
4.8.1.1	Arrastre en el lecho del cauce.....	27
4.8.1.2	Transporte en suspensión en el cauce.....	27
4.8.1.3	Transporte de fondo o transporte total del fondo.....	28
4.8.1.4	Transporte de lavado	28

4.8.1.5	Transporte en suspensión	29
4.8.1.6	Transporte total	29
4.9	Modelo Hidrológico.....	32
4.10	WATEM/SEDEM	33
4.10.1	Antecedentes del modelo	34
4.10.2	Evaluación de la tasa de erosión del suelo media anual.....	36
4.10.3	Evaluación de la capacidad media anual de transporte.....	37
4.10.4	Trayectoria del sedimento	38
4.10.5	Erosión hídrica.....	39
4.10.6	Factor R de erosividad de la lluvia.....	39
4.10.7	Factor K de erosionabilidad del suelo	40
4.10.8	Factor LS topográfico	40
4.10.9	Factor C de cobertura.....	44
4.10.10	Factor P de obras y prácticas.....	44
4.10.11	Transporte de sedimentos	45
5	Materiales y métodos.....	46
5.1	Localización del área de estudio	46
5.1.1	Clima.....	46
5.1.2	Precipitación.....	48
5.1.3	Temperatura.....	50
5.1.4	Topografía	53
5.1.5	Suelos	54
5.1.6	Hidrología.....	56
5.1.7	Estación hidrométrica	56
5.1.8	Uso de suelo	58
5.2	Metodología del estudio	60
5.2.1	Cambios de uso de suelo.....	60
5.2.2	Índices de vegetación	61
5.2.3	Análisis de las variables hidrológicas.....	62
5.2.3.1	Prueba de F de Fisher	63
5.2.3.2	Prueba de t de Student	63
5.3	Aplicación de modelo WATEM/SEDEM.....	64

5.3.1	Datos de entrada.....	64
5.3.1.1	Mapa de cobertura.....	64
5.3.1.2	Mapa de ríos.....	66
5.3.1.3	Factor R de erosividad de la lluvia.....	66
5.3.1.4	Factor K de erosionabilidad del suelo	68
5.3.1.5	Factor LS con un modelo digital de elevaciones	68
5.3.1.6	Factor C de cobertura y uso de suelo.....	69
5.3.1.7	Factor P de prácticas de manejo	71
5.3.2	Calibración del modelo.....	71
6	Resultados y discusión	73
6.1	Análisis de la variación de los usos del suelo	73
6.2	Análisis de los índices de vegetación antes y después de las obras	78
6.3	Cambios en las variables hidrológicas producto del manejo	81
6.3.1	Relación entre la precipitación y el escurrimiento con o sin obras de conservación	81
6.3.2	Escurremientos máximos instantaneos medidos en la estación hidrométrica	84
6.3.3	Producción de sedimentos y degradación especifica	88
6.4	Calibración del modelo WATEM/SEDEM	92
6.4.1	Valor de R anual para las tres etapas.....	92
6.4.2	Estimación del factor K ponderado para la zona de estudio.....	94
6.4.3	Factor C utilizado para la calibración modelo.....	95
6.4.4	Factor P de prácticas de conservación para calibrar el modelo.....	96
6.4.5	Calibración del modelo WATEM/SEDEM	97
6.4.5.1	Proceso iterativo de calibración del modelo WATEM/SEDEM	97
6.4.5.2	Predicción de la producción de sedimentos utilizando el modelo WATEM/SEDEM	104
6.4.5.3	Predicción de la producción de sedimentos en la cuenca	107
7	Conclusiones.....	109
8	Bibliografía	110
9	Anexos	115

Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de flujo y componentes del hidrológico.....	12
Figura 2. Factores que afectan los procesos de erosión.....	16
Figura 3. Curva granulométrica para la clasificación de materiales.	21
Figura 4. Diagrama de flujo de información y estructura del modelo WATEM/SEDEM.....	33
Figura 5. Ubicación de la cuenca del Río Texcoco.	46
Figura 6. Clasificación climática de la cuenca del Río Texcoco.	47
Figura 7. Precipitación media mensual para los tres periodos bajo análisis de la cuenca del Río Texcoco.	50
Figura 8. Variación de la temperatura media mensual por periodo de la cuenca del Río Texcoco.	52
Figura 9. Comparación grafica de Temperatura y Precipitación mensualmente de la cuenca del Río Texcoco.	53
Figura 10. Curvas de nivel de la cuenca del Río Texcoco.....	54
Figura 11. Edafología de la cuenca de Río Texcoco.	55
Figura 12. Estación Hidrométrica 26071 Texcoco de la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala.....	57
Figura 13 Uso de suelo reportado por INEGI en la serie V de la cuenca del Río Texcoco.	59
Figura 14 Visualizador de SASplanet para seleccionar el área de estudio.	59
Figura 15. Imagen Landsat de la banda 1 para su análisis de NDVI.....	62
Figura 16. Selección de la prueba de F para varianzas de dos muestras.....	63
Figura 17. Selección de la prueba de t para dos muestras suponiendo varianzas iguales.	64
Figura 18. Ingreso de los distintos shapes al programas Idrisi32.	65
Figura 19. Información necesaria de entrada en la primera etapa.	66
Figura 20. Ingreso de valor de R y coeficientes de capacidad de transporte.	67
Figura 21. Factor de K ponderado para toda el área de estudio.	68
Figura 22. DEM del estado de México y ubicación de la cuenca del Río Texcoco.	69
Figura 23. Valores promedio de C para los principales uso de suelo.	70
Figura 24. Usos del suelo en la cuenca del Río Texcoco (1974 y 1989).....	74
Figura 25. Usos del suelo identificados en la cuenca del Río Texcoco en el 2010.....	75
Figura 26. Vestigios de zonas cárcavedas que fueron recuperadas y actualmente se cultivan en San Pablo Ixayoc.....	76
Figura 27. Terrazas de banco construidas para reducir los procesos erosivos en San Pablo Ixayoc.	77
Figura 28. Invernadero y zona urbana generadora de escurrimiento y contaminación en el poblado de San Pablo Ixayoc.	77
Figura 29. Valores de NDVI para diferentes usos del suelo en 1974 y 2010 de la época de secas en la cuenca del Río Texcoco.	78
Figura 31 Valores gráficos de NDVI para la época de lluvias de la cuenca del Río Texcoco.	80
Figura 32. Variación de la precipitación y el escurrimiento para antes y después de las acciones de conservación en la cuenca del Río Texcoco.....	82
Figura 33. Variación de los coeficientes de escurrimiento para ambos periodos en la cuenca del Río Texcoco.....	83
Figura 34. Variación de los escurrimientos máximos instantáneos en el periodo de 1946 a 1990 de la cuenca del Río Texcoco.....	84
Figura 35. Escurrimientos máximos ordenados para antes y después de las acciones en la cuenca del Río Texcoco.	86

Figura 36 .Producción anual de sedimentos en la cuenca del Río Texcoco, antes y después de las obras de conservación.	89
Figura 37. Degradación específica de la cuenca del Río Texcoco, antes y después del manejo integral.	90
Figura 38. Ecurrimiento y degradación específica para antes y después de las acciones de conservación en la cuenca del Río Texcoco.	90
Figura 39. Valores de R en el periodo de estudio (1960-2010) para la cuenca del Río Texcoco	93
Figura 40. Valores del factor K para la cuenca del Río Texcoco.	94
Figura 41. Ubicación de las terrazas existentes a los largo del Río Texcoco.	96
Figura 42. Curva de calibración de KTC para WATEM/SEDEM con los valores de ME.	99
Figura 43. Valores de RRMSE para los distintos valores de KTC (m).	99
Figura 44. Valores de ME para los distintos valores de C para Bosque	100
Figura 45. Valores de RRMSE para los distintos valores de C de Bosque.	100
Figura 46. Valores de ME para los distintos valores de C para Pastizal.....	101
Figura 47. Valores de RRMSE para los distintos valores de C de Pastizal.....	101
Figura 48. Valores de ME para los distintos valores del factor C agrícola.	102
Figura 49. Valores de RRMSE para los distintos valores del factor C agrícola.	102
Figura 50. Valores de ME para los distintos valores de KTC y C óptimos de coberturas.	103
Figura 51. Valores de RRMSE para los distintos valores de KTC y C óptimos de coberturas.....	104
Figura 52. Producción de sedimento (t año ⁻¹) observada y estimada para la cuenca del Río Texcoco	105
Figura 53. Relación entre precipitación y producción de sedimentos en el período de 1960-2010 en la cuenca del Río Texcoco.	105
Figura 54. Desempeño de WATEM/SEDEM con valores observados.	106
Figura 55. Degradación específica estimadas y observada de la cuenca del Río Texcoco.	107
Figura 56. Variación de la producción de sedimentos del periodo de antes y después de las acciones de manejo y conservación en la cuenca del Río Texcoco	108

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Clasificación de Atterberg.	20
Cuadro 2. Clasificación de tamaño de partículas Atterberg modificada.	20
Cuadro 3. Clasificación de las formas de transportes de sedimentos y métodos para cuantificarlos.	31
Cuadro 4. Precipitación reportada para la cuenca del Río Texcoco (1960 a 1977)	48
Cuadro 5. Precipitación reportada para la cuenca del Río Texcoco (1978 a 1990)	49
Cuadro 6. Precipitación reportada para la cuenca del Río Texcoco (1991 a 2010)	49
Cuadro 7. Temperatura media reportada para cuencas del Río Texcoco (1960 a 1977).	51
Cuadro 8. Temperatura media reportada para cuencas del Río Texcoco (1978 a 1990).	51
Cuadro 9. Temperatura media reportada para cuencas del Río Texcoco (1991 a 2010).	52
Cuadro 10. Número de corrientes por orden y longitud del Río Texcoco.	56
Cuadro 11. Superficies de uso de suelo y vegetación de la serie V por INEGI de la cuenca del Río Texcoco... ..	58
Cuadro 12. Valores de P para varias prácticas de conservación de suelo.	71
Cuadro 13. Comparación de cambio en área del uso de suelo de la zona de estudio.	74
Cuadro 14. Valores de NDVI para los años de 1974 y 2010 para la época de secas en la cuenca del Río Texcoco.	79

Cuadro 15. Valores de NDVI para los años de 1974 y 2010 para la época de lluvias en la cuenca del Río Texcoco.	80
Cuadro 16. Relaciones precipitación escurrimiento para antes y después de las acciones de conservación de suelos para la cuenca del Río Texcoco.	82
Cuadro 17. Prueba de F para comparar las relaciones precipitación escurrimiento en ambos periodos de la cuenca del Río Texcoco.	83
Cuadro 18. Escurrimiento máximo anual del Río Texcoco para el periodo de 1946 a 1990.	85
Cuadro 19. Escurrimiento máximos instantáneos para diferentes periodos de retorno para el Río Texcoco.	86
Cuadro 20. Estadísticos para la comparación de medias del escurrimiento máximo anual para los periodo de 1946 a 1990.	87
Cuadro 21. Producción anual de sedimentos y degradación específica en la cuenca del Río Texcoco en dos periodos (1960-1977 y 1978-1990).	88
Cuadro 22. Estadísticos para la comparación de medias de la degradación específica para los periodos de 1960 a 1977 y 1978 a 1990 en la cuenca del Río Texcoco.	91
Cuadro 23. Valores de R para las tres etapas (1960-1977), (1978-1990) y (1991-2010) en la cuenca del Río Texcoco.	93
Cuadro 24. Superficies de los distintos valores de K y el K ponderado para la cuenca del Río Texcoco.	95
Cuadro 25. Valores de C para los distintos usos de suelo y vegetación, para los periodo bajo análisis en la cuenca del Río Texcoco.	96
Cuadro 26. Facto C para el bosque, pastizal y agrícola para tres épocas analizadas en la cuenca del Río Texcoco.	96
Cuadro 27. Valores de P para las etapas de análisis en la cuenca del Río Texcoco.	97
Cuadro 28. Indicadores de desempeño obtenidos en el proceso de calibración de WATEM/SEDEM.	103

2 Introducción

La modelación es una abstracción del mundo real, es cuando una determinada realidad física se reproduce en un sistema simplificado, un modelo a escala o un prototipo que guarda cierta relación con la realidad que pretende ser modelada. Estos modelos se basarían en aspectos de la ciencia física, de aquellos movimientos de los cuerpos, y que además es cuantificable. Estos modelos generalmente representan el fenómeno estudiado utilizando las mismas relaciones físicas del prototipo pero reduciendo su escala para hacerlo manejable.

Los modelos se han utilizado para explicar los procesos erosivos, el comportamiento de los escurrimientos superficiales, subterráneos y del movimiento de sedimentos tanto en las laderas como en el sistema de drenaje de un territorio, entre otros. Estos modelos son especializados para analizar todos los procesos o se han especializado para analizar con mayor detalle un solo proceso como es el caso del modelo WATEM/SEDEM que trata de explicar el proceso erosivo como producto del comportamiento de los escurrimientos y los sedimentos en las cuencas hidrológicas.

El sedimento es un material sólido acumulado sobre la superficie terrestre derivado de las acciones de fenómenos y procesos que actúan en la atmósfera, en la hidrosfera y en la biosfera (vientos, variaciones de temperatura, precipitaciones meteorológicas, circulación de aguas superficiales o subterráneas, desplazamiento de masas de agua en ambiente marino o lacustre, acciones de agentes químicos, acciones de organismos vivos).

El movimiento de los sedimentos en las laderas y en los sistemas de drenaje es producto del proceso erosivo provocado por la lluvia y los escurrimientos que es acelerado por las actividades antropogénicas y también puede disminuir por las acciones de la conservación y restauración de las zonas erosionadas con su impacto en la reducción de la producción de sedimentos.

La cuenca del Río Texcoco fue sometida a proceso de deforestación que propició la presencia de zonas degradadas que producían una alta cantidad de sedimentos que se acumulaban en el Ex - Lago de Texcoco y fue analizada a un proceso de recuperación de suelos, utilizando terrazas, reforestaciones y presas de control de azolves a fin de reducir la carga de sedimentos y el desarrollo de actividades productivas. Los cambios en la producción de sedimentos han sido documentados por la CONAGUA con mediciones puntuales, sin embargo no se han realizado estimaciones de la producción de sedimentos utilizando modelos de predicción matemática que consideran las condiciones de los terrenos antes y después de las acciones realizadas.

Por este motivo se realizó la presente investigación para evaluar y calibrar el modelo WATEM/SEDEM en la cuenca del Río Texcoco, para antes y después de las obras y prácticas de conservación del suelo que se realizaron, con la finalidad de probar la capacidad de predicción del modelo propuesto para que utilizado con la información disponible a fin de estimar la producción de sedimentos y que sea un modelo de predicción que pueda utilizarse en cuencas de la región que no cuenten con esta información hidrométrica.

2.1 Antecedentes

De acuerdo a estudios realizados por la SEMARNAT (2012), la erosión hídrica continúa siendo un problema serio en México, estos resultados muestran que el 42% de la superficie nacional está afectada por erosión hídrica, y que 17 entidades federativas presentan daño en más de 50% de su territorio, entre ellas Guerrero (79.3%), Puebla (76.6%), Morelos (75.2%), Oaxaca (74.6%) y el Estado de México (73.7%). El desarrollo de mejor tecnología de predicción de erosión es requerida para proveer a conservacionistas, productores agrícolas y otros usuarios de las tierras, con la herramienta para evaluar el impacto de varias estrategias de manejo, para reducir la pérdida de suelo, la producción de sedimentos y así realizar una planificación óptima en el uso del suelo.

De acuerdo a estimaciones realizadas (SEMARNAT y UACH, 2003), un sexto de la superficie terrestre se ve afectada por la acelerada erosión hídrica. Se ha señalado que el cambio en el uso de suelo y/o cobertura del suelo están entre los principales factores que explican la intensidad de la erosión del suelo, incluso exceden en importancia a la intensidad de la lluvia y en algunos casos a la pendiente. Los efectos de los cambios de uso de suelo y/o cobertura han aumentado la atención de las autoridades y por ello muchos estudios han demostrado que el cambio histórico del uso de suelo y/o cobertura tiene un efecto en la producción de sedimentos en las cuencas alrededor del mundo.

Este impacto del cambio uso de suelo y/o cobertura en la erosión del suelo y producción de sedimentos es bien entendida cualitativamente, pero aún existe poco conocimiento cuantitativamente. Al respecto, la valoración del impacto del cambio de uso del suelo en la erosión se ha abordado de diferentes maneras: i) mediciones de campo de carga de sedimento en suspensión y estudios batimétricos históricos de sedimentos (sedimentos acumulados en lagos) muestran que la deforestación y cambios en las prácticas agrícolas influyen grandemente en la erosión y transporte de sedimentos (Valero-Garcés, 2000); ii) cuencas experimentales han sido monitoreadas alrededor del mundo para entender los factores que controlan la cantidad de escurrimientos y el transporte de sedimentos (Bosch y Hewlett, 1982), y para obtener información detallada de diferentes parámetros para la modelación hidrológica y evaluar el impacto del cambio uso de suelo y/o cobertura en las tasas de erosión y producción de sedimentos (García-Ruiz, 2008). Todos estos estudios proporcionan una visión de la interacción entre el cambio de uso y/o cobertura, factores climáticos y los procesos geomorfométricos.

Los modelos de erosión y producción de sedimentos son herramientas útiles para comparar resultados de erosión y movimiento de las partículas del suelo, a partir de condiciones actuales de uso de suelo y/o cobertura con escenarios alternativos de uso y cobertura del suelo. Modelos espacialmente distribuidos, permiten no solamente determinar la variación en la producción total de sedimentos, sino también evaluar las diferencias entre las fuentes del sedimento y las áreas de sedimentación existentes dentro de la cuenca.

A pesar de que los procesos de erosión y sedimentación han sido estudiados a detalle usando equipo e instrumentos experimentales, evaluar la relación entre la erosión del suelo en un sitio y la producción total de sedimentos en la salida de la cuenca es muy difícil porque implica hacer una valoración completa de sedimentos de la cuenca incluyendo posibles áreas internas de sedimentación, en las cuales raramente hay un dato cuantitativo disponible. Avances recientes en la distribución espacial de la erosión y transporte de sedimentos abren nuevas posibilidades para entender los complejos patrones espaciales de la erosión y depositación de las partículas de suelo dentro de la cuenca (Merrit, 2003).

Sin embargo, comparando directamente la predicción de erosión con los datos observados será necesario evaluar la precisión de dichas estimaciones pero por cuestiones de practicidad o financiamiento, la adquisición de datos a largo plazo termina siendo un impedimento para una evaluación adecuada.

En el mejor de los casos existen datos disponibles solamente de transporte de sedimentos para los principales ríos de la cuenca, y estos datos raramente se encuentran en un lapso grande de periodo de tiempo (Alatorre, 2010). Por ejemplo, es común basarse en tasas de erosión provenientes de registros de sedimentos de obras de almacenamiento o lagos para la calibración o validación de modelos de erosión y/o transporte de sedimentos (Vente, 2008). Esto permite la predicción de la producción total de sedimentos en una cuenca, pero la capacidad de predecir la redistribución del suelo dentro de la cuenca se pierde. La falta de datos de distribución espacial de la erosión del suelo es un gran problema dificultando el uso de modelos de distribución espacial de erosión, e incluso hace que la calibración de un modelo no sea posible (Alatorre, 2010).

2.2 Planteamiento del problema

La falta de planeación de manejo para las zonas urbanas y zonas agrícolas ocasionan el aumento en los escurrimientos provenientes de las partes altas y como consecuencia las pérdidas económicas y pérdidas del recurso suelo y agua que a largo plazo tendrá complicaciones en el sostenimiento de la agricultura del país por la falta de recursos de calidad.

Esto destaca la necesidad de utilizar modelos de entrega de sedimentos que permitan la delimitación de las zonas críticas, cuyo origen de los sedimentos que deben ser priorizadas para la preservación del suelo con obras de conservación.

Las áreas críticas que son el origen de sedimentos las se caracterizan por tener altas tasas de erosión y alta capacidad de transporte de sedimentos. La identificación de estas zonas es importante para enfocar los recursos a las áreas denominadas de alto riesgo y con ello evitar la propagación de estas zonas.

WATEM/SEDEM es un modelo de erosión y transporte de sedimentos espacialmente distribuido basado en la Ecuación Universal de Perdida de Suelo (EUPS) y la entrega de sedimentos al flujo usando la capacidad de transporte de sedimentos y el modelo de transporte en cascada (Van Rompaey et al., 2001). Este modelo por su simplicidad e información requerida tanto para su calibración como su aplicación lo hacen ideal para las cuencas nacionales carentes de suficiente información para calibrar o utilizar modelos más complejos cuyos parámetros de entrada no están disponibles.

2.3 Justificación

En México no se tiene la cultura de la planificación de proyectos de conservación de suelo debido a la carencia de datos ambientales suficientes y apoyo financiero, la falta de metodologías apropiadas para predecir la producción de sedimentos y la ausencia de estrategias de manejo de las cuencas.

La mayoría de los modelos de predicción de la erosión del suelo, de escala regional son espacialmente agrupados y por lo tanto tienen una aplicación limitada a los problemas prácticos tales como la evaluación de la variabilidad espacial de la erosión del suelo y sedimentos en una cuenca, así como, para evaluar el impacto de las acciones de conservación de suelos realizadas.

Para poder utilizar los modelos de predicción de la erosión y sedimentos, es necesario conocer los datos de lluvia, cantidad, intensidad, erosividad, temperatura, tipo de suelo, cobertura del suelo, topografía de la cuenca y medición de sedimentos de la estación hidrométrica. La cuenca del Río Texcoco cuenta con esta información para validar el modelo WATEM/SEDEM de un periodo de 1960 a 1990 y con el programa ya calibrado se realizará una predicción de la producción de sedimentos hasta el año 2010 donde se tiene el uso de suelo actualizado.

3 Objetivos e hipótesis

3.1 Objetivos

Se planteó el siguiente objetivo general y particular para la investigación de este trabajo.

3.1.1 Objetivo General

1. Calibrar y evaluar el desempeño del modelo WATEM/SEDEM espacialmente distribuido en la predicción de producción de sedimento.

3.1.2 Objetivos particulares

1. Analizar el comportamiento hidrológico de la cuenca del Río Texcoco con o sin obras de conservación de suelos.
2. Identificar los parámetros que permitan estimar la producción de sedimentos.
3. Evaluar la capacidad de predicción del modelo WATEM/SEDEM en cuencas con y sin obras de conservación de suelo.

3.2 Hipótesis

El modelo WATEM/SEDEM es eficiente para estimar la producción de sedimentos para diferentes escenarios.

Las obras y prácticas de conservación de suelos tienen efecto en la reducción de las variables hidrológicas de la cuenca.

3.3 Supuestos

La información climática, de suelo e hidrométrica utilizada en este estudio es confiable para evaluar y validar el modelo WATEM/SEDEM.

4 Revisión bibliográfica

4.1 Ciclo hidrológico

Los procesos hidrológicos que afectan el mundo son bien conocidos y han sido estudiados en detalle (Schwab et al., 1993). Cuando una masa de aire se satura con humedad, la precipitación cae a través de la atmósfera a la superficie de la tierra en forma de lluvia, nieve, aguanieve o granizo. Antes de llegar a la superficie del suelo, parte de la precipitación puede ser interceptada por la vegetación y evaporarse a la atmósfera.

La precipitación que llega a la superficie del suelo puede almacenarse en pequeñas depresiones y después infiltrarse, evaporarse, o convertirse en flujo en forma de escorrentía. La fracción de agua que se infiltra puede utilizarse en el proceso de evapotranspiración aportando agua para el crecimiento de la vegetación o percolarse en el perfil del suelo (Figura 1). Parte del agua que llega a la zona saturada se convertirá en agua subterránea y pasará a formar parte del flujo de base de los ríos que finalmente descarguen al océano (Dingman, 2002).

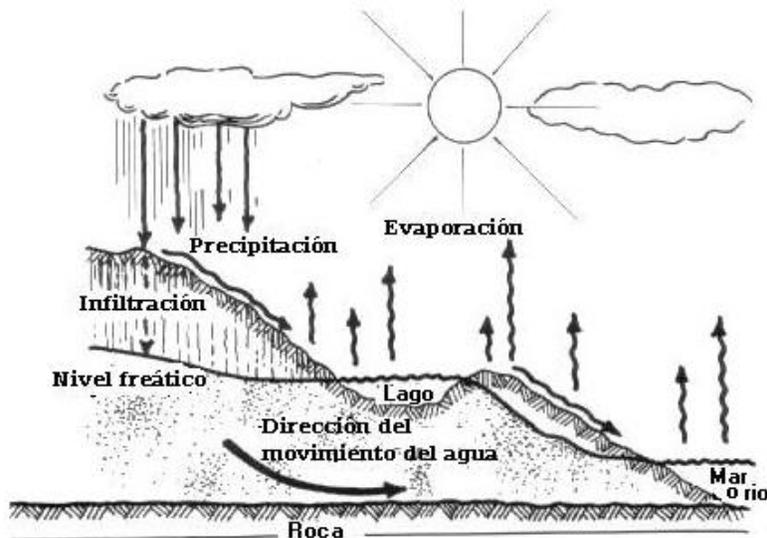


Figura 1. Diagrama de flujo y componentes del hidrológico

El drenaje subterráneo puede aumentar la infiltración y la aportación de agua del perfil del suelo, proporcionando una ruta de menor resistencia para el agua en el suelo por encima de las líneas de drenaje. Este drenaje del perfil superior del suelo puede controlar el contenido de humedad antecedente del perfil del suelo, lo que crea un régimen de suelo más estable, que puede influir en las avenidas máximas que conducen a eventos de inundación.

La precipitación, interceptación, almacenamiento en pequeñas depresiones, infiltración y evaporación del agua en el suelo, transpiración de agua por las plantas, los escurrimientos superficiales, subsuperficiales y subterráneo forman parte del ciclo hidrológicos y son procesos

esenciales para conocer la ruta que sigue el agua en la formación de biomasa, aportación de agua superficial y subterránea para su uso y la cantidad de agua que puede causar procesos de erosión y de producción de sedimentos que deben estudiarse para valorar los servicios ecosistémicos hidrológicos de los sistemas de drenaje naturales.

4.2 Hidrología en cuencas

Los procesos que conforman el ciclo hidrológico se producen en todas las escalas y es posible conocerlas utilizando el balance hídrico de la cuenca, siempre y cuando todas las entradas y salidas del agua se conozcan o se estimen, así como la diferencia del cambio en el almacenamiento de agua en la cuenca. Una cuenca hidrográfica se define como el área de tierra que aporta una escorrentía superficial y un drenaje subterráneo en una corriente o de cualquier punto de interés (Chow et al., 1988). Así, dependiendo de la escala, una cuenca puede consistir en varias subcuencas, o puede ser una cuenca más pequeña (microcuenca) dentro de una cuenca.

El balance hídrico en una cuenca puede representarse teóricamente por las leyes que rigen el almacenamiento de agua en el sistema de drenaje, incluyen la conservación de la masa, momento y energía. Estas fuerzas se vuelven importantes al modelar el flujo de agua en las laderas y en los sistemas de drenaje y se explica con el conocimiento de las entradas y salidas de agua y los cambios de almacenamiento de agua en el sistema (Fetter, 2001).

Entrada - Salida = Cambio neto en el almacenamiento de agua en el sistema

$$F = \frac{d\rho}{dt} = \frac{d(mv)}{dt} = m \frac{dv}{dt} = ma \quad (4.2.1)$$

La fuerza neta sobre una partícula es igual a la tasa de tiempo de cambio de su momento lineal ρ

Una cuenca es un sistema, es el terreno de dónde el agua, sedimentos y materiales disueltos drenan a un punto común a lo largo de un arroyo, humedal, lago o río. Por cada cuenca, hay un sistema de drenaje que transporta agua de lluvia a sus salidas; sus márgenes están marcadas por los puntos más altos de este terreno alrededor del cuerpo de agua.

La lluvia es interceptada por la vegetación o cae directamente al suelo. La lluvia que cae al suelo puede moverse sobre la superficie como escorrentía superficial o infiltrarse en el suelo. Parte de esa agua se convierte en vapor por medio de las plantas y regresa a la atmósfera. Este proceso se conoce como transpiración. Parte del agua que se encuentra almacenada en el suelo, lagos, ríos y océanos es convertida a vapor de agua por el calor del sol y luego regresa a la atmósfera por evaporación (Wharton, 1998).

4.3 Transporte de sedimentos

La forma natural de los lagos es cóncava y existe una tendencia a ser llenados con sedimentos. Con ello la vida de los lagos pasa por etapas de juventud, madurez, senescencia y finalmente la muerte cuando la cuenca receptora es llenada finalmente de sedimento (Cole, 1994). Los sedimentos en primer lugar son desprendidos en las partes altas y medias de las cuencas de captación, son transportadas por los ríos tributarios hacia el lago, y finalmente, ya en el cuerpo de agua son transportados por las fuerzas de difusión y corrientes internas hacia el interior del mismo.

La pérdida de suelo mediante escurrimiento hacia zonas costeras y lagos es asunto de interés para la comunidad enfocada en el estudio de la conservación de los recursos naturales por los impactos ecológicos y sociales que tiene como consecuencia. Este proceso tiene un efecto en las partes de origen de escurrimientos por la pérdida de suelo reduciendo su productividad y transformado la zona, como los cuerpos de agua que reciben el material erosionado con una serie de efectos negativos en la calidad de agua.

En los ecosistemas, el suelo tiene procesos naturales de regeneración, pero cuando la tasa de pérdida de suelo es mayor a la de su formación, existe degradación por erosión que impacta en la capacidad de producción de los terrenos. El equilibrio natural alcanzado entre los factores formadores de suelo y los que favorecen su erosión posee alta fragilidad. La sobreexplotación de los recursos naturales de algunas zonas causa la degradación de los territorios incrementando la pérdida de suelo (Saavedra, 2005). El impacto del aumento de la erosión en el entorno, se manifiesta en el incremento de la carga de sedimentos transportada en los cursos de agua naturales (Mattos, 1999).

El contenido de sedimentos y sustancias dentro de un lago proviene de distintas fuentes: i) El material erosionado en la cuenca y transportado por ríos tributarios o zonas adyacentes al lago, que es denominado material alóctono y ii) el material que es producido dentro del cuerpo de agua por procesos biológicos (fijación), químicos (mineralización), o físicos (resuspensión); dependiendo de la productividad del lago y que se denomina material autóctono (Malmaeus y Håkanson, 2003). La distribución de la cantidad de sedimentos y sustancias de cada fuente (alóctona y autóctona) depende de distintas condiciones biofísicas y antropogénicas del sistema, y es variable en cada lago. La concentración de sedimentos y sustancias es variable temporal y espacialmente en cada zona del lago.

El transporte de los materiales alóctonos hacia el interior del lago ocurre por distintas fuerzas tales como: i) los procesos de difusión; y ii) las corrientes de agua debidas al arrastre por el viento. Mientras que los materiales autóctonos sufren desplazamientos debidos a fuerzas de resuspensión y corrientes dentro del lago (Malmaeus y Håkanson, 2003).

En las siguientes sub-secciones se describen los procesos físicos que definen el transporte de sedimentos desde las cuencas de captación hacia el lago y posteriormente dentro del mismo.

4.4 Proceso de erosión

La erosión es el proceso mediante el cual el material de la superficie terrestre se pierde, disuelve o desgasta, y a la vez es transportado de un lugar a otro (USGS, 2007).

La erosión es un proceso que incluye el desprendimiento, transporte y deposición de partículas de suelo por acción de las fuerzas erosivas (Merritt et al., 2003; Saavedra, 2005). Los agentes erosivos pueden ser naturales como la lluvia, nieve, viento o artificiales como el riego (Foster, 1982). El proceso inicia cuando las gotas de agua golpean la superficie desprendiendo partículas individuales de suelo.

A medida que el evento continúa, el agua se infiltra en el suelo a una tasa controlada por la intensidad de la lluvia y la capacidad de infiltración del suelo. Cuando se alcanza la capacidad de almacenamiento del suelo el agua comienza a acumularse en la superficie. Cuando el agua estancada aumenta, se promueve el flujo en la dirección de la pendiente más pronunciada (escorrentía superficial). Las partículas de suelo se disuelven o suspenden en el flujo y da inicio el proceso de transporte de sedimentos (Saavedra, 2005).

Según el sistema de drenaje de la cuenca, la escorrentía superficial converge formando corrientes cada vez de mayor tamaño, que producen el desprendimiento de partículas adicionales de suelo. Cuando una suficiente cantidad de agua converge, alcanza canales bien definidos (cauce) donde el agua y los sedimentos son transportados hacia las partes bajas de la cuenca. En alguna parte del cauce la velocidad del flujo disminuye, algunas partículas de suelo precipitan y se depositan. La cantidad final de sedimentos que sale de la cuenca como carga de sedimentos, depende de la relación de los tres sub-procesos mencionados: desprendimiento, transporte y deposición (Merritt et al., 2003). Dependiendo del grado de progreso de la erosión, el proceso puede ocurrir de varias formas (laminar, en surcos, cárcavas o corrientes).

De acuerdo con Mattos (1999), los procesos de erosión dependen de las características físicas del suelo (textura, estructura, permeabilidad, etc.), morfología del terreno (porcentaje y longitud de pendiente, barreras, etc.), clima (régimen de lluvia, intensidad y duración) y tipo de protección del suelo (cobertura vegetal, prácticas de protección, etc.). La observación y medición de los procesos de erosión durante eventos lluviosos conlleva dificultades por las bajas escalas temporales y diferentes escalas espaciales en las que ocurre la erosión (Saavedra, 2005).

A pesar de la dificultad de medir la pérdida de suelo, es posible medir con cierta facilidad y precisión, los factores de los cuales ésta depende. De manera que se hace necesario el uso de modelos de erosión que permitan predecir la pérdida de suelo y transporte de sedimentos (Jetten et al., 2003). La predicción de la distribución espacial e intensidad de la erosión es aún más problemática en zonas con poca disponibilidad de datos experimentales. Es en estos sitios donde la habilidad de extrapolar técnicas, desarrolladas en otras zonas, cobra importancia práctica (Saavedra, 2005). Además, el aumento de la disponibilidad de datos de satélites, con diversos productos, resoluciones espaciales y temporales, provee una significativa fuente de información

que complementa los datos de campo. Saavedra (2005) aplicó en Bolivia la integración de datos de campo y datos de teledetección para utilizar modelos de predicción de erosión, desde escalas locales a escala de cuenca hidrográfica.

En la Figura 2, se presenta un diagrama de los factores que influyen en la pérdida de suelo. En general los factores pueden agruparse en 5 clases: clima y precipitación, relieve, suelos, cobertura de la suelo y actividades humanas (Saavedra, 2005). Cada uno de los factores afecta a la erosión en alguno de los tres aspectos mencionados (desprendimiento, transporte y deposición). La susceptibilidad del suelo a ser erosionado se denomina erodabilidad y está relacionada con la facilidad que presentan las partículas del suelo a sufrir desprendimiento y ser transportadas por el agua. Entre las características que afectan la erodabilidad están: la estructura, textura, permeabilidad, profundidad y el contenido de materia orgánica.

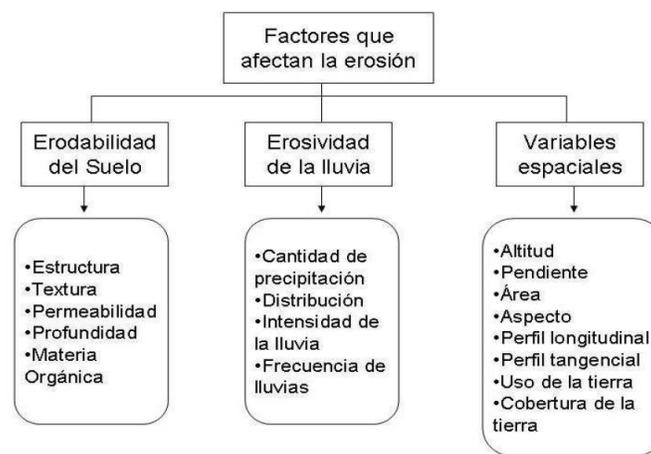


Figura 2. Factores que afectan los procesos de erosión.

En cuanto a las fuerzas que determinan la erosividad, no solo afecta la cantidad de lluvia que cae, sino su distribución, intensidad y frecuencia. La erosividad y erodabilidad son complementadas con factores que varían dentro de la cuenca hidrográfica, como la altitud, pendiente, área, perfil longitudinal y transversal, y cobertura y uso de la tierra.

4.5 Dinámica de la erosión hídrica

Los efectos que produce la lluvia en los terrenos se manifiestan en la parte superficial. Las partículas de suelo son desprendidas por el impacto de las gotas de lluvia y transportadas por el escurrimiento superficial, hacia las partes bajas hasta que cambia la pendiente o se reduce la capacidad de transporte del flujo superficial y empiezan la sedimentación de las partículas removidas y transportadas. Cuando se concentran los escurrimientos superficiales se empiezan a formar pequeños canales que pueden llegar a convertirse en cárcavas, cuando el volumen escurrido se incrementa o se transforman en cauces o ríos bien definidos.

4.6 Modelos de erosión del suelo

La modelación es una herramienta que permite representar los eventos naturales del mundo real, explicando estos procesos con modelos matemáticos, para posteriormente con ayuda de las actuales herramientas computacionales como software, es posible reproducirlas desde el estudio de un simple escurrimiento, a un complejo modelo distribuido que pueda explicar el comportamiento global en una cuenca hidrográfica. A grandes rasgos la modelización de los procesos erosivos se basa en la obtención de algoritmos matemáticos que describan la remoción, el transporte y la deposición de los materiales.

4.6.1 *Predicción de pérdidas de suelo*

Se han hecho muchos intentos para cuantificar los efectos de la erosión y poder llegar a predecirla (Wischmeier y Smith, 1978). Uno de los enfoques más apropiados para la predicción de la erosión anual es el usado con la Ecuación Universal de Perdidas de Suelos (EUPS), la que considera los factores más importantes que intervienen en el proceso erosivo y trata de evaluarlos cuantitativamente (Hudson, 1971).

4.6.2 *La Ecuación Universal de Pérdida de Suelo*

El desarrollo de ecuaciones empíricas para calcular pérdidas de suelo se inició en 1940 con Zingg (1945) y Musgrave (1947). Fue hasta 1962 con los trabajos de Wischmeier y colaboradores que propusieron la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) (Wischmeier y Smith, 1965), para la predicción de las pérdidas de suelos bajo diferentes escenarios lo que indica que puede tener amplias aplicaciones, pero tiene restricciones de tipo geográfico y climático.

La EUPS fue diseñada como una herramienta de trabajo para conservacionistas, técnicos y programadores. (Wischmeier y Smith, 1977): Las aplicaciones para las cuales la ecuación fue diseñada y probada son:

1. Predicción de pérdida de suelo.
2. Evaluación y selección de prácticas de conservación.
3. Estimación de las longitudes máximas permisibles de las pendientes para un sistema de cultivo dado.

La EUPS es un modelo empírico que permite estimar la pérdida de suelo promedio anual. Los lotes de escurrimiento naturales usados para desarrollar la EUPS fueron acondicionados sobre terrenos de pendientes uniformes esencialmente, donde la deposición de sedimentos fue considerada

despreciable. En otras palabras, la EUPS es un modelo diseñado estrictamente para predecir la pérdida de suelo.

Otros modelos empíricos fueron desarrollados, los cuales incorporan a la EUPS para estimar pérdida de suelo, pero también proporcionan una estimación empírica de la producción de sedimentos. La producción de sedimentos se refiere a la cantidad total de partículas de suelo que salen de un área de drenaje en un periodo de tiempo específico. Así, la producción de sedimentos es un balance que existe entre la pérdida de suelo y la deposición de partículas previamente removidas sobre un área de interés (Nearing *et al.*, 2001).

La EUPS puede considerarse como un modelo integrado por seis factores para predecir la pérdida de suelo promedio anual (A) en un largo periodo de tiempo (un año por ejemplo) ($t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). La ecuación incluye el factor de erosividad de la lluvia (R) ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1}$), el factor de erosionabilidad del suelo (K) ($t \text{ ha h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1} \text{ ha}^{-1}$), los factores topográficos (L y S) (adimensionales) y los factores de cobertura y prácticas de conservación respectivamente (C y P) (adimensionales), y se escribe como:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \quad (4.6.1)$$

La EUPS es una herramienta de planificación muy útil porque lo que pretende es proponer las prácticas de manejo del suelo, vegetación y obras de conservación para reducir las pérdidas de suelo hasta las tasas máximas permisibles en formación de suelo, porque los factores que contribuyen en el incremento de la erosión son fáciles de entender. Desafortunadamente, existen problemas para obtener valores precisos de los parámetros en lugares fuera de Estados Unidos de Norteamérica. Su gran limitante es que predice explícitamente la pérdida de suelo promedio anual. También representa la pérdida de suelo en el cauce y no predice la cantidad de material erosionado y subsecuentemente depositado antes del cauce (Nearing *et al.*, 2001).

Es importante señalar que esta ecuación considera la energía de la lluvia, la resistencia o susceptibilidad del suelo a erosionarse, la longitud y grado de pendiente del terreno, así como manejo de la vegetación y del terreno, lo que hace que se aproxime más a una cuantificación más realista de la erosión, considerando el proceso de salpicado y en parte el transporte por escurrimiento.

4.6.3 Efecto del escurrimiento superficial

Los efectos que produce el escurrimiento superficial en el proceso erosivo se pueden manifestar también de dos formas: disgrega primeramente a los agregados del suelo, y transporta al mismo tiempo aquellas partículas de tierra que por su tamaño y forma son susceptibles de arrastre, (Cadenas de Llano y Blanco, 1963).

La fricción de la vena líquida del flujo superficial sobre las partículas de suelo, propicia la remoción de partículas y el aumento de los sólidos en el caudal. Esta acción, al igual que la energía de las gotas de lluvia y los agentes del intemperismo, constituyen la principal fase de la erosión hídrica y el proceso de transporte de materiales del suelo.

La segunda forma considera que el transporte de las partículas del suelo por el escurrimiento superficial se origina cuando este último ejerce empujes ascendentes que las harán rodar, deslizarse o dar pequeños saltos. Tales empujes serán causa de la formación de turbulencias en la corriente, originándose pequeños vórtices que propician velocidades ascendentes que llegan a poner en suspensión a las partículas de suelo más pequeñas. Así mismo, las partículas que fueron previamente removidas por efecto de las gotas de lluvia o por la habilidad de arrastre del flujo superficial quedan disponibles para ser transportados por el escurrimiento.

4.7 El transporte de materiales

La erosión que tiene lugar en un punto de la superficie de la cuenca manifestada por cualesquiera de las formas de erosión hídrica, se considera que es la fuente principal del material sólido transportado en las laderas y corrientes de agua que la drenan. Parte de este material sólido disgregado proviene también de la erosión que provoca el paso del agua por el lecho del cauce y orillas, pero tal aportación, en relación con la que se genera en la cuenca, es mínima y algunas veces despreciable; (Leopold, 1964).

4.7.1 *Formas de transporte*

Anderson, Gray, Meyer y Colby, citados por López Cadenas y Blanco (1963), reportan que el transporte de material sólido por las corrientes de agua se lleva a cabo de las siguientes formas:

- a) Suspensión: Referida a aquellas partículas de suelo que son arrastradas y transportadas por la corriente de un cauce sin llegar a tocar el fondo.
- b) Saltación: Las partículas de suelo avanzan a saltos sucesivos, describiendo trayectorias discontinuas tanto en el espacio como en el tiempo.
- c) Acarreo: Los materiales transportados ruedan o se deslizan sobre el fondo del cauce.

En términos generales podemos decir, que el transporte de materiales por saltación queda comprendido en los acarreos, por lo que, en este trabajo nos vamos a referir únicamente a este término.

4.7.2 Granulometría de los materiales

Los materiales transportados por las corrientes de agua se pueden clasificar de acuerdo a su tamaño, el cual se determina mediante análisis mecánico para separar las partículas. Uno de los métodos de clasificación más utilizados es el de Atterberg (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clasificación de Atterberg.

Material	Diámetro en mm
Arcillas	Menores de 0.002
Limos	0.002 – 0.02
Arenas finas	0.02 – 0.2
Arenas gruesas	0.2 – 2.0
Gravas	2.0 – 20
Guijarros	Mayores de 20

Los laboratorios de la SAHOP y la Compañía Constructora ICA de México, modificaron la clasificación de tamaños de partículas de Atterberg y utilizan la clasificación que se presenta en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Clasificación de tamaño de partículas Atterberg modificada.

Material	Tamaño	Diámetro en (mm) y (μ)
Guijarros		200 a 20 mm
Gravas	Gruesas	20 a 10 mm
	Medias	10 a 5 mm
	Finas	5 a 2 mm
Arena	Muy gruesa	2 a 1 mm
	Gruesa	1 a 0.5 mm
	Media	0.5 a 0.2 mm
	Fina	0.2 a 0.1 mm
	Muy fina	0.1 a 0.05 mm
Limo	Grueso	50 μ a 20 μ
	Medio	20 μ a 10 μ
	Fino	10 μ a 5 μ
Arcillas	Gruesa	5 μ a 2 μ
	Fina	2 μ a 1 μ
	Muy fina	< 1 μ

La clasificación anterior queda definida de acuerdo con la curva granulométrica propuesta por Hazen (Figura 3). Notas de clase. Esta curva clasificada los materiales según su graduación de las siguientes categorías:

- a) Bien graduado: Cuando se encuentran presentes en el material todos los tamaños de partículas desde las más pequeñas hasta las más grandes.
- b) Uniforme: Cuando una gran cantidad de partículas tiene aproximadamente el mismo diámetro.

- c) Graduación abierta: Cuando faltan uno o más de los diámetros de las partículas intermedias.

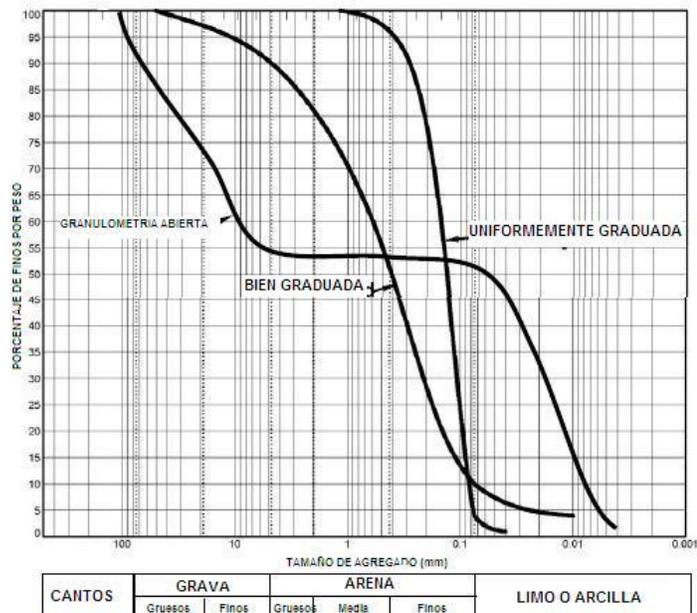


Figura 3. Curva granulométrica para la clasificación de materiales.

Para poder medir la distribución variable de las partículas, se han propuesto varios parámetros estadísticos. Los más usados son los siguientes:

1. Coeficiente de uniformidad. Nos da una idea de la distribución de los distintos diámetros, y se define como sigue:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4.7.1)$$

Siendo:

Cu = Coeficiente de uniformidad en %.

D_{60} y D_{10} = Diámetro que corresponden al 60% y al 10% de la curva granulométrica, respectivamente.

2. Coeficiente de curvatura. Nos da idea de la forma de la curva granulométrica, y se define de la siguiente forma:

$$Cc = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60}) \quad (4.7.2)$$

Siendo:

C_c = Coeficiente de curvatura en %.

D_{10} , D_{30} y D_{60} = Diámetros de partículas que corresponden al 10%, 30% y 60%, respectivamente, de la curva granulométrica.

4.7.3 Diferencias entre acarreo y suspensión

Las diferencias entre acarreo y suspensión no están bien definidas. De hecho no existe una discontinuidad brusca entre ambos procesos, fundamentalmente las diferencias que pueden señalarse son las siguientes:

- a) Los elementos transportados por acarreo son de mayor tamaño que los elementos transportados en suspensión. Además el tamaño del material transportado en suspensión está estrechamente ligado al grado de turbulencia de la corriente, Quesnel; citado por López Cadenas y Blanco (1968) establece lo siguiente:

Para régimen laminar los elementos transportados son arcillas coloidales de diámetro menor de una micra.

Cuando el régimen es transicional o de débil turbulencia son transportados en suspensión arcillas finas cuyo diámetro varía entre una y veinte micras.

Para cuando el régimen es de turbulencia media son transportados en suspensión arenas cuyo diámetro varía entre 20 micras y 2 milímetros.

En régimen de gran turbulencia son transportados en suspensión gravas entre 2 mm y 30 mm de diámetro.

Para establecer límites de separación entre los regímenes de turbulencia se usa el número de Reynolds que se escribe como sigue:

$$Re = \frac{vR}{\nu} \quad (4.7.3)$$

Dónde:

Re = Número de Reynolds, cuyo valor es adimensional.

ν = Velocidad media de la corriente en $m \text{ seg}^{-1}$.

R = Radio hidráulico de la sección transversal en m.

V = Viscosidad cinemática del agua en $m^2 \text{ seg}^{-1}$.

Para distinguir si un escurrimiento se encuentra en un régimen determinado, se usan los siguientes valores del número de Reynolds; (Chow, 1959).

Para régimen laminar $Re < 2000$

Para régimen transicional $2000 \leq Re \leq 5000$

Para régimen turbulento $Re > 5000$.

- b) Los materiales transportados por acarreo presentan trayectorias discontinuas en el espacio y en el tiempo, ya que su transporte lo realizan rodando, dando pequeños saltos o deslizándose en trayectorias cortas y sucesivas. Los materiales transportados en suspensión, al contrario, se realizan sin depositarse las partículas en largos trayectos de espacio y tiempo.
- c) Para un gasto dado, corresponden diversas concentraciones de material sólido en suspensión a lo largo de la sección transversal del cauce, mientras que en el lecho del río, la cantidad de material acarreado puede ser más o menos uniforme.
- d) Los materiales de acarreo se localizan en el lecho del cauce o próximos a este. Mientras que los materiales en suspensión afectan a toda la carga o altura del tirante de agua.
- e) El acarreo generalmente se produce de la erosión que causa el paso del agua por el lecho y orillas del cauce. Mientras que el transporte de materiales en suspensión es el producto de las diferentes formas de erosión que ocurren en la cuenca.

4.8 Transporte de sedimentos

El transporte es el traslado o acarreo de las partículas erosionadas de una roca por un agente geológico. La capacidad de transporte del agente geológico depende tanto de las características del agente como de las características de las partículas a transportar.

El movimiento de los sedimentos se puede dar mediante dos mecanismos diferentes: escorrentía superficial sobre las laderas de la cuenca de drenaje y la capacidad de transporte en suspensión y en el lecho por el flujo en los cauces.

4.8.1 Definición y conceptos

El sedimento se define como todas las partículas de suelo y roca de una cuenca que son arrastradas y transportadas por una corriente de agua. Los sedimentos se pueden diferenciar en dos grandes grupos: el del fondo o lecho que se mueve por arrastre y el de lavado que llega a la corriente y que se mueve en suspensión. Al estudiar un tramo de río, el primero es el material que forma el fondo o álveo del cauce y el segundo está formado por partículas muy finas como limos y arcillas que el agua transporta en suspensión.

El material del fondo y el material de lavado se diferencian por las características hidráulicas de la corriente y de las características físicas del material; por tanto si en dos ríos se tiene tramos semejantes y con idéntico material en el fondo, transportan las mismas cantidades de material del fondo bajo condiciones hidráulicas semejantes. Lo anterior no ocurre con el material de lavado; en forma general, un río puede transportar tanto material de lavado como llegue a él, casi independientemente de las características hidráulicas de la corriente. Así, dos ríos semejantes con igual material en el fondo, pero uno con cuenca protegida o forestada y otro con una cuenca desprotegida con fuertes pendientes y material suelto sobre su superficie, arrastran cantidades completamente diferentes de material de lavado, llegando el primero al extremo de no transportar nada de ese material.

El material de lavado es todo aquel material fino que no se encuentra representando en el material del fondo. Cuando los diámetros de este último no son conocidos, se establece como límite entre ambos materiales al diámetro de 0.062 mm, de tal manera que el transporte de lavado es el formado por todas las partículas menores que ese diámetro.

El transporte de lavado siempre tiene lugar en suspensión, mientras que el transporte del material del fondo puede tener lugar dentro de la capa del fondo o en suspensión. La capa del fondo, como su nombre lo indica, se encuentra justo arriba del lecho de un cauce. Einstein (1950), quien introdujo este concepto, le asignó un espesor a dos veces el diámetro de la partícula considerada. Por tanto, en una condición real hay tantas capas de fondo como partículas de diferente tamaño se tengan en el fondo.

El transporte unitario de sedimentos se expresa en peso o en volumen. Si se expresa en peso se designa con la letra " g_x " cuyas unidades serán $\text{kg f s}^{-1} \text{ m}$ o $\text{N s}^{-1} \text{ m}$ y si se expresa en volumen, se designa con la letra " q_x " y sus unidades son $\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}$. Es muy importante tener en mente que el volumen q_x obtenido con las fórmulas de transporte es el ocupado por las partículas sólidas sin dejar espacios entre ellas.

Por tanto, la relación entre g_x y q_x está dada por:

$$g_x = \gamma_s q_x \quad (4.8.1)$$

El subíndice x depende del tipo de transporte y se explicará más adelante.

Por ejemplo, si se tiene que $q_x = 2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}$, ello significa que cada segundo y por cada metro de ancho de la sección está pasando un volumen sólido de 2 m^3 de material, del que están constituidas las partículas, sin que haya espacios entre ellas.

El volumen real V_x que ocuparía el material transportado, si llegara a depositarse, se obtiene de la relación.

$$V_x = \frac{q_x b \Delta t}{(1 - n)} = \frac{g_x b \Delta t}{\gamma_s (1 - n)} = \frac{Q_x \Delta t}{(1 - n)} = \frac{G_x \Delta t}{\gamma_s (1 - n)} \quad (4.8.2)$$

Dónde:

q_x, g_x = transporte unitario de sedimentos expresado en volumen ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}$) o en peso ($\text{kgf s}^{-1} \text{ m}^{-1}$), respectivamente.

Q_x, G_x = transporte de sedimentos que pasa por la sección completa de un cauce expresado en volumen ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) o en peso (kgf s^{-1}), respectivamente.

Δt = intervalo de tiempo.

V_x = volumen real ocupado por los sedimentos que pasan por una sección, en el lapso Δt , una vez que ellos se han depositado.

n = porosidad del material depositado.

b = ancho del fondo del cauce.

Conviene recordar que la relación de vacíos e se relaciona con la porosidad mediante las relaciones.

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (4.8.3)$$

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (4.8.4)$$

Por lo que si se conoce la relación de vacíos, la ecuación 4.8.2 se escribe como.

$$V_x = q_x b \Delta t (1 - e) = \frac{g_x b \Delta t}{\gamma_s} (1 - e) = Q_x \Delta t (1 - e) = \frac{G_x \Delta t}{\gamma_s} (1 - e) \quad (4.8.5)$$

Como en ocasiones se trabaja con el peso sumergido de las partículas, el transporte unitario de partículas expresado en peso sumergido se designa como g'_x . Sus relaciones con g_x y q_x son:

$$g'_x = \frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma_s} g_x = \frac{\rho_s - \rho}{\rho_s} g_x = \frac{s_s - 1}{s_s} g_x \quad (4.8.6)$$

$$g'_x = (\gamma_s - \gamma) q_x = (\rho_s - \rho) g q_x \quad (4.8.7)$$

Dónde:

γ_s, γ = peso específico de las partículas y del agua respectivamente, en kg f m^{-3} o N m^{-3} . El peso específico del agua se obtiene en función de la temperatura con ayuda de las tablas.

ρ_s, ρ = densidad de las partículas y del agua respectivamente, en kg m^{-3} . La densidad del agua se obtiene en función de la temperatura con ayuda de las tablas.

G = aceleración debida a la gravedad, en m s^{-2} .

S_s = densidad relativa de las partículas, adimensional.

$$S_s = \frac{\gamma_s}{\gamma} = \frac{\rho_s}{\rho} \quad (4.8.8)$$

Se ha indicado que G_x y Q_x designan el transporte de sedimentos que tiene lugar en toda la sección transversal del río, expresados en peso, kgf s^{-1} o N s^{-1} , o en volumen, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ respectivamente; por tanto se cumplen las relaciones.

$$G_x = b g_x \quad (4.8.9)$$

$$Q_x = b q_x \quad (4.8.10)$$

Donde b es el ancho del fondo del cauce o canal. Para obtener el gasto de sedimentos en la capa de fondo, que pasa por una sección de un río, algunos autores recomiendan utilizar como ancho efectivo, es decir, donde tiene lugar el transporte de fondo, a $0.8 b$, tal que.

$$G_x = 0.8 b g_x \quad (4.8.11)$$

$$Q_x = 0.8 b q_x \quad (4.8.12)$$

Usualmente se utilizan las ecuaciones 4.8.9 y 4.8.10 pero en un problema real, conviene tener en mente la recomendación anterior para que al observar el cauce natural, se verifique si el transporte ocurre en todo el fondo o disminuye notablemente cerca de las orilla. De cumplirse lo anterior conviene multiplicar b por un coeficiente menor que uno, aunque no sea necesariamente 0.8.

Cuando se calcula el transporte del fondo en suspensión, se considera usualmente que ocurre en todo el ancho de la sección, por lo que se trabaja con el ancho de la superficie libre B o el ancho medio B_m .

$$B_m = \frac{b + B}{2} \quad (4.8.13)$$

Para facilitar el cálculo del transporte de sedimentos, comprender claramente los datos que se requieren para su cuantificación y agrupar convenientemente los criterios y fórmulas de transporte, se propone distinguir las clases de transporte; que se muestran en la Figura 4 y Cuadro 3.

4.8.1.1 *Arrastre en el lecho del cauce.*

Es el material del fondo del cauce que es arrastrado por la corriente dentro de la capa de fondo, cuyo espesor, según Einstein (1950) es igual a dos veces el diámetro de la partícula considerada. Otros autores, como Van Rijn (1986) y Pacheco-Ceballos (1989) proponen diferentes espesores para esta capa de fondo y cuando ello ocurre, tamaños superiores a 10 mm no pueden ser movidos y tienden a acumularse en las partes altas de los valles, para que exista arrastre necesita ser partículas menores de 10 milímetros, el valor de ese espesor se indica claramente en la presentación del método correspondiente. A este arrastre se le designa con el subíndice B.

El arrastre en la capa de fondo se calcula en función de las características hidráulicas de la corriente, la geometría del cauce y las propiedades físicas del material del fondo.

4.8.1.2 *Transporte en suspensión en el cauce.*

Está formado por el material del fondo del cauce y el aportado por las áreas aledañas a los cauces y que es transportado por la corriente en suspensión; es decir, dentro del seno del líquido arriba de la capa de fondo. El flujo, debido a su velocidad y turbulencia, levanta las partículas del lecho y las mantiene en suspensión, aunque continuamente se produce un intercambio de partículas entre las que hay en la capa de fondo y las que se transportan en suspensión. La concentración o número de partículas en suspensión disminuye cuando la turbulencia y velocidad de la corriente decrece. Cuando ocurre lo anterior, una cierta cantidad de partículas retorna al fondo. A este arrastre se le designa con el subíndice BS.

El material del fondo es granular en la mayoría de los ríos; es decir, está formado por partículas sueltas de arena, grava o boleos. Las fuerzas que tratan de mover a esas partículas son las de arrastre y sustentación que la corriente ejerce sobre ellas. Las fuerzas que tratan de oponerse al movimiento son el peso propio de cada partícula y la fricción que desarrolla al descansar sobre otras partículas, la que también es función del peso. Al ser levantadas y puestas en suspensión, el peso de cada partícula es la única fuerza actuante para que las partículas retornen nuevamente al

fondo. La distribución de la concentración de partículas, en una vertical, es más uniforme cuanto más fino es el material y mayor la turbulencia de la corriente. Cuando el material es grueso o la turbulencia es menor, se tiene muy poco material en suspensión cerca de la superficie y concentraciones mayores cerca del fondo.

El transporte del fondo en suspensión se calcula en función de las características hidráulicas de la corriente, la geometría del cauce y las propiedades físicas del material del fondo. También se puede obtener en función de los primeros dos aspectos señalados y de una muestra de agua sedimentos tomada en un punto conocido de la sección. De esa muestra se debe obtener la concentración de partículas en suspensión y las propiedades físicas de las partículas.

4.8.1.3 *Transporte de fondo o transporte total del fondo*

Está formado por el material del fondo que es transportado por la corriente, tanto dentro de la capa de fondo como en suspensión. Por tanto, el transporte de fondo es igual a la suma del arrastre en la capa de fondo más el transporte de fondo en suspensión. Se designa con el subíndice **BT**. Se cumple por tanto la relación.

$$g_{BT} = g_B + g_{BS} \quad (4.8.14)$$

4.8.1.4 *Transporte de lavado*

Está formado por el material muy fino que es transportado en suspensión y que no se encuentra representado en el material del fondo del cauce. Al considerar una sección determinada, todo el material de lavado procede de los tramos de aguas arriba. Su origen se encuentra en el suelo de la cuenca erosionado por las gotas de lluvia, o bien, proviene en ocasiones de la erosión que el mismo río produce en sus márgenes. Cuando no se conoce el tamaño de las partículas del fondo, aquellas transportadas en suspensión y menores que 0.062 mm, se consideran material de lavado. Se denomina con el subíndice **L**.

El transporte de lavado depende de la cantidad de partículas finas que la cuenca aporta al río bajo la acción de una lluvia. Como no es función de las características hidráulicas de la corriente, sólo se puede valorar cuando se toma una muestra de agua con partículas en suspensión y se separa la porción de partículas que no están representadas en la curva granulométrica del material del fondo.

4.8.1.5 Transporte en suspensión

Está formado por la totalidad de partículas que son transportadas en suspensión. Por tanto, el transporte en suspensión es igual a la suma del “fondo en suspensión” más el “de lavado” y se designa con el subíndice S . Se cumple así la relación.

$$g_S = g_{BS} + g_L \quad (4.8.15)$$

Cuando se toma una muestra de agua en una corriente natural, se obtiene siempre la concentración relacionada al transporte en suspensión, ya que en ella puede haber material de lavado y partículas que proceden del fondo.

Una muestra que únicamente tenga material de lavado se puede obtener en la zona de un río en el que las velocidades sean muy bajas y el flujo no pueda levantar las partículas del fondo. Una muestra que contenga únicamente material del fondo en suspensión se obtiene en un canal de laboratorio con fondo arenoso donde se use agua limpia; en la naturaleza se encuentra en algunos afluentes en la zona de montaña y también en los canales de comunicación que hay entre lagunas costeras y el mar, ya que al subir la marea y entrar el agua de mar, ésta lo hace generalmente libre de limos y arcillas.

Al tomar una muestra de agua-sedimento conviene separar el material que procede del fondo y el material de lavado. La forma práctica de hacerlo consiste en pasar la muestra a través de una malla 200 cuya apertura es de 0.074 mm (valor cercano a 0.062 mm establecido como separación entre ambos materiales). Las partículas retenidas en la malla corresponden al material del fondo y las que pasan, y quedan en la charola, al material de lavado.

4.8.1.6 Transporte total

Está formado por todas las partículas que son transportadas por el río, procedan del fondo o sean de lavado. Se denomina con el subíndice T .

Por lo expuesto anteriormente, se cumplen las relaciones siguientes:

$$g_T = g_L + g_{BT} \quad (4.8.16)$$

$$g_T = g_L + g_{BS} + g_B \quad (4.8.17)$$

$$g_r = g_L + g_{BT} \quad (4.8.18)$$

$$g_T = g_S + g_B \quad (4.8.19)$$

La mayoría de los primeros métodos desarrollados para cuantificar el transporte de sedimentos, pretenden obtener el material que es arrastrado en la capa del fondo; sin embargo, las pruebas efectuadas fueron hechas en canales de laboratorio y en ellos, el arrastre se conocía al cuantificar todas las partículas que eran transportadas y llegaban al final del canal. Cuando las velocidades del flujo eran altas, algunas partículas eran transportadas en suspensión, por lo que el transporte obtenido era el total del fondo y no únicamente el arrastre en la capa de fondo.

En 1950, Einstein introdujo el concepto de **“capa de fondo”** y separó el arrastre en la capa de fondo del transporte en suspensión; sin embargo, él tomó en cuenta resultados de otros autores en que se había cuantificado la suma de los dos arrastres y no únicamente el arrastre en la capa de fondo. Ese concepto es confuso y poco útil cuando se tiene un material bien graduado en el fondo, ya que la capa de fondo es igual a dos veces el diámetro de cada partícula considerada, lo cual puede dar un valor, por ejemplo, de 10 cm para una partícula grande mientras que para las arenas finas, dentro de la misma muestra, el espesor de su capa sería de sólo una fracción de milímetro. Por lo expuesto, otros autores como Fernández Luque (1974), Reizes (1978) y Hayashi-Ozaki (1980) han estudiado el espesor de esa capa, dentro de la cual ocurren pequeños saltos de las partículas y han obtenido la altura y longitud de esos saltos. Por su parte, Van Rijn (1984) propuso una relación empírica para determinar el espesor de la capa de fondo para un conjunto de partículas de distintos tamaños, Cuadro 3.

Cuadro 3. Clasificación de las formas de transportes de sedimentos y métodos para cuantificarlos.

FORMAS DE TRANSPORTE				MÉTODOS DE CUANTIFICACIÓN				
<p>Transporte Total</p> <p>g_B arrastre en la capa de fondo</p> <p>g_{BS} transporte total del fondo</p> <p>g_L transporte de lavado</p>	<p>Según la procedencia de las partículas</p> <p>g_{BT} transporte total del fondo</p> <p>g_L transporte de lavado</p>	<p>Según el mecanismo de transporte</p> <p>g_S transporte en suspensión</p> <p>g_B arrastre en la capa de fondo</p>	<p>Transporte del material del fondo, g_{BT}</p> <p>g_{BS} transporte de fondo en suspensión</p> <p>g_B arrastre en la capa de fondo</p>	<p>Arrastre en la capa de fondo</p>	<p>Transporte total del fondo g_{BT}, sin separar g_B y g_{BS}</p>	<p>Transporte total del fondo g_{BT}, separando g_B y g_{BS}</p>	<p>Transporte en suspensión g_S, conocida C_a y y_a</p>	<p>Transporte de lavado g_L, a partir de una concentración C_L conocida en y_a</p>
<p>$g_T = g_B + g_{BS} + g_L$</p> <p>$g_{BT} = g_{BS} + g_B$</p> <p>$g_S = g_B + g_{BS}$</p> <p>$g_{BT} = g_B + g_{BS}$</p> <p>$g_S = g_{BS} + g_L$</p>	<p>$g_{BT} = g_{BS} + g_B$</p>	<p>$g_S = g_B + g_{BS}$</p>	<p>$g_{BT} = g_B + g_{BS}$</p>	<p>$g_{BT} = g_B + g_{BS}$</p>	<p>$g_{BT} = g_B + g_{BS}$</p>	<p>$g_{BT} = g_B + g_{BS}$</p>	<p>$g_{BT} = g_B + g_{BS}$</p>	<p>$g_{BT} = g_B + g_{BS}$</p>

4.9 Modelo Hidrológico

La importancia de los modelos radica, en la simulación y predicción de los fenómenos físicos a corto, mediano y largo plazo. Asimismo a través de los modelos podemos obtener relaciones causa-efecto, sin haber realizado cambios en los sistemas reales.

En hidrología un modelo se utiliza para entender por qué un sistema de escurrimiento observado se está comportando de una manera particular para predecir cómo este mismo sistema se comportará en el futuro (Fetter, 2001). El análisis del flujo observado y la predicción de su comportamiento futuro, son parte integral en la creación de la infraestructura en el mundo real que será capaz de existir sostenible dentro de los sistemas hidrológicos e hidráulicos. Los modelos pueden ser clasificados como física, analógicos, o matemáticos en la naturaleza.

Los modelos matemáticos pueden representarse de varias maneras dependiendo de las relaciones de insumo-producto y lo que las leyes y principios en que se basan. Un modelo matemático puede utilizar ecuaciones teóricas que siguen las leyes de la naturaleza y se clasifican como base física, o el modelo puede utilizar las relaciones basadas en experimentos para obtener ecuaciones y ser clasificado como base empírica. Un modelo donde los parámetros de entrada varían espacialmente o temporalmente es un modelo distribuido, en contraste, un modelo agrupado, tiene un conjunto de parámetros de entrada espacial o temporalmente uniforme. Los modelos también pueden simular eventos o un evento en particular en período corto de tiempo, o un modelo pueden ser continuo y la salida es para varios años de datos. La medida en que se determinan los parámetros del modelo puede clasificar aún más modelos. Un modelo determinístico tiene todos los parámetros completamente determinados por las ecuaciones de gobierno, un modelo estocástico o probabilístico tiene determinación incompleta y algunas variables están total o parcialmente descrita por las leyes de la probabilidad. (DHI, 2004)

La mayoría de los modelos de erosión no consideran la variabilidad espacial de sedimentos que llegan a los arroyos. En algunos casos, una tasa media de erosión se estima para una área de captación mediante la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, Wischmeier y Smith, 1978) o su versión revisada (RUSLE, Renard et al., 1991) en conjunción con un parámetro de relación de descarga de sedimento (por sus siglas en inglés SDR) para determinar el suministro de sedimentos de las laderas de las corrientes (por ejemplo, Williams, 1975; Arnold et al, 1998). El uso de los parámetros para SDR es bien conocido, ya que la mayoría de los sedimentos generados por la erosión del suelo se deposita dentro de la cuenca, y sólo una fracción de ella llegará al sistema de corrientes y la salida de la cuenca. Muchas ecuaciones de regresión empíricas han sido desarrollado para predecir el SDR de las laderas de una zona de drenaje (por ejemplo, Roehl, 1962; Vanoni, 1975; Walling, 1983; Ferro y Minacapilli, 1995).

La modelización numérica y la disponibilidad de datos espaciales sobre el uso del suelo, los tipos, la topografía y el clima han permitido elaborar mapas de erosión del suelo de alta resolución espacial que se construyen a escala regional, sobre todo con un enfoque USLE / RUSLE. Un método muy simple basado en una relación de la descarga de sedimento fijo se utiliza para calcular la

proporción de sedimento erosionado entregado a la red de las corrientes. Sin embargo, este enfoque no tiene en cuenta la variabilidad espacial en los procesos de entrega de sedimentos. Se ha demostrado que el SDR no es homogéneo a través de una línea divisoria, pero varía con los cambios en la zona de la cuenca y la pendiente (Osterkamp y Toy, 1997).

4.10 WATEM/SEDEM

WATEM / SEDEM es un modelo hidrológico que estima la erosión espacialmente distribuida asociado con un modelo de transporte de sedimentos basado en la RUSLE (Figura 4). El modelo WATEM/SEDEM predice la descarga de sedimentos a los arroyos con una ecuación de la capacidad de transporte de sedimentos y un modelo de transporte en cascada (Van Rompaey et al., 2001), está compuesto por el modelo WATEM y el modelo SEDEM.

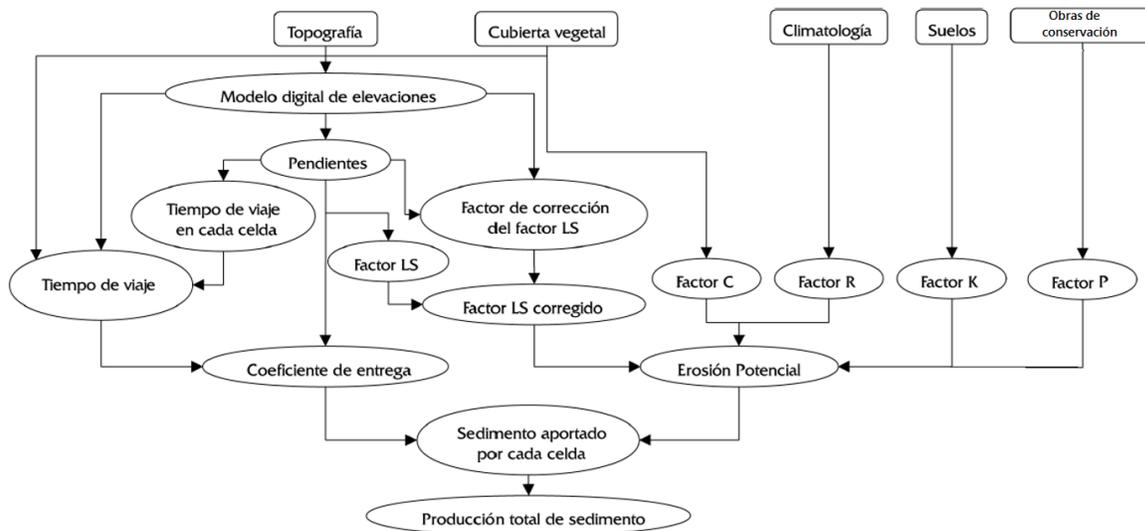


Figura 4. Diagrama de flujo de información y estructura del modelo WATEM/SEDEM.

El WATEM es un modelo que se distribuye espacialmente para simular la erosión y deposición por procesos de agua y labranza en un paisaje de dos dimensiones. A diferencia de los modelos dinámicos más complejos (por ejemplo WEPP o EUROSEM), WATEM se centra en el espacio, y menos en lo temporal y la variabilidad de los parámetros pertinentes. Como tal, WATEM permite incorporar la estructura del paisaje o la organización espacial de las diferentes unidades de tierra y la conectividad entre ellos. Con el fin de evitar mayores problemas con respecto a la variabilidad espacial de los parámetros y la incertidumbre su estimación, WATEM es un modelo topográfico simple. El componente de agua de WATEM utiliza una versión adaptada de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE) ya que valores (aproximados) de los parámetros están disponibles para muchas áreas. Estudios recientes han reconocido la importancia la labranza el movimiento del suelo y su impacto en la erosión del suelo en las tierras agrícolas. El componente de la labranza de WATEM utiliza una ecuación de tipo de difusión por lo que la intensidad del

proceso de labranza se describe por un parámetro (coeficiente de transporte de labranza o *ktil* - valor). Los *ktil* - valores para diferentes instrumentos se pueden encontrar en la literatura (Govers et. al 1994).

SEDEM es el componente de sedimentos y utiliza la versión adaptada de la RUSLE para predecir la producción de sedimentos y está asociado con los escurrimientos estimados con el modelo WATEM.

La estructura del modelo considera cinco variables importantes para determinar la producción total de sedimento a la salida de la cuenca. Las variables son la topografía obtenida con un modelo digital de elevaciones que sirvió para obtener el valor de LS, la cubierta vegetal (factor de C) que influye en el proceso erosivo, la cantidad de precipitación que está asociado con el factor de R para el periodo de estudio, el tipo de suelo (factor de K) y la presencia o no de las prácticas de manejo (factor P).

WATEM / SEDEM se ha aplicado a las cuencas con una amplia gama de las condiciones ambientales, que incluyen las áreas de cultivo de material geológico sedimentario eólico del centro de Bélgica (Van Rompaey et al, 2001; Verstraeten et al, 2002.); las zonas montañosas de la República Checa (Van Rompaey et al, 2003); una variedad de ecosistemas en Italia (Van Rompaey et al, 2005), y las zonas boscosas de montaña en el sur de África (Van Rompaey et al, 2003; Vente et al, 2008) comparó tres modelos de distribución espacial de la erosión del suelo y la producción de sedimentos: WATEM / SEDEM, el riesgo de erosión del suelo paneuropea basada físicamente evaluada (PESERA), y un modelo de calificación espacialmente distribuida de nuevo desarrollo (SPAD). SPAD y WATEM / SEDEM produjeron los mejores resultados, explicando hasta 67% y 47% de la variación en la producción de sedimentos, respectivamente.

4.10.1 Antecedentes del modelo

En la actualidad existen varios trabajos relacionados con el modelo WATEM/SEDEM, uno de estos trabajos realizados para dos cuencas del Pirineo aragonés, la cuenca del embalse de Barasona (1504 km²), drenada por los ríos Ésera e Isábena, donde la base de datos para el proceso de calibración fue el registro de 3 años de sedimentos en suspensión (mayo 2005-mayo 2008) a la salida de la subcuenca del Río Isábena y para la validación se utilizó el registro histórico de sedimentación del embalse de Barasona; y la cuenca experimental de Arnás (2.84 km²), donde se contó para la calibración con datos espacialmente distribuidos de tasas de erosión y sedimentación derivadas de inventarios de Cs137, más el registro de seis años de sedimento en suspensión a la salida de la cuenca de Arnás para el proceso de validación.

El objetivo del trabajo fue la calibración y validación del modelo WATEM/SEDEM, un modelo empírico-conceptual espacialmente distribuido, para predecir erosión y la producción de sedimentos. Una gran parte de los modelos de erosión aplicados a escala de cuenca se basan en una representación espacialmente agregada, es decir en la subdivisión del espacio en superficies a las que se supone un comportamiento homogéneo (subcuencas, unidades hidrológicas, etc.). Esta

aproximación conlleva una deseable simplificación de los cálculos, pero presenta dificultades para abordar problemas relacionados con el transporte de sedimentos y la identificación de áreas que son fuente de sedimento, que deben tratarse mediante una representación espacial continua. Los modelos espacialmente distribuidos, en cambio, permiten una aproximación más precisa a este problema, a costa de una mayor complejidad de cálculo.

El proceso de calibración para el embalse de Barasona mostró el problema que se tiene al intentar calibrar los parámetros de capacidad de transporte con una sola variable (la exportación de sedimento a la salida de la cuenca), haciendo imposible encontrar un solo conjunto de parámetros que optimicen la función de error y obligando a adoptar una solución de compromiso. En la cuenca de Arnás el uso de datos espacialmente distribuidos de producción de sedimentos derivados de inventarios de Cs137 permitió calibrar los parámetros empíricos de capacidad de transporte de una forma satisfactoria, encontrando una sola combinación de valores que optimiza la función de error. Con los resultados obtenidos se demuestra que la calibración de los parámetros de capacidad de transporte es un aspecto fundamental de WATEM/SEDEM y de otros modelos similares. Para obtener una estimación fiable de la distribución espacial de los procesos de erosión y transporte de sedimento se requirió de una calibración y validación con datos espacialmente distribuidos de pérdida o ganancia de suelo que permitió a su vez realizar una calibración espacialmente distribuida de los parámetros relativos a la capacidad de transporte.

Estudios relacionados (Shi, 2012) se han realizado en China en el área de las Tres Gargantas que abarca 21 condados y ciudades importantes en la provincia de Hubei y el municipio de Chongqing con un área total de 58,800 km². Para análisis del modelo, este fue calibrado con la base de datos de producción de sedimentos en la salida de la cuenca Wangjiaqiao.

Donde concluyeron que la estructura de WATEM/SEDEM puede ser demasiado simple para una descripción precisa de los procesos de flujo de los sedimentos. La necesidad de reconocer y hacer frente a los problemas asociados con los datos y la incertidumbre del modelo ofrece retos para el futuro que, si abordados adecuadamente, mejorará el valor del modelo para los usuarios y extender sus aplicaciones potenciales.

El modelo WATEM/SEDEM proporciona un método sencillo para la calibración, y permite el análisis de la organización espacial de las distintas clasificaciones de suelo y métodos para la conservación del suelo. El modelo facilita la toma de decisiones para la selección de prácticas de conservación de suelo cuando se combinan con el análisis de escenarios. Los resultados del modelo mostraron que se podría reducir significativamente la erosión de laderas y la producción de sedimentos en la cuenca. Sin embargo, el efecto de las medidas de control de sedimentos es menor de lo que se esperaría a nivel de cuenca. Esto sugiere que los sedimentos medidos en los puntos de control, tales como almacenamiento de agua o tanques de retención de sedimentos sólo deben desempeñar un papel complementario. En términos de la pérdida de suelos y reducción de sedimentos, la estructura óptima del uso del suelo y las medidas de conservación del suelo son mucho más eficaces.

Distintos estudios se basan en el estudio de cuencas, pero otros se enfocan en evaluar distintos modelos donde WATEM/SEDEM fue recomendado para identificar áreas de origen de sedimentos

a pesar de ser parte de los modelos que fueron validados sólo para la captación de la producción de sedimentos. Aunque también se observó que el modelo obtuvo mejores resultados en cuencas Belgas donde obtuvo un error de 36% para 21 cuencas comparado con un error de 92% para cuencas Españolas. Estos resultados nos indican que para todos los casos el error puede ser minimizado por la calidad de la información de ingresada (tipo de suelo, uso de suelo, DEM, clima) y una mejor representación de la erosión de los datos observados.

4.10.2 Evaluación de la tasa de erosión del suelo media anual

WATEM/SEDEM tiene la opción de simular tanto la erosión por labranza como por el agua. En este estudio en la cuenca del Río Texcoco, sin embargo, el modelo fue utilizado para simular el componente de la erosión ocasionado por el escurrimiento del agua, por ser el proceso de erosión dominante en el área de estudio (Nyssen *et al.*, 2004). El componente de la erosión del agua de WATEM/SEDEM utiliza una versión adaptada de la ecuación universal de pérdida de suelo revisada (RUSLE; Renard *et al.*, 1997):

$$SL = R \times K \times LS_{2D} \times C \times (P) \quad (4.10.1)$$

Dónde:

SL es la pérdida media anual de suelo ($\text{kg m}^{-2} \text{año}^{-1}$)

R es el factor de erosividad de la lluvia ($\text{MJ mm m}^{-2} \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$)

K es el factor de erosionabilidad del suelo ($\text{kg h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$)

LS es el factor en dos dimensiones de longitud y grado de pendiente (área).

C es el factor de uso y manejo de suelo y cultivo.

P es el factor de obras de control de la erosión del suelo.

Con el fin de adaptar el RUSLE a un paisaje de dos dimensiones, la longitud de la pendiente ascendente fue sustituida por unidad del área de contribución, es decir, el área de drenaje pendiente ascendente (vista aguas arriba) por unidad de longitud de contorno. Este último se calculó utilizando el procedimiento propuesto por Desmet y Govers (1996a).

4.10.3 Evaluación de la capacidad media anual de transporte

La capacidad de transporte (TC) es la máxima masa del suelo que puede salir de una celda de la cuadrícula por unidad de longitud de la cara inclinada hacia debajo de la propia celda. Para cada celda de la cuadrícula, se evaluó un TC medio anual (kg m^{-1}). Para cada tipo de uso del suelo, la capacidad de transporte puede ser diferente. Para Bélgica central, WATEM/SEDEM fue calibrado para las tierras de cultivo con alta capacidad de transporte (KTC) y tierras no cultivables, con una baja capacidad de transporte.

La versión original de TC (Van Rompaey et al, 2001) asume que la capacidad de transporte de sedimentos es proporcional a la del potencial de una cárcava y la erosión entre surcos mediante el cálculo de TC de la siguiente manera:

$$TC = KTC \times R \times K \times (LS_{2D} - 4.1 S_{IR}) \quad (4.10.2)$$

Dónde:

TC es la capacidad de transporte ($\text{kg m}^{-1} \text{año}^{-1}$)

KTC es el coeficiente de capacidad de transporte (m)

S_{IR} es el grado de pendiente de entre surcos

El coeficiente KTC de capacidad de transporte (m) describe la proporcionalidad entre el potencial de erosión en surcos y la capacidad de transporte. Se puede interpretar como la distancia teórica de la pendiente ascendente que se necesita para producir el suficiente sedimento para llegar a la capacidad de transporte en la celda de la cuadrícula, suponiendo uniforme la pendiente y la descarga de escurrimiento.

La inclinación de la pendiente entre surcos se calcula con base a la ecuación propuesta por Govers y Poesen (1988) de la siguiente manera:

$$S_{IR} = 6.86 S_g^{0.8} \quad (4.10.3)$$

Dónde:

S_g es la inclinación de la pendiente (mm^{-1})

La segunda versión (modificada) del TC fue presentada por Verstraeten *et al.* (2007) de la siguiente manera:

$$TC = KTC \times R \times K \times A^{1.4} \times S^{1.4} \quad (4.10.4)$$

Dónde:

KTC refleja el componente de uso del suelo

A es el área de contribución pendiente arriba por unidad de longitud de contorno ($m^2 m^{-1}$)

S es el gradiente de la pendiente local (mm^{-1}).

Esta ecuación se basa en la ecuación utilizada para predecir el transporte de sedimentos como una función de descarga del escurrimiento y la inclinación de la pendiente (Beasley *et al.*, 1980; Prosser y Rustomji, 2000). La descarga del escurrimiento en esta ecuación se sustituye por el área que contribuye pendiente arriba. Los exponentes reflejan las características del paisaje que influyen en el transporte de sedimentos, tales como intensidad de la lluvia, la erosionabilidad del suelo y de la vegetación y las características del paisaje que influyen en la generación de escurrimiento.

Basado en una revisión hecha por Prosser y Rustomji (2000), se seleccionaron los valores de 1.4 ya que éstos eran los valores medios obtenidos a partir de un gran número de estudios realizados. Van Rompaey *et al.* (2001) encontró que era útil hacer una distinción entre la capacidad de transporte en tierras de cultivo y en tierras no cultivables mediante el uso de dos valores diferentes KTC. Se utilizó el mismo enfoque en este estudio.

4.10.4 Trayectoria del sedimento

WATEM / SEDEM emplea un algoritmo de recorrido para transferir el sedimento erosionado desde la fuente a la red fluvial del río.

Por medio de un algoritmo de encadenamiento del flujo múltiple (Desmet y Govers 1995, 1996b), cada celda de la cuadrícula desde la más alta del terreno está conectada con el río a través de una trayectoria de flujo único. La construcción de las trayectorias del flujo se inicia mediante la determinación de la celda de flujo de salida de la celda de la cuadrícula en la esquina superior izquierda de la DEM (Modelo Digital de Elevación, por sus siglas en inglés) usando el criterio del descenso más pronunciado. Esto significa que la más baja de las ocho celdas vecinas se selecciona como una celda de flujo de salida. Consecuente, la celda de flujo de salida de la anterior celda de flujo de salida se determina. Este procedimiento se repite hasta llegar al río, hasta que se alcanza la frontera del DEM o un camino de flujo existente. Siguiendo la trayectoria del flujo, el sedimento se transfiere pendiente abajo si la capacidad de transporte local supera el volumen de sedimento entrante. Si la capacidad de transporte local es menor que el sedimento entrante, la deposición se produce. Por otra parte, a nivel de las cuencas, el patrón espacial y el tipo de uso de suelo son relevantes a la erosión por el agua porque los cambios en el uso del suelo pueden alterar la estructura hidrológica y por lo tanto el sistema de erosión en una cuenca (Van Oost *et al.*, 2000).

Los linderos de las parcelas, caminos y otras estructuras en el área afectan los sedimentos y/o transferencia de escurrimiento entre las distintas unidades terrestres. Este efecto es bien

representado en WATEM/SEDEM por la incorporación de un mapa de parcelas. El sedimento que llega al río se considera que deja la zona de captación. Ni la erosión del cauce ni depositación es predicha por el modelo.

4.10.5 Erosión hídrica

El modelo WATEM-SEDEM fue creado en el Laboratorio de Geomorfología Experimental (KU Leuven, Bélgica) y se basa en el modelo RUSLE (la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos Revisada; Renard et al, 1997):

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \quad (4.10.5)$$

Dónde:

- A: Cantidad promedio de pérdida de suelo por erosión ($t \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)
- R: Factor de erosividad de la lluvia ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)
- K: Factor de erosionabilidad del suelo ($t \text{ ha MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$)
- LS: Factor de longitud y grado de pendiente.
- C: Factor de uso y manejo de suelo y cultivo.
- P: Factor de obras de control de la erosión del suelo.

4.10.6 Factor R de erosividad de la lluvia

El factor R representa la erosividad de la lluvia sobre una base anual. Para una área pequeña (unos pocos km^2) se supone que R es uniforme para toda el área de estudio para que se pueda usar un solo valor para R. Para áreas más grandes, la variabilidad espacial de la erosividad de la lluvia puede ser más importante, sin embargo. Si este es el caso, esto se puede compensar mediante la multiplicación de un mapa erosividad de las precipitaciones con el mapa de erosionabilidad del suelo (factor K) y utilizar este mapa como entrada para el factor K. El valor de R entonces tiene que ser 1.

4.10.7 Factor K de erosionabilidad del suelo

Este factor (Factor K del modelo RUSLE) describe la susceptibilidad del suelo a ser erosionado por la lluvia. Por la falta de información detallada de los mapas de suelo es necesario y recomendable tomar muestras de suelo para ser analizadas para el área de estudio.

El factor K depende de varios factores como la textura, contenido de materia orgánica y humedad. Sobre todo, sólo la textura se usa para los cálculos del factor K, debido a la falta de datos. Van Rompay *et al.* (2000) calculó el factor K para Flanders por medio de clases de textura de mapas de erosión del suelo utilizando la fórmula (Declercq y Poesen 1992):

$$K = 0.0034 + 0.0405 \exp\left[-0.5 \left(\frac{\log D_g + 1.659}{0.71}\right)^2\right] \quad (4.10.6)$$

Donde K es el factor de erosionabilidad ($\text{Mg h MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$) y D_g (mm) es el diámetro medio geométrico de las principales partículas de suelo primarias (fracción <2 mm) (Shirazi en Boersma 1984):

$$D_g = \sum_e f_i \times \ln[(d_i + d_{i-1}) \times 0.5] \quad (4.10.7)$$

El factor K tiene grandes variaciones en el tiempo, por lo que los valores siempre representa una media a largo plazo (Verstraeten *et al.* 2001).

4.10.8 Factor LS topográfico

Este factor es una representación de la variabilidad espacial de la erosión del suelo causada por la topografía. L se considera como la longitud que tiene la pendiente y S es proporcional a la pendiente local. WATEM/SEDEM (a diferencia del EUPS Modificada) trabaja con un enfoque 2D del factor topográfico. El algoritmo (Desmet en Govers 1996) utiliza un DEM (Modelo de Elevación Digital) y un mapa de parcelas y los cuales se ajustaron por Takken *et al.* (2001), de modo que la dirección de labranza se toma en cuenta. La ubicación de carreteras también se incluye: el agua en un camino siempre seguirá ese camino hasta el punto más bajo. Ambos parámetros topográficos se derivan de un DEM (Verstraeten *et al.* 2001).

El Factor L en LS representa la distancia total de la pendiente ascendente de un píxel y es una manera de hacer frente a la escorrentía del agua. La eficiencia de los hundimientos en la parcela o valor PTEF (por sus siglas en Ingles “parcel trap efficiency”) se refiere a la forma que para cada clase de uso del suelo se reduce la contribución propia del píxel de la zona contribuyendo aguas arriba. Por ejemplo, si para los píxeles forestales, se le da un valor de 75 por ciento, cada píxel de 20 por 20 metros sólo contribuirá 100 m² al píxel corriente abajo, en lugar de 400 m². De hecho, esto significa que para un bosque o pastizal, menos escurrimiento se simulará disminuyendo de ese modo los valores de LS aguas abajo, y por lo tanto, las tasas de erosión. El total de aguas arriba contribuyen a la zona de aguas arriba del bosque la cual será entregada a través del bosque a otra clase de uso de la tierra. Los valores para PTEF pueden elegirse para las tierras de cultivo, pastos y bosques por separado. Alternativamente, un mapa completo PTEF se puede dar también.

La conectividad entre parcelas se refiere a la forma en que la zona de aguas arriba se reduce su contribución total en la frontera de la parcela. Dos categorías de los límites del campo son reconocidos: el paso de cualquier tipo de uso del suelo en tierras de cultivo y el paso de cualquier tipo de uso del suelo de los bosques o pastizales. Si, por ejemplo, el valor 'a bosque / pastos' es igual a 75 por ciento, y el área de contribución total del píxel aguas arriba de la frontera forestal es de 300 ha, el área de contribución del primer píxel en el bosque sólo será por 75 ha. De esta manera, los bosques o pastizales también escorrentías y trampa de aguas arriba, lo que reduce de nuevo LS aguas abajo y las tasas de erosión.

Existen varios algoritmos LS que son incorporados en WaTEM/SEDEM, el usuario puede escoger entre varias opciones para calcular del factor LS del EUPS modificada.

De acuerdo con Foster y Wischmeier (1974) el factor topográfico para una pendiente irregular es:

$$LS = \sum_{j=1}^n \frac{S_j \lambda_j^{m+1} - S_j \lambda_{j-1}^{m+1}}{(\lambda_j - \lambda_{j-1})(22.13)^m} \quad (4.10.8)$$

Dónde:

S_j = El valor de la pendiente del j-ésimo segmento (m/m).

λ_j = La distancia desde el límite inferior del segmento j-ésimo a la pendiente ascendente límite del campo (m).

Se puede utilizar la ecuación 4.10.8 para una topografía en tercera dimensión.

$$LS = \sum_{i,j} \frac{S(i,j) \lambda(i,j)_{salida}^{m+1} - S(i,j) \lambda(i,j)_{entrada}^{m+1}}{(\lambda(i,j)_{salida} - \lambda(i,j)_{entrada})(22.13)^m} \quad (4.10.9)$$

Dónde:

LS = Factor topográfico en RUSLE, es la sumatoria de todas las cuadrículas en la parte de la cuenca.
 $\lambda(i, j)$ entrada = longitud de la pendiente en la entrada de la celda de la cuadrícula (i, j) (m).
 $\lambda(i, j)$ salida = longitud de la pendiente en la salida de la celda de la cuadrícula (i, j) (m).
 $S(i, j)$ = factor de pendiente para la celda de la cuadrícula (i, j).
 m = longitud de la pendiente exponente.

Para aplicaciones de dos dimensiones, tenemos que reemplazar longitud de la pendiente por una unidad de área de contribución. Para calcular la unidad del área de contribución se divide el área de contribución por la anchura sobre la cual el flujo puede pasar dentro de una celda de la cuadrícula. Esta anchura depende de la dirección del flujo y se calcula usando la dirección de la pendiente (Desmet y Govers, 1996). Esto significa que:

$$l_{(i,j)entrada} = A_{s,entrada} = \frac{A_{in}}{D'} \text{ en } l_{(i,j)salida} = A_{s,salida} = \frac{A_{salida}}{D'} \quad (4.10.10)$$

Dónde:

$A_{s,entrada}$ = unidad de área que contribuye a la entrada de la celda de la cuadrícula.

$A_{s,salida}$ = unidad de área que contribuye a la salida de la celda de la cuadrícula.

D' = anchura sobre el cual el flujo puede pasar dentro de la celda de la cuadrícula.

Uniendo esta con la ecuación, esto da:

$A_s A_{salida} = A_{in} + D^2$ y $D' = D/x$ donde D = espaciado de la cuadrícula y x = factor de corrección.

$$L(i, j) = \frac{x}{x^{m+1}} \frac{D}{D^{m+1}} \frac{(A_{in} + D^2)^{m+1} - A_{in}^{m+1}}{(A_{in} + D^2 - A_{in})(2.2.13)^m} \quad (4.10.11)$$

$$L(i, j) = \frac{(A(i, j) + D^2)^{m+1} - A(i, j)^{m+1}}{x^m D^{m+2} (2.2.13)^m} \quad (4.10.12)$$

Posibles algoritmos para LS en WATEM/SEDEM

1. La ecuación de LS, originalmente desarrollada por Wischmeier y Smith (1978):

$$S(i, j) = 65.41 \text{ sen}^2 \theta_{i,j} + 4.56 \text{ sen } \theta_{i,j} + 0.065 \quad (4.10.13)$$

Exponente m de la ecuación 4.10.11

- = 0.5 si $\text{ctg } \theta_{i,j} > 0.05$
- = 0.4 si $0.035 < \text{ctg } \theta_{i,j} < 0.05$
- = 0.3 si $0.01 < \text{ctg } \theta_{i,j} < 0.035$
- = 0.2 si $\text{ctg } \theta_{i,j} < 0.01$

2. La ecuación de McCool *et al.* (1987, 1989), también usado en RUSLE (1993):

$$S(i,j) = 10.8 \text{ sen } \theta_{i,j} + 0.03 \text{ cuando } \text{ctg } \theta_{i,j} < 9\%$$

$$S(l,j) = 16.8 \text{ sen } \theta_{i,j} - 0.5 \text{ cuando } \text{ctg } \theta_{i,j} > 9\%$$

Exponente m en la ecuación 4.10.11 = $(b/b+1)$ donde

$$\beta = \frac{\text{sen } \theta_{i,j} / 0.0896}{3 \text{ sen}^{0.8} \theta_{i,j} + 0.56} \quad (4.10.14)$$

Otros valores de m son calculados cuando la erosión en surcos es leve con respecto a la erosión laminar y en condiciones en las que la erosión en surcos es grande con respecto a la erosión laminar m se calcula multiplicando el valor de b por 0.5 (menor proporción de surcos de erosión laminar) o 2.0 (proporción mayor del riachuelo a la erosión laminar) (McCool 1989).

Si la longitud de la pendiente es menor de 4 metros:

$$S(i,j) = 3.0 (\text{sen } \theta_{i,j})^{0.8} + 0.56 \quad (4.10.15)$$

3. Basado en información de campo Govers (1991) propuso un valor de 0.755 para el exponente m en la ecuación 4.10.15. Su factor de pendiente es una función exponencial de la inclinación de la pendiente:

$$S(i,j) = (\tan \theta_{i,j} / 0.09) 1.45 \quad (4.10.16)$$

Este último factor LS se refiere específicamente al riesgo de erosión en surcos.

4. Nearing (1997) propuso una sola función, continua para lo precipitosa de la pendiente:

$$S = -1.5 + \frac{17}{(1 + e^{[2.3 - 6.1 \text{ sen } (\theta)])})} \quad (4.10.17)$$

4.10.9 Factor C de cobertura

La sensibilidad a la erosión se puede calcular para cada etapa de crecimiento de los cultivos, sobre la base de (Verstraeten *et al.*, 2001):

$$SLR = PLU \times SR \times CC \times SC \times SM \quad (4.10.18)$$

Dondé:

SLR = coeficiente de pérdida de suelo

- PLU = sub-factor del uso anterior del suelo
- SR = subfactor de rugosidad del suelo
- CC = subfactor de follaje
- SC = cobertura del suelo sub-factores (es decir, residuos del cultivo)
- SM = subfactor de humedad del suelo

Basándonos en el SLR (coeficiente de pérdida de suelo) de cada estado de crecimiento, se puede definir el factor C. (Verstraeten *et al.*, 2001):

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n SLR_i R_i}{R} \quad (4.10.19)$$

Dondé:

- SLR_i = Coeficiente de pérdida de suelo en la etapa i.
- R_i = Erosividad de la lluvia por etapa de cultivo.
- R = Erosividad total en el ciclo de cultivo.
- n = Número total de etapas del cultivo.

Otros métodos de cálculo se pueden encontrar en el sitio web RUSLE (véase también Foster 2005).

4.10.10 Factor P de obras y prácticas

Este factor se ajusta al efecto de las medidas de control de erosión como terrazas y prácticas de manejo. Este factor se establece con valor de uno en WATEM / SEDEM.

Las prácticas de soporte (P) y factores de manejo de cobertura son muy importantes en la estimación de pérdida de suelo mediante la ecuación universal de pérdida de suelo (EUPS) porque estos factores representan prácticas diseñadas para la reducción de la erosión. El valor de P en

EUPS es la relación de la pérdida de suelo con una práctica de apoyo específica a la pérdida de suelo correspondiente con pendiente ascendente fila recta y la labranza cuesta abajo.

El factor P cuenta para las prácticas de control que reducen el potencial de erosión de la segunda vuelta por su influencia en los patrones de drenaje, la concentración de la escorrentía, la velocidad de la escorrentía y las fuerzas hidráulicas ejercidas por escurrimiento sobre el suelo. Las prácticas mecánicas de apoyo incluyen la labranza (surcos, la sustitución del suelo, siembra, etc.), franjas de vegetación como la cerca de crecimiento, desgarramiento profundo, terrazas, diversiones, y otras prácticas de manejo de suelo orientadas en o cerca del contorno que dan lugar a la captación y almacenamiento de la humedad y la reducción de la escorrentía (AH-703, Renard et al., 1997).

Terrazas en combinación con el surcado al contorno son más eficientes para controlar la erosión que los surcos al contorno. Los efectos beneficiosos de terrazas se reflejan en la longitud de laderas y el gradiente de factor de (LS) debido a que la longitud de la ladera se reduce. Contorno de labranza y terrazas son dos prácticas comunes que se utilizan en las tierras minadas y sitios de construcción.

4.10.11 *Transporte de sedimentos*

Un segundo módulo de WATEM / SEDEM es el cálculo del transporte de sedimentos y la sedimentación. El modelo calcula la cantidad de sedimentos que se exporta hacia el exterior de la cuenca. Esto se hace mediante el enrutamiento de los sedimentos hacia la superficie del agua, y teniendo en cuenta la posible deposición de sedimentos. Esta deposición se controla por una capacidad de transporte (T_c) que se calcula para cada píxel. Esta capacidad de transporte es la máxima cantidad de sedimentos que pueden pasar a través de un píxel. Dentro WATEM / SEDEM existen dos formas de calcular el T_c : proporcional y no proporcional.

$$T_c = ktc \times Eprg = ktc \times R \times K \times (LS - 4.12 \times Sg \times 0.8) \quad (4.10.20)$$

Dónde:

ktc = Coeficiente de capacidad de transporte

$Eprg$ = Potencial de erosión en cárcavas

Sg = Pendiente local (metro por metro)

R , K y LS son los factores de la ecuación EUPS modificada

Los valores de ktc deben ser calibrados y validados para el uso del modelo. Como se describe con más detalle, varios conjuntos de parámetros calibrados están disponibles.

5 Materiales y métodos

5.1 Localización del área de estudio

La cuenca del Río Texcoco, se localiza en la parte Oriente de la cuenca del Valle de México, entre los paralelos $19^{\circ}25'00''$ y $19^{\circ}30'45''$ de latitud norte, y $98^{\circ}53'05''$ y $98^{\circ}43'23''$ de longitud oeste, y comprende una superficie de 2,940.20 hectáreas (Figura 5). Geográficamente se ubica en el municipio de Texcoco y abarca las poblaciones de San Pablo Ixayoc en la parte media y alta de la cuenca y parte de los poblados de Tequexquahuac, San Dieguito y Texcoco en la parte media y baja.

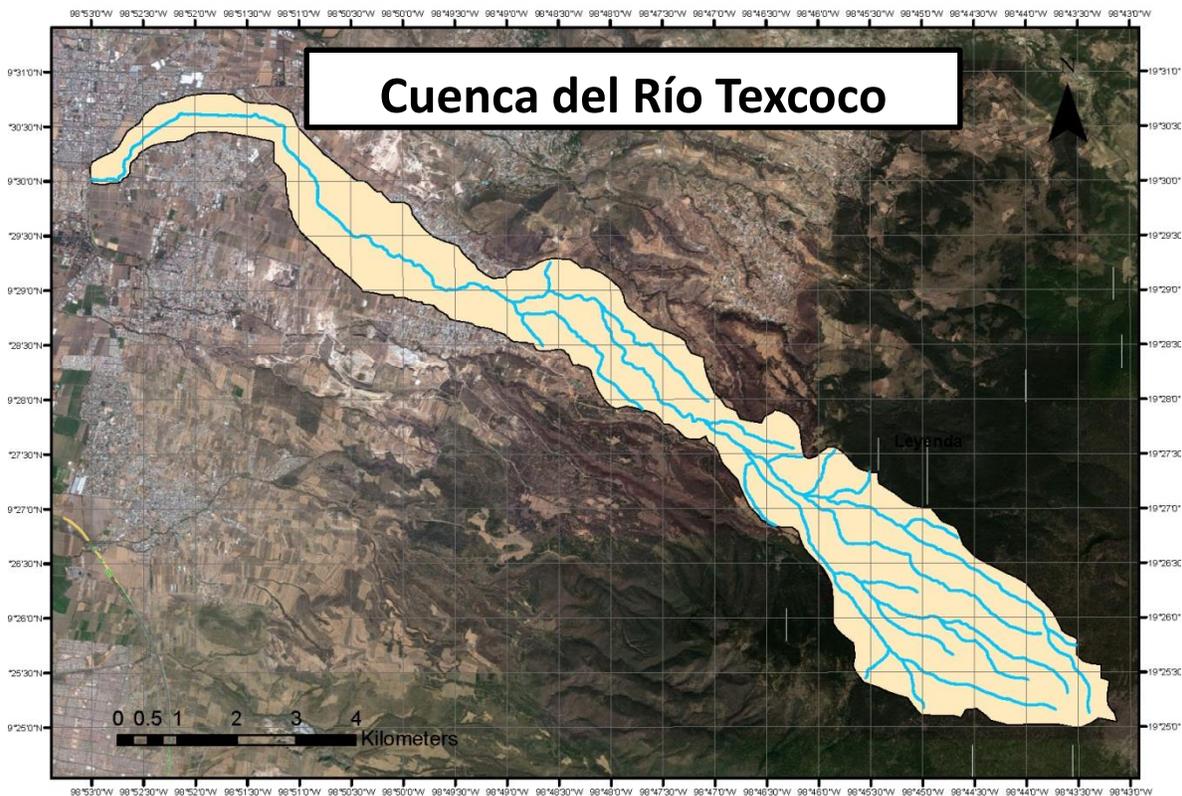


Figura 5. Ubicación de la cuenca del Río Texcoco.

5.1.1 Clima

La cuenca del Río Texcoco presenta distintos climas que son influenciados principalmente por el relieve lo cual afecta considerablemente la precipitación, temperatura y movimientos del viento.

De acuerdo con García (1968) se presentan 4 subtipos climáticos (Figura 6) que varían con la altitud y su descripción se presenta a continuación.

C(w1) Templado subhúmedo con lluvia en verano de humedad media, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, subhúmedo, precipitación anual de 200 a 1,800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5 al 10.2% anual.

C(w2) Templado subhúmedo con lluvia de verano el más húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, subhúmedo, precipitación anual de 200 a 1,800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5 al 10.2% anual.

C(wo) Templado subhúmedo con lluvia de verano el menos húmedo, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C, subhúmedo, precipitación anual de 200 a 1,800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5 al 10.2% anual.

Cb'(w2) Templado, semifrío, con verano fresco largo, temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C, menos de cuatro meses con temperatura mayor a 10°C, subhúmedo, precipitación anual de 200 a 1,800 mm y precipitación en el mes más seco de 0 a 40 mm; lluvias de verano del 5 al 10.2% anual.

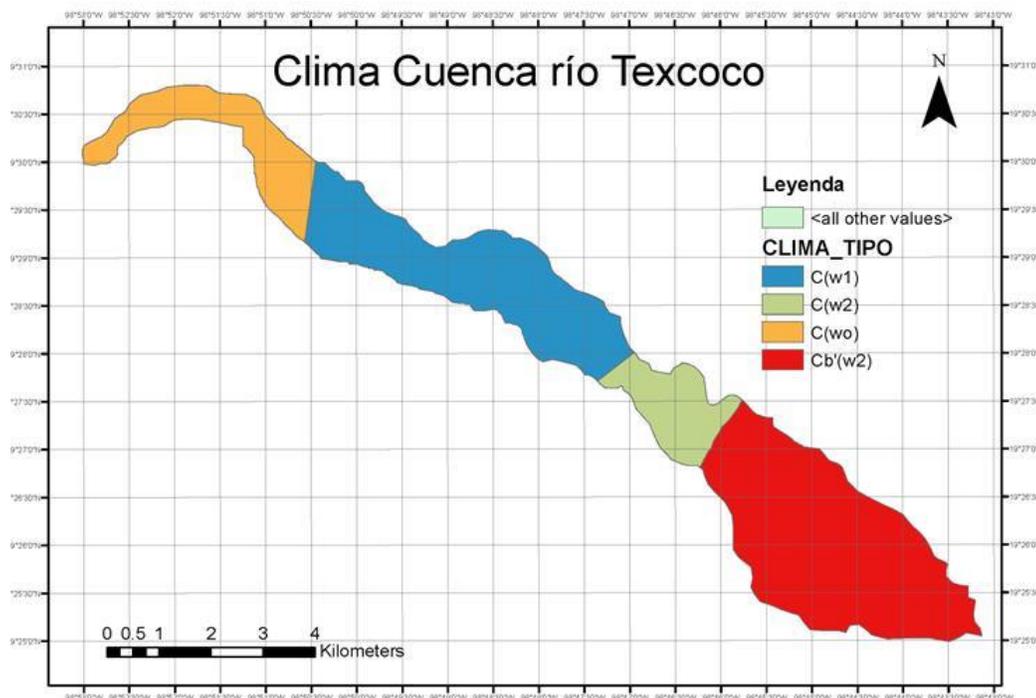


Figura 6. Clasificación climática de la cuenca del Río Texcoco.

5.1.2 Precipitación

La precipitación media mensual de la cuenca se obtuvo de la estación meteorológica No. 1517 denominada Chapingo que reporta el ERIC III, para un periodo de 50 años de registro (1960-2010) que considera los periodos de antes (1960-1977) y después de las obras de conservación realizadas en la cuenca (1978-1990) que fueron utilizados para calibrar el modelo WATEM/SEDEM y el periodo de 1991 a 2010 que fue utilizado para validarlo. La precipitación media para la cuenca del Río Texcoco varió de 381.4 mm a 868 mm con valor medio de 604.8 mm (Cuadro 4, 5 y 6). La variación de la precipitación media mensual y anual para los tres periodos analizados se muestran en la Figura 7 e indica que no existe una gran desviación entre los promedio mensuales de precipitación a pesar de que si existe un mayor rango de variación en todos los periodos analizados.

La época de lluvias se presentó en el verano, siendo el mes más lluvioso el de Julio, presentándose lluvias aisladas en los meses de Febrero, Noviembre y Diciembre.

Cuadro 4. Precipitación reportada para la cuenca del Río Texcoco (1960 a 1977)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prec. Anual
1960	3.5	0.0	0.1	17.0	106.3	57.2	81.5	91.8	148.6	59.5	1.6	1.0	568.1
1961	5.6	0.4	7.8	5.7	22.4	175.1	149.7	94.5	67.3	18.0	7.2	4.8	558.5
1962	0.0	2.7	6.8	76.5	22.7	83.5	48.8	85.1	104.9	79.2	2.0	3.7	515.9
1963	0.2	0.0	32.7	38.0	55.9	86.9	161.3	125.8	115.2	25.0	1.9	18.8	661.7
1964	22.3	0.0	18.3	13.4	109.9	174.4	83.2	55.6	127.1	34.5	8.1	8.3	655.1
1965	2.8	27.2	0.0	16.8	44.6	72.1	85.6	147.0	81.7	71.0	1.8	7.5	558.1
1966	10.6	6.4	61.9	31.7	7.2	80.5	177.1	141.8	65.5	54.7	0.0	4.1	641.5
1967	65.8	0.4	14.6	13.8	63.0	43.0	94.6	160.6	118.1	58.6	3.7	3.4	639.6
1968	9.8	21.3	0.5	42.6	37.3	136.7	161.3	88.6	113.7	81.3	5.5	18.0	716.6
1969	8.2	13.6	16.5	10.4	18.9	38.2	162.3	237.6	83.1	7.4	1.5	0.0	597.7
1970	4.2	4.6	0.4	15.9	46.4	140.1	101.2	106.8	114.3	40.6	0.2	0.0	574.7
1971	9.3	0.0	11.2	28.6	25.5	159.5	87.8	59.5	86.2	61.4	8.5	7.8	545.3
1972	0.0	0.0	16.9	39.3	69.2	93.1	89.7	65.2	87.1	50.5	9.1	0.0	520.1
1973	0.0	5.1	7.9	30.2	56.5	81.9	130.3	197.5	73.3	54.1	23.0	1.0	660.8
1974	5.2	3.8	11.9	64.4	62.4	113.1	225.3	129.6	91.3	22.1	3.0	0.0	732.1
1975	37.1	11.3	7.8	35.9	89.1	127.7	155.7	92.4	36.6	14.3	0.0	0.0	607.9
1976	0.0	3.5	9.2	45.4	82.2	58.1	171.5	118.4	96.0	77.9	3.6	21.0	686.8
1977	0.6	5.2	0.0	7.9	47.1	95.7	130.2	60.2	112.6	31.7	27.9	4.5	523.6
Prom	10.3	5.9	12.5	29.6	53.7	100.9	127.6	114.3	95.7	46.8	6.0	5.8	609.1
Desv	16.7	7.8	14.9	19.5	29.7	42.9	45.7	49.2	26.5	23.5	7.7	6.8	67.9

Cuadro 5. Precipitación reportada para la cuenca del Río Texcoco (1978 a 1990)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prec. Anual
1978	2.5	13.2	45.0	14.3	29.0	213.8	128.0	89.4	91.6	62.5	30.3	0.8	720.4
1979	0.3	27.7	31.1	8.2	66.1	89.1	122.4	102.7	190.1	1.0	5.2	28.9	672.8
1980	45.9	7.9	3.7	33.9	33.0	83.3	70.0	124.0	69.9	46.7	30.5	0.0	548.8
1981	24.0	6.1	18.8	41.0	49.1	178.9	140.6	103.4	104.6	54.6	22.8	4.3	748.2
1982	0.0	7.0	20.4	39.3	56.1	64.1	85.8	38.6	16.6	50.7	0.0	2.8	381.4
1983	19.4	10.3	9.5	0.0	21.3	83.7	112.3	116.4	90.1	42.0	10.2	0.5	515.7
1984	28.3	13.6	1.4	0.5	32.9	127.4	225.3	90.5	111.2	35.5	0.0	4.2	670.8
1985	8.5	0.3	9.0	70.5	36.1	163.7	65.1	153.9	82.7	22.1	7.2	0.0	619.1
1986	0.0	0.0	0.0	27.5	77.7	88.5	79.3	127.2	34.6	49.9	3.9	0.0	488.6
1987	0.0	0.3	13.8	19.0	40.7	134.6	135.1	151.6	75.5	0.0	6.3	0.0	576.9
1988	0.0	9.0	52.2	19.7	34.9	104.6	112.4	62.3	118.1	13.2	7.5	0.0	533.9
1989	0.6	9.4	1.6	10.5	70.6	98.6	114.2	69.4	56.1	18.6	13.0	13.6	476.2
1990	17.7	16.9	2.2	59.0	92.3	139.7	148.6	158.7	79.4	147.8	0.0	5.7	868.0
Prom	11.3	8.2	15.6	22.8	45.2	111.3	112.9	96.9	85.1	33.3	11.9	4.8	543.6
Desv	14.7	6.8	16.0	18.5	16.8	45.2	42.5	35.6	43.1	19.5	10.6	7.6	164.4

Cuadro 6. Precipitación reportada para la cuenca del Río Texcoco (1991 a 2010)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prec. Anual
1991	33.7	13.8	4.3	6.0	48.1	130.3	206.5	47.0	49.5	112.8	7.7	0.0	659.7
1992	61.2	16.1	17.6	16.4	76.7	30.4	173.3	89.3	164.2	61.2	67.6	0.0	774.0
1993	5.3	11.6	10.2	32.1	30.5	111.3	123.8	89.9	116.8	1.1	8.7	0.0	541.3
1994	8.5	6.4	15.1	29.0	48.2	113.9	152.7	147.2	40.6	47.9	0.0	17.5	627.0
1995	30.2	0.5	5.5	11.3	0.0	90.1	60.7	159.3	51.5	68.9	34.0	49.6	561.6
1996	0.0	0.0	8.0	29.3	17.3	51.8	136.3	109.9	133.8	22.6	0.0	15.2	524.2
1997	8.6	0.0	33.0	64.4	58.9	124.9	82.1	59.7	53.5	30.9	3.5	9.5	529.0
1998	9.1	0.0	0.0	4.5	0.5	84.0	78.1	204.4	213.7	59.8	7.6	0.0	661.7
1999	0.0	1.9	3.9	10.8	5.4	65.9	125.6	145.3	65.6	90.9	8.8	6.0	530.1
2000	0.0	0.0	21.3	13.5	77.7	148.5	81.0	164.0	83.5	27.0	6.0	6.0	628.5
2001	2.5	2.5	4.0	34.5	51.0	73.9	121.3	67.5	100.0	35.0	12.0	7.5	511.7
2002	5.7	5.0	1.0	79.0	43.2	54.2	101.0	129.5	96.5	67.5	6.0	0.0	588.6
2003	0.0	0.0	0.0	27.0	45.5	146.5	104.5	171.0	103.5	7.0	12.0	0.0	617.0
2004	15.0	0.0	21.0	44.5	63.0	183.0	122.5	102.5	108.0	36.0	14.0	1.5	711.0
2005	2.0	6.0	2.0	26.0	40.0	41.5	150.5	110.0	44.5	50.5	20.5	0.0	493.5
2006	1.5	0.0	22.0	31.0	76.5	81.5	90.3	75.5	55.0	36.0	43.5	0.0	512.8
2007	11.0	33.5	32.0	59.5	35.0	181.0	150.5	160.5	111.5	37.0	6.0	0.0	817.5
2008	0.0	2.0	7.8	42.0	26.0	86.5	123.0	70.0	33.0	40.0	0.0	0.0	430.3
2009	7.1	0.0	12.6	2.0	78.1	78.2	105.8	175.5	129.3	60.9	1.0	4.5	655.0
2010	30.8	90.3	15.1	16.4	78.1	52.7	247.3	120.7	37.5	1.0	0.0	0.0	689.9
Prom	11.6	9.5	11.8	29.0	45.0	96.5	126.8	119.9	89.6	44.7	12.9	5.9	603.2
Desv	15.8	20.7	10.1	20.8	26.0	44.5	45.2	44.7	47.5	28.3	17.1	11.6	99.0

La comparación de la precipitación media mensual para los tres periodos no muestra una variación, lo que nos indica que los valores medios por sí mismo no reflejan los cambios en las precipitaciones mínimas y máximas que se reportan para la zona (Figura 7).

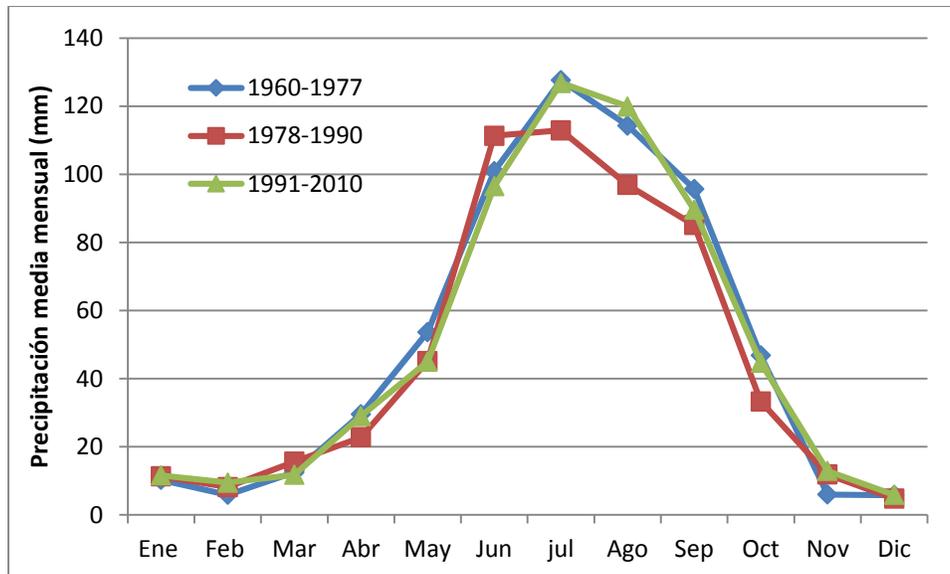


Figura 7. Precipitación media mensual para los tres periodos bajo análisis de la cuenca del Río Texcoco.

5.1.3 Temperatura

La temperatura media anual de la cuenca del Río Texcoco es de 10.95 °C siendo la temperatura extrema de 37.4°C. El mes más frío es el de enero y el más caliente el de mayo. Las heladas dan principio en el mes de octubre, prolongándose este periodo hasta el mes de abril. Los datos de temperatura media mensual y la promedio anual para los tres periodos de análisis se muestran en los Cuadros 7, 8 y 9.

Cuadro 7. Temperatura media reportada para cuencas del Río Texcoco (1960 a 1977).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
1960	4.0	5.7	7.8	11.7	16.7	16.8	15.2	15.8	13.3	11.5	7.1	3.8	10.8
1961	4.8	5.4	9.5	14.2	16.9	15.9	15.2	14.9	14.4	10.8	8.3	6.0	11.4
1962	3.2	6.4	11.2	11.9	14.8	15.6	15.6	15.0	14.6	11.9	7.2	8.0	11.3
1963	4.8	6.6	12.9	15.6	14.2	16.5	14.9	14.9	14.5	12.3	8.2	6.2	11.8
1964	8.3	10.1	12.4	14.7	14.5	13.6	13.7	13.7	13.9	9.9	9.2	6.0	11.7
1965	2.5	6.4	9.4	12.6	14.5	14.6	13.8	13.7	13.7	10.1	6.6	5.4	10.3
1966	5.5	7.9	8.7	13.8	15.6	15.3	14.5	14.7	12.8	11.5	5.6	3.1	10.8
1967	3.9	5.4	8.1	12.9	14.8	16.0	14.3	14.4	13.4	11.0	6.4	5.5	10.5
1968	2.8	4.9	8.5	13.1	15.3	15.5	14.2	13.8	13.5	10.5	7.3	6.6	10.5
1969	3.6	6.9	12.6	12.8	14.3	15.9	14.6	14.4	13.8	11.1	7.8	4.5	11.0
1970	2.9	6.1	10.2	14.5	14.6	14.2	14.0	13.9	13.8	10.7	5.0	2.5	10.2
1971	4.5	5.4	9.6	11.4	15.0	14.6	13.6	12.6	13.4	11.8	7.3	5.7	10.4
1972	4.1	5.3	8.7	14.4	15.7	15.4	14.1	12.8	13.1	11.5	10.6	5.3	10.9
1973	3.8	7.2	11.0	14.9	15.3	14.8	13.8	13.2	13.5	11.5	7.5	3.9	10.9
1974	4.2	5.1	8.3	12.1	14.8	14.7	12.9	12.8	12.5	9.8	6.7	5.1	9.9
1975	5.2	6.8	9.9	14.4	13.9	14.4	12.8	13.1	11.5	10.7	6.3	3.2	10.2
1976	2.6	2.6	9.3	13.2	13.2	15.1	13.6	13.0	12.9	11.5	9.3	7.5	10.3
1977	5.7	6.7	11.5	12.4	15.4	15.4	14.4	15.4	13.9	10.7	8.5	5.8	11.3
Prom	4.2	6.2	10.0	13.4	15.0	15.2	14.2	14.0	13.5	11.0	7.5	5.2	10.8
Desv	1.4	1.5	1.6	1.2	0.9	0.8	0.8	1.0	0.8	0.7	1.4	1.5	0.5

Cuadro 8. Temperatura media reportada para cuencas del Río Texcoco (1978 a 1990).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
1978	4.9	7.7	9.0	12.5	14.2	14.5	13.2	13.1	13.1	11.2	9.0	6.9	10.8
1979	5.2	7.2	9.2	13.1	14.3	13.9	13.8	12.8	12.2	9.2	7.6	6.7	10.4
1980	5.4	6.0	10.6	12.2	15.2	14.3	14.1	13.7	13.1	11.5	7.8	4.4	10.7
1981	4.2	6.2	9.8	12.7	14.3	15.3	13.0	12.6	11.5	11.5	4.8	6.3	10.2
1982	5.3	6.8	8.8	11.9	14.1	12.8	11.8	11.5	11.2	9.1	6.4	5.3	9.6
1983	5.7	4.8	8.1	12.8	15.0	14.7	14.0	12.9	13.1	10.8	11.3	6.9	10.8
1984	6.4	7.5	10.7	13.3	14.0	14.8	13.9	13.2	13.7	12.0	7.3	6.5	11.1
1985	6.3	7.7	10.4	12.1	13.8	14.6	13.2	13.9	13.0	10.9	8.3	7.2	11.0
1986	3.5	6.6	7.3	12.6	14.9	15.0	13.4	13.4	12.9	11.6	9.0	7.0	10.6
1987	5.0	7.6	10.0	11.3	12.3	15.1	14.6	13.8	13.6	8.2	8.6	8.4	10.7
1988	5.6	7.9	10.8	12.6	13.8	15.5	14.2	14.9	13.5	11.1	9.0	7.1	11.3
1989	7.3	6.4	8.9	11.6	15.4	15.7	15.0	14.7	14.2	10.0	11.6	7.7	11.5
1990	8.1	9.8	12.7	15.3	15.7	16.7	16.6	15.9	15.2	13.0	8.6	7.9	13.0
Prom	5.6	6.5	9.1	11.7	13.5	13.8	12.9	12.7	12.2	10.0	7.9	6.2	10.1
Desv	1.2	1.6	2.4	3.0	3.6	3.7	3.4	3.4	3.3	2.8	2.5	1.7	2.7

Cuadro 9. Temperatura media reportada para cuencas del Río Texcoco (1991 a 2010).

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Promedio
1991	8.1	8.5	11.6	14.9	15.4	16.1	14.8	13.9	13.5	11.8	7.6	7.2	12.0
1992	8.3	6.8	10.2	12.1	13.7	14.8	14.7	14.5	13.5	11.3	9.7	6.7	11.4
1993	7.2	7.4	9.1	11.7	14.2	14.6	14.8	14.9	13.9	11.8	9.0	6.4	11.3
1994	6.5	6.5	10.5	13.1	15.2	14.8	13.7	14.1	12.6	12.1	8.7	8.3	11.3
1995	7.0	7.9	10.7	14.1	16.8	16.0	14.3	14.6	13.5	11.3	9.8	8.0	12.0
1996	3.6	6.5	9.1	12.9	15.6	15.2	13.9	13.7	13.9	12.0	7.7	7.4	11.0
1997	5.5	8.4	10.7	13.6	13.0	14.5	13.7	12.7	13.7	11.8	10.9	8.7	11.4
1998	5.9	6.9	12.0	15.4	15.0	17.0	15.4	15.1	15.2	13.4	11.8	6.5	12.5
1999	4.5	7.3	9.6	13.5	15.1	15.6	13.5	13.9	12.7	10.9	6.8	5.2	10.7
2000	3.4	6.7	12.9	13.9	13.6	14.6	13.3	14.0	12.9	8.3	9.1	4.9	10.6
2001	3.2	6.4	16.9	13.8	16.2	14.9	14.2	14.0	13.2	10.9	6.3	2.9	11.1
2002	3.0	3.1	9.1	13.1	15.9	15.8	14.6	14.1	12.9	9.3	7.5	3.9	10.2
2003	1.4	5.0	8.1	14.1	14.9	14.2	13.8	13.8	12.1	8.0	6.3	4.8	9.7
2004	4.9	4.6	9.9	14.0	15.9	16.7	15.3	14.1	13.6	9.2	8.2	3.2	10.8
2005	4.6	5.3	9.5	13.6	14.2	15.2	14.1	14.2	13.8	12.4	9.6	7.4	11.2
2006	4.8	5.5	25.6	10.3	11.8	16.5	15.2	15.2	13.5	13.5	7.8	3.8	12.0
2007	5.7	6.7	11.5	12.4	15.4	15.4	14.4	15.4	13.9	10.7	8.5	5.8	11.3
2008	4.9	7.7	9.0	12.5	14.2	14.5	13.2	13.1	13.1	11.2	9.0	6.9	10.8
2009	5.2	7.2	9.2	13.1	14.3	13.9	13.8	12.8	12.2	9.2	7.6	6.7	10.4
2010	5.4	6.0	10.6	12.2	15.2	14.3	14.1	13.7	13.1	11.5	7.8	4.4	10.7
Prom	5.2	6.5	11.3	13.2	14.8	15.2	14.2	14.1	13.3	11.0	8.5	6.0	11.1
Desv	1.7	1.3	3.9	1.2	1.2	0.9	0.7	0.7	0.7	1.5	1.4	1.7	0.7

La comparación de la temperatura media mensual en los tres periodos no muestra una fuerte variación lo que indica que los valores medios por sí mismo no reflejan los cambios en las temperaturas mínimas y máximas que se reportan en la zona (Figura 8).

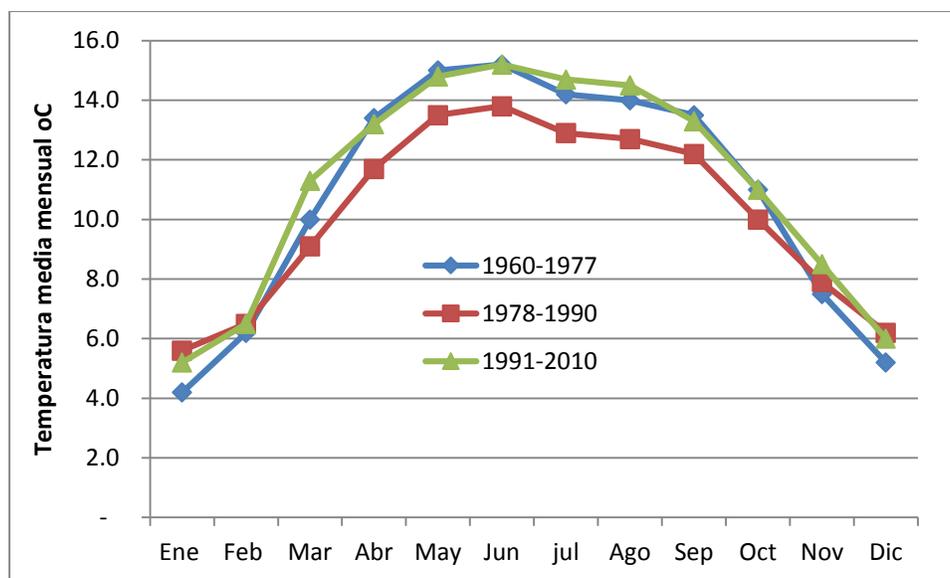


Figura 8. Variación de la temperatura media mensual por periodo de la cuenca del Río Texcoco.

Las heladas dan principio en el mes de octubre, prolongándose este periodo hasta el mes de abril.

La variación de la precipitación y temperatura media mensual observada en los tres periodos de análisis permitió obtener los climograma tipo Gausson que muestra que en general existe un

periodo de sequía de Noviembre a Abril y un periodo húmedo o de lluvias de verano de Mayo a Octubre (Figura 9).

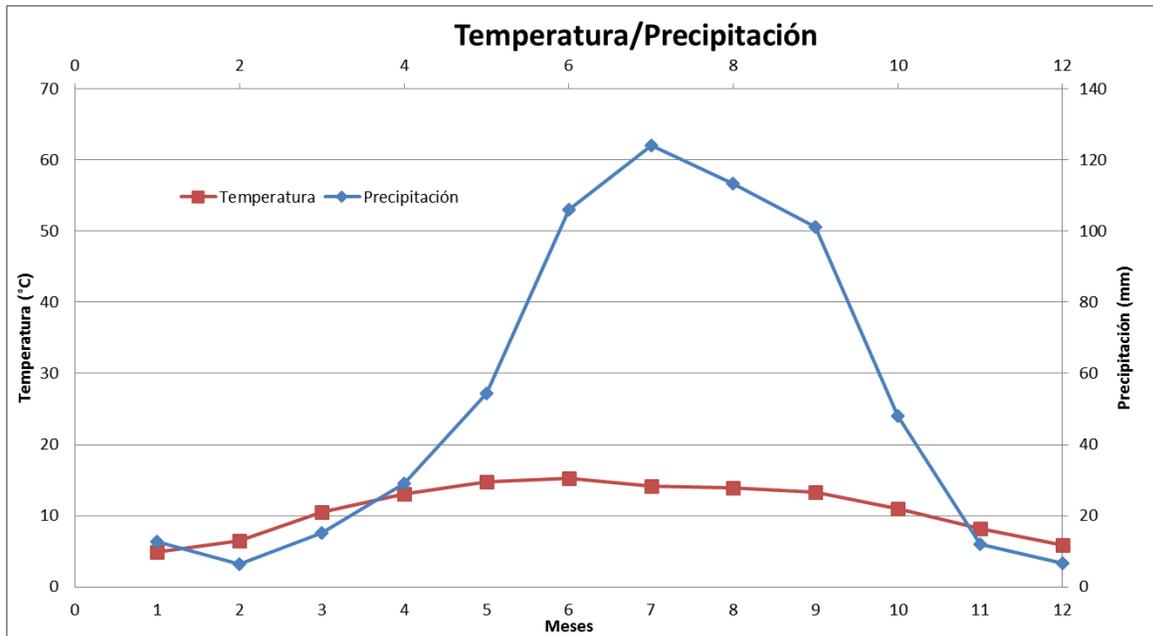


Figura 9. Comparación gráfica de Temperatura y Precipitación mensualmente de la cuenca del Río Texcoco.

5.1.4 Topografía

La topografía de la cuenca del Río Texcoco tiene tres zonas de relieve bien definidas (Figura 10):

- Zona Baja. Esta parte queda comprendida desde la estación de aforo de la cuenca hasta la curva de nivel 2300 m.s.n.m. y cubre una extensión de terreno de 6.16 km² para la cuenca.
- Zona de Lomeríos (parte media). Comprendida entre las curvas de nivel 2300 y 2500 m.s.n.m. y cubre una superficie de 8.50 km².
- Zona Montaña. Esta comprende desde la curva de nivel 2500 m.s.n.m. hasta el lindero de la cuenca, sobre la curva 4000 m.s.n.m. y una extensión de 14.74 km² para la cuenca.

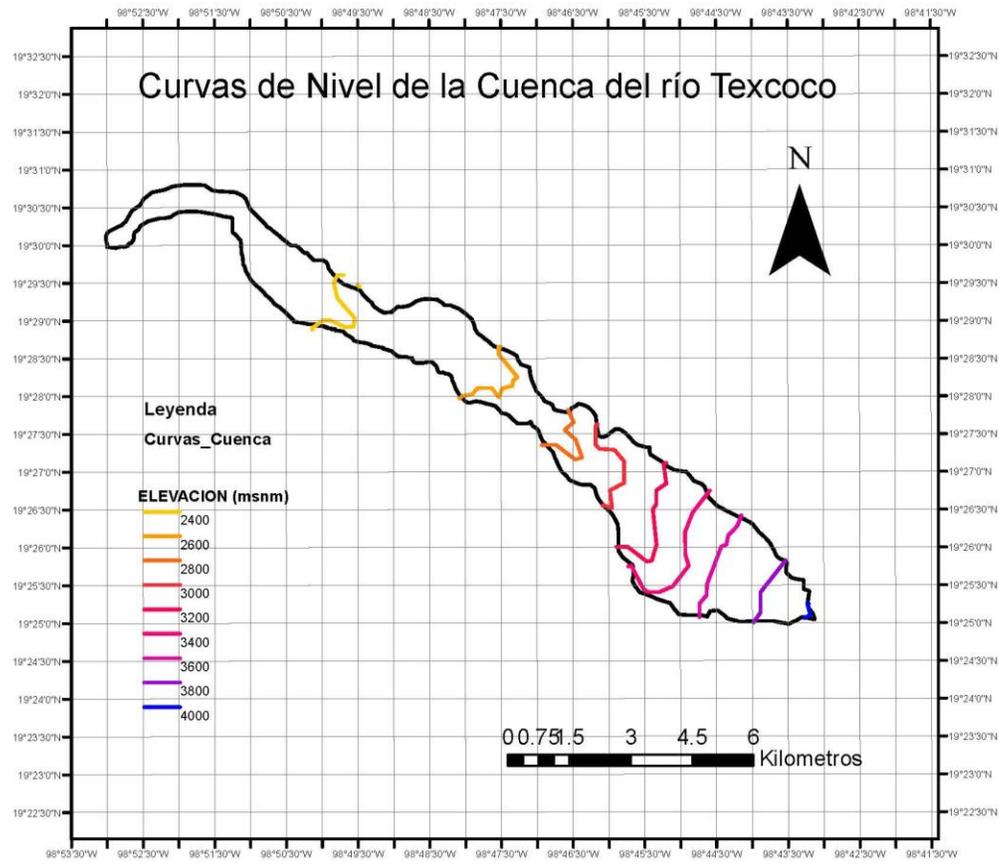


Figura 10. Curvas de nivel de la cuenca del Río Texcoco.

5.1.5 Suelos

La cuenca del Río Texcoco comprende cuatro unidades de suelos de acuerdo con la clasificación de la FAO y el mapa edafológico publicado por INEGI. La distribución espacial de suelos de la cuenca del Río Texcoco se muestra en la Figura 11. Las unidades se clasifican como sigue:

Cambisol éútrico, los Cambisoles combinan suelos con formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente. La transformación del material parental es evidente por la formación de estructura y de coloración principalmente parduzca, incremento en el porcentaje de arcilla, y/o remoción de carbonatos. Éútrico se refiere a que tiene una saturación con base (por $\text{NH}_4\text{O Ac}_1 \text{M}$) de 50 por ciento o más en la mayor parte entre 20 y 100 cm de la superficie del suelo o entre 20 cm y roca continua o una capa cementada o endurecida, o en una capa de 5 cm o más de espesor, directamente encima de roca continua si la roca continua comienza dentro de 25 cm de la superficie del suelo. De acuerdo con FAO estos suelos son de mediana erosionabilidad que varía de 0.02 a 0.04 de acuerdo con los contenidos de materia orgánica en la capa superficial del suelo.

Cambisol húmico, los Cambisoles combinan suelos con formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente. La transformación del material parental es evidente por la formación de estructura y de coloración principalmente parduzca, incremento en el porcentaje de arcilla, y/o remoción de carbonatos. Húmico se refiere a que tiene el siguiente contenido de carbono orgánico en la fracción tierra fina como promedio ponderado: en Ferrasoles y Nitisoles, 1.4 por ciento o más hasta una profundidad de 100 cm desde la superficie del suelo mineral; en Leptosoles en los que aplica el calificador Hiperesquelético, 2 por ciento o más hasta una profundidad de 25 cm desde la superficie del suelo mineral; en otros suelos, 1 por ciento o más hasta una profundidad de 50 cm desde la superficie del suelo mineral. Los valores de erosionabilidad de estos suelos son del orden de 0.02 que indica una mediana susceptibilidad a la erosión

Feozem (phaeozems) Háplico, Los Feozem (Phaeozems) acomodan el suelo de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental. Estos son muy parecidos a Chernozems y Kastanozems pero están más intensamente lixiviados. Consecuentemente, tienen horizonte superficial oscuro, rico en humus que, en comparación con Chernozems y Kastanozems, son menos ricos en bases en el metro superior del suelo. Háplico se refiere a que tiene una expresión típica de ciertos rasgos (típica en el sentido de que no hay una caracterización adicional o significativa) y sólo se usa si no aplica ninguno de los calificadores previos.

Vertisol crómico, Los vertisoles son suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expandibles. Estos suelos forman grietas anchas y profundas cuando se secan. Crómico se refiere a que tiene dentro de 150 cm de la superficie del suelo una capa subsuperficial, de 30 cm o más de espesor, que tiene un hue Munsell más rojo que 7.5 YR o que tiene ambos, un hue de 7.5 YR y un croma, húmedo, de más de 4. Valores de K en forma general.

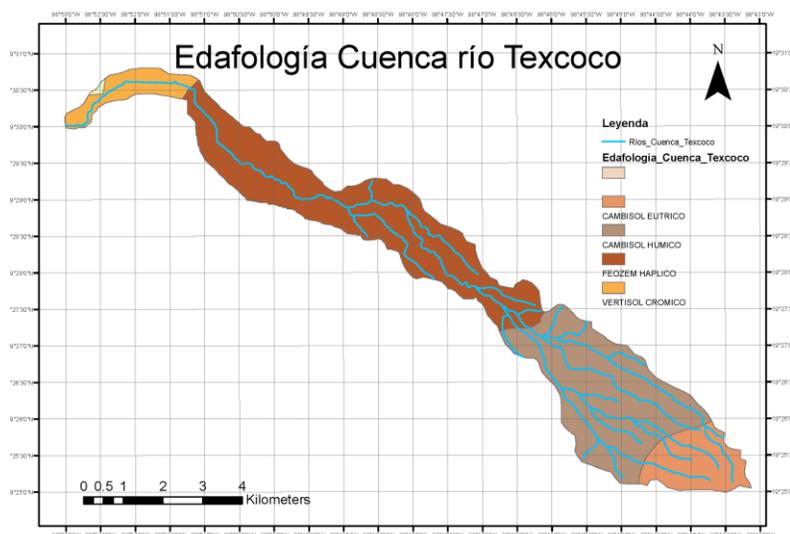


Figura 11. Edafología de la cuenca de Río Texcoco.

5.1.6 Hidrología

La cuenca forma parte de los ríos de oriente del Valle de México y se caracteriza por tener corrientes superficiales bien definidas que desembocan al ex lago de Texcoco, su recorrido lo realizan de oriente a poniente y su profundidad media varía entre 5 y 12 metros. Son corrientes efímeras que solo conducen agua cuando existe precipitación en la zona, y permanecen secas en la época de estiaje.

En la cuenca se identificaron 32 corrientes de diferentes órdenes con una longitud total de los cauces de 61 km, que indica que se cuenta con una relación de bifurcación de 4.5 cauces en promedio que descargan a otro cauce del orden inmediato superior y reporta una densidad de drenaje de 1.1 corrientes/km² lo que indica que por la topografía, densidad de drenaje, usos y tipos del suelos la zonas es mediano a alto potencial para producir sedimentos (Cuadro 10).

Cuadro 30. Número de corrientes por orden y longitud del Río Texcoco.

No. de orden	No. de Corrientes	Longitud Total (Km)	Long. media / orden (km)	Relación de bifurcación
1	20	32.67	1.63	
2	11	11.20	1.02	5
3	1	17.81	17.81	4
Total	32	61.68		

5.1.7 Estación hidrométrica

Para evaluar los sedimentos transportados por el escurrimiento superficial en la cuenca del Río Texcoco, fue necesario conocer la magnitud del escurrimiento, ya que el conocimiento del gasto que escurre, es factor determinante para definir la cantidad de material acarreado en suspensión y en el lecho del río.

La estación hidrométrica del Río Texcoco pertenece a la zona hidrológica No. VII de la cuenca de México (Figura 12), consta de la siguiente infraestructura hidráulica.

- a) Una sección de control que trata de ser constante a través del tiempo, permitiendo aplicar la ecuación de continuidad para obtener gastos correspondientes a cada avenida. Con lo anterior se logra que cada lectura de escala y gasto correspondiente permanezcan prácticamente constantes.
- b) Un tramo de aforo que permite que toda la sección del cauce sea uniforme en todos los tirantes, con el objeto de medir gastos máximos y mínimos. Durante la toma de muestras

y aforos, estos tramos permanecieron en sus lechos y márgenes, libres de vegetación que pudieran provocar posibles remansos de agua.

- c) Un limnómetro inclinado que se apoya sobre el talud de la margen derecha del cauce. Presenta en su escala graduada una modificación escalar para proporcionar lecturas verticales de los niveles de agua.
- d) Un limnógrafo de registro continuo equipado con caseta protectora y pozo amortiguador que suprime las oscilaciones que se forman con el oleaje del escurrimiento superficial. Este aparato tiene por objeto registrar los cambios constantes de los niveles de agua con respecto al tiempo. Contiene de un sistema de relojería que permite tomar lecturas continuas por semana.
- e) Un medidor de velocidad de la corriente de eje vertical de 6 cazoletas, que convierte el movimiento de la corriente en momento angular. Este medidor comúnmente llamado molinete, está equipado de un sistema eléctrico y un contador mecánico que emite sonidos cada cierto número de vueltas de las cazoletas.
- f) Puente para toma de aforos. Esta estructura sirve de piso para que el aforador determine las velocidades y cargas, para calcular indirectamente los gastos que pasan por el tramo de aforo, cuando la avenida es muy caudalosa y no permite efectuar vadeos, (aforos realizados en el lecho del cauce cuando los tirantes de agua son menores de 0.50 m).
- g) Estación meteorológica equipada con pluviómetro, pluviógrafo, anemómetro, evaporímetro, termómetro de máxima y mínima, y veleta direccional.



Figura 12. Estación Hidrométrica 26071 Texcoco de la Gerencia Regional de Aguas del Valle de México y Sistema Cutzamala.

Con la información que se colectaba en la estación de aforo, se reportaban los gastos medios diarios que escurrían en la cuenca, (utilizando el modelo de predicción obtenido por la CONAGUA) y los sedimentos en suspensión reportados por la Comisión de Aguas del Valle de México para el período de 1960 a 1990, información que se sirvió para el análisis de los cambios en las variables hidrológicas para antes (1960-1977) y después de las obras (1978 a 1990) y para calibrar el modelo WATEM/SEDEM ya que se tenían datos de producción de sedimentos en la cuenca. Para el período de 1990 en adelante, se utilizó parte de la información disponible hasta el año 2000, ya que el resto de la información reportada presentaba inconsistencias en sus valores y no fueron considerados.

5.1.8 Uso de suelo

La serie V de uso de suelo y vegetación (INEGI 2012) fue utilizada para conocer la presencia de la vegetación en la cuenca del Río Texcoco. Los usos del suelos y vegetación reportados muestra que en el 7.1% de la superficie de la cuenca (208.5 ha) están ocupados por asentamientos humanos y zona urbana; el área forestal ocupa 1,221.9 ha (41.6%), la agricultura de temporal y riego ocupan 1,071.85 ha (36.5%) y los pastizales y praderas se encuentran en 437.7 (14.9%) (Cuadro 11 y Figura 13).

Cuadro 41. Superficies de uso de suelo y vegetación de la serie V por INEGI de la cuenca del Río Texcoco.

Uso de suelo y vegetación	Superficie (ha)	Superficie (%)
Asentamientos humanos	135.8	4.6%
Bosque de oyamel	650.0	22.1%
Bosque de pino	315.8	10.7%
Bosque de pino-encino	256.1	8.7%
Pastizal inducido	275.9	9.4%
Agricultura de riego anual y semipermanente	117.2	4.0%
Agricultura de riego semipermanente	66.5	2.3%
Agricultura de temporal anual	888.2	30.2%
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino	157.5	5.4%
Pradera de alta montaña	4.2	0.1%
Zona urbana	72.7	2.5%
Superficie Total	2940	100%

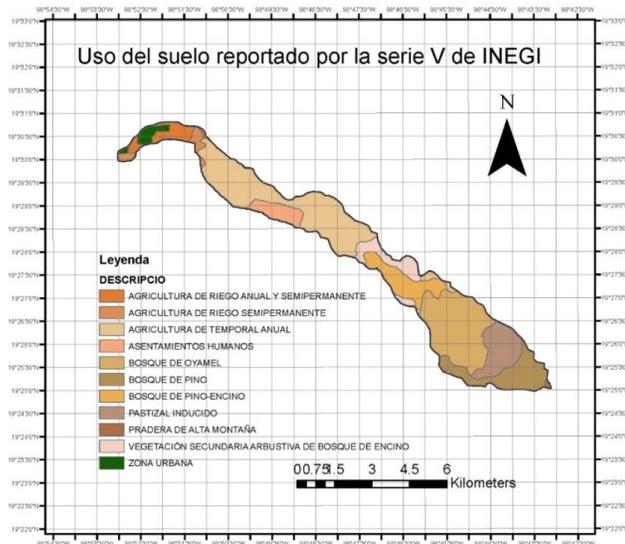


Figura 13 Uso de suelo reportado por INEGI en la serie V de la cuenca del Río Texcoco.

La superficie total de la cuenca es de 2,940.20 ha y el manejo integral usado por la Comisión del Lago de Texcoco (actualmente Gerencia del Lago de Texcoco), fue utilizado para recuperar cerca de 400 hectáreas de terrenos severamente erosionados en los que se encontraba expuesto el material subyacente ("tepetate"), siendo improductivas debido a la dureza del material y su escasa fertilidad.

Tomando en consideración esta clasificación, se optó por utilizar imágenes de Google maps del año 2010 utilizando el software SASplanet para realizar una clasificación propia tomando en cuenta los tipos de cobertura reportadas por Martínez (1999) y así mantener el mismo patrón (Figura 14).

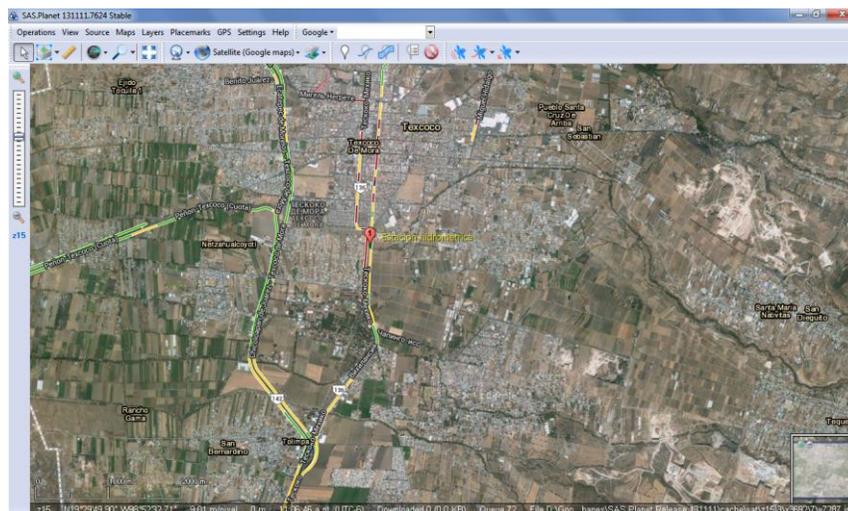


Figura 14 Visualizador de SASplanet para seleccionar el área de estudio.

5.2 Metodología del estudio

Para conocer los cambios en los usos del suelos y las variables hidrológicas de la cuenca del Río Texcoco en el periodo de estudio, se identificó el uso del suelo con la finalidad de conocer los cambios de usos del suelos reportados para los tres periodos bajo estudio (1960-1977, 1978-1990 y 1991-2010), se analizaron las imágenes de satélite para identificar los cambios de los índice de vegetación como el NVDI en el tiempo para asociarlos con las prácticas y obras de conservación y las acciones realizadas por la población y se obtuvo la información hidrométrica (escurrimientos medios, escurrimientos máximos y producción de sedimentos) con la finalidad de analizar si existen diferencias estadísticas estas variables en los periodos analizados. Para la calibración del modelo WATEM/SEDEM se utilizó la información previamente señalada y se obtuvieron los parámetros que requiere el modelo para su funcionamiento.

5.2.1 Cambios de uso de suelo

Los usos del suelo en la cuenca del Río Texcoco han evolucionado desde 1960 al 2010 que abarca el periodo de estudio, por lo cual se revisó la información existente y se encontró que ya existían mapas de uso del suelo reportados por Martínez (1999) para antes y después de las obras de conservación de suelo establecidas y las series I, II, III y IV de INEGI (2009) que reportaban los usos del suelo para diferentes fechas.

La información de uso de suelo para 1974 y 1989 fue la reportada en los trabajos presentados de efectos del manejo integral de la cuenca del Río Texcoco por Martínez (1999). Donde se basaron en cartas de uso de suelo y vegetación editadas por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) además de fotografías aéreas disponibles.

Para 1974, la parte media de la cuenca presentaba un fuerte proceso erosivo, complementariamente, existía la presencia de cárcavas profundas y frecuentes, que hacían de los terrenos zonas con pastizales degradados y que cubrían una superficie de 396.4 ha, lo que equivale a 13.94% de la superficie total de la cuenca delimitada para el estudio.

En 1989, la zona erosionada se redujo a 26.0 ha (menos del 1.0% de la superficie total) y las 374 ha restantes fueron rehabilitadas a través de obras y prácticas de conservación del suelo y agua, que consistieron en la roturación profunda, subsoleos, bordos y terrazas además de reforestaciones las cuales influyeron en una pequeña porción de la zona afectada.

En total la superficie rehabilitada con terrazas fue de 349.2 ha siendo el 12.28% de la superficie total de la cuenca del Río Texcoco y 21.2 ha fueron recuperadas con subsoleos y reforestación en la zona. Estos terrenos erosionados fueron destinados a la agricultura, la reforestación y otros se convirtieron en áreas urbanas y otros usos.

Al mejorar las condiciones de los suelos y los sistemas de producción de la zona. Las modificaciones realizadas a la superficie del terreno a través de las terrazas, y la reducción del proceso erosivo con la presencia de cultivos, permitió reducir la producción de sedimentos y la disminución de los escurrimientos máximos, medios y mínimos.

En la actualidad a pesar de que se ha logrado conservar los suelos con obras de conservación, la mancha urbana está en incremento reduciendo las zonas de cultivo en la parte baja y media de la cuenca, ocasionando además de la contaminación del Río Texcoco con basura y otros desechos. A pesar de esto, el suelo formado por los procesos de recuperación ha mantenido la superficie agrícola y con las obras de conservación de suelo aún existentes han mantenido los escurrimientos en un mínimo.

5.2.2 Índices de vegetación

El Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI) brinda una medida de la cobertura vegetal en una superficie de tierra abarcando grandes áreas. La vegetación densa, media, escasa, nula, agua y hielo es fácil de identificar en las imágenes de satélite.

El NDVI ha probado tener un gran rango de aplicaciones, ya que permite monitorear las condiciones de vegetación, alertar sequías, obtener el correcto balance entre la resolución temporal de la información y la escala del tiempo de variación en la medición. Los NDVI son más apropiados para monitorear eventos a largo plazo como el crecimiento temporal de la vegetación o tasas anuales de deforestación.

La vegetación difiere de otras superficies terrestres por que tiende fuertemente absorber la longitud de onda roja de la luz del sol y refleja las longitudes de onda cercanas al infrarrojo. El NDVI es una medida de la diferencia entre las longitudes de onda, toma valores entre -1 y 1, con valores de 0.5 indicando densa vegetación y valores menos de 0 indicando ninguna vegetación. La reflectividad es la relación de energía que es reflejada de un objeto con la energía de incidencia en el objeto. El espectro de reluctancia de un cultivo difiere en la región cercana al infrarrojo ($\lambda = 700-1300$ nm) y el rango de rojo visible ($\lambda = 550-700$ nm) del espectro electromagnético (Kumar y Silva, 1973). Vegetación generalmente tiene una baja reflectancia en porciones de rojo y azul del espectro por la absorción de clorofila, con una reflectividad ligeramente alta en el verde, por lo que las plantas lucen verdes a nuestros ojos.

La NDVI es calculado de la medición de reflectancia del rojo y cercano al infrarrojo del espectro.

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Rojo}}{R_{NIR} + R_{Rojo}} \quad (5.2.1)$$

Dónde:

R_{NIR} es el reflejo de la radiación NIR

R_{Rojo} es el reflejo de la radiación del rojo visible.

Para el análisis, se tomaran en cuenta los distintos tipos de uso y así obtener valores máximos, mínimos y promedio de dos etapas, la primera será para 1974 y la segunda será para el año más actual, el 2010. Con esto se obtendrá el valor el cambio en las coberturas vegetales de la zona de estudio y dará un respaldo del efecto que tiene las coberturas vegetales en la producción de escurrimientos. Las imágenes de Landsat fueron utilizadas en este estudio (Figura 15).

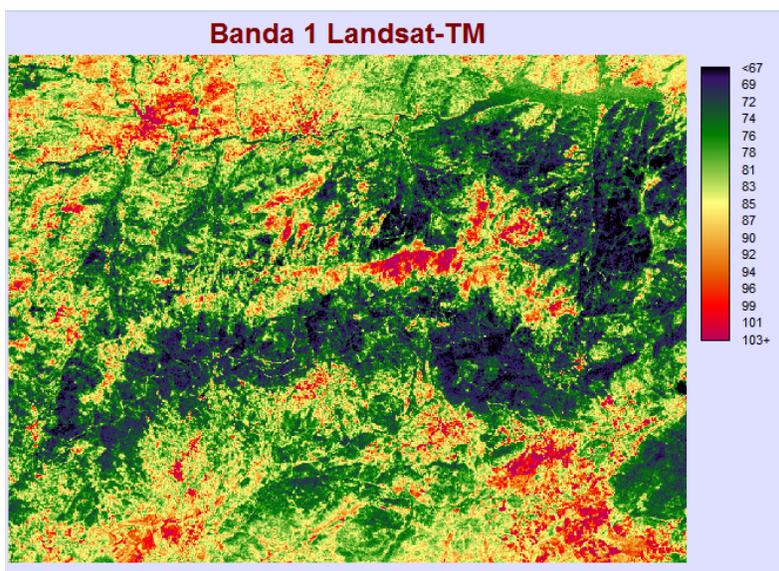


Figura 15. Imagen Landsat de la banda 1 para su análisis de NDVI.

También se ubicaran las zonas de erosión y evaluar su evolución con las obras de conservación y su impacto en la agricultura consecuencia de la producción de suelo suficiente para soportar agricultura y otras como pastizales. Apoyados del software ArcMap 10 para realizar estos cálculos y obtener los totales de cada tipo de uso y de las zonas de interés.

5.2.3 Análisis de las variables hidrológicas

Para la información de precipitación, escurrimientos medios, máximos y la producción de sedimentos para los periodos antes de las obras de conservación (1960-1977) y después de las mismas (1978-1990). Estos datos fueron analizados usando el análisis de datos del programa de Microsoft Office Excel realizando una comparación de los datos hidrológicos con la prueba de F para comprobar la semejanza o diferencia en las varianzas y la prueba de t de Student para el análisis de las medias para cada variable hidrológica en los dos periodos.

5.2.3.1 Prueba de F de Fisher

Para la prueba de F de Fisher es el análisis de varianza que consiste en la hipótesis de igualdad de las medias de dos grupos, y tiene su fundamento en la relación entre la variación explicada por las diferencias entre grupos y la variación individual. Esto significa que cuando el valor de f está cercano a 1 significa que las varianzas de las muestras son iguales.

Esto es si F es mayor que el Valor crítico y $P(F \leq f)$ una cola es menor que 0.005. Entonces las varianzas son distintas, lo que significa que si hay diferencia estadísticamente significativa. Si F es menor que el Valor crítico y $P(F \leq f)$ una cola es mayor que 0.005. Entonces no hay diferencia estadísticamente significativa (Figura 16).

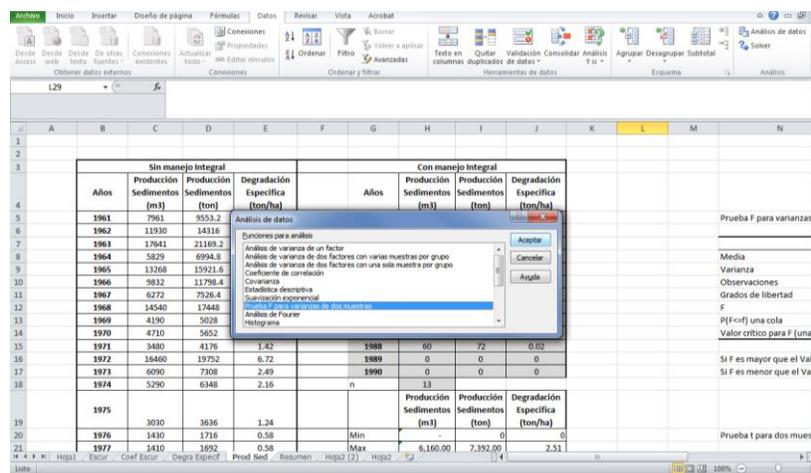


Figura 16. Selección de la prueba de F para varianzas de dos muestras.

5.2.3.2 Prueba de t de Student

En estadística, una prueba t de Student es el estadístico utilizado tiene una distribución t de Student si la hipótesis nula es cierta. Se aplica cuando la población estudiada sigue una distribución normal pero el tamaño muestral es demasiado pequeño como para que el estadístico en el que está basada la inferencia esté normalmente distribuido, utilizándose una estimación de la desviación típica en lugar del valor real. Es utilizado en análisis discriminante.

Una vez determinado si las varianzas son iguales o distintas de nuestra muestra de datos, se procede a usar la prueba t de Student donde el Estadístico t tiene que ser mayor que la t de tablas para que las medias tengan diferencia estadística significativa entre ellas (Figura 17).

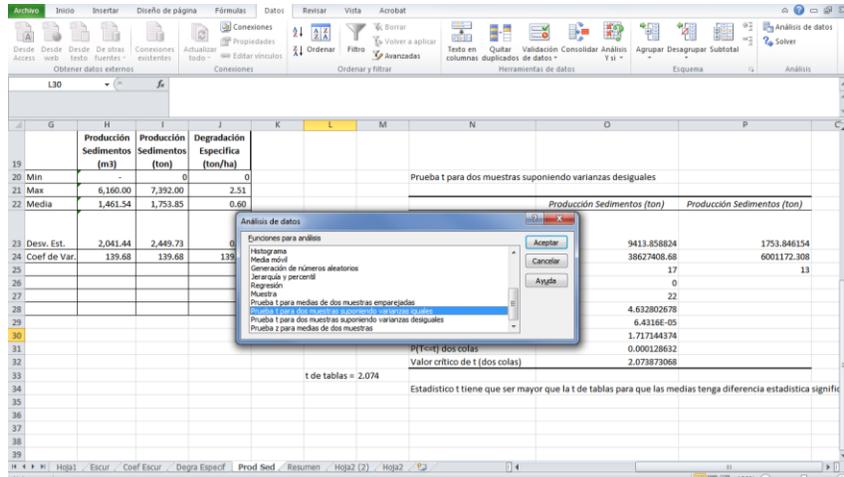


Figura 17. Selección de la prueba de t para dos muestras suponiendo varianzas iguales.

5.3 Aplicación de modelo WATEM/SEDEM

Para utilizar el modelo se obtuvieron los parámetros de entrada como los factores de erosividad de la lluvia (R), erosionabilidad de los suelos (K), la longitud y grado de pendiente que se elaboró como un DEM (LS), la variación de la cobertura vegetal (C) y las obras de conservación (P) para antes y después de las acciones de la zona de estudio, la forma en que estos factores de ingresan al software del modelo y la manera en que se realizó su calibración.

5.3.1 Datos de entrada

El modelo WATEM/SEDEM requiere información del área de estudio como son el modelo digital de elevaciones de la zona de estudio, el factor de cobertura vegetal por grandes grupos de vegetación (agricultura, pastos y bosques), el factor de K ponderado por los tipo de suelo presente, el factor de prácticas de manejo para la conservación de suelo (P) ponderado para antes y después de las acciones y los datos hidrológicos y la lluvia anuales que servirán de base para estimar la producción de sedimentos anuales calibrar adecuadamente el modelo comparando los datos observados con los estimados.

5.3.1.1 Mapa de cobertura

Para el mapa de cobertura es indispensable importar el mapa de uso del suelo. Este mapa de hecho es una reclasificación del mapa de uso de suelo que hace una distinción entre la tierra cultivable, pastos, caminos y ríos. Para cada una de estos usos se tiene diferentes identificadores.

- -2: caminos.
- -1: ríos.
- 0: área fuera de la zona de estudio.
- 1-n: terrenos bajo agricultura; el máximo número (n) indica el número de terrenos. Este valor debe ser menor que 10,000.
- 10,000: bosque.
- 20,000: pastos.

Cada terreno tiene su propio identificador. Esto hace posible la incorporación del efecto de los linderos de los terrenos en la dirección del escurrimiento, la intercepción del escurrimiento y depositación del sedimento.

Este mapa se puede hacer en IDRISI 32 combinando varios shapes de SIG, pero WATEM/SEDEM tiene la opción de crear este mapa automáticamente cuando los distintos shapes de SIG como cobertura, tipo de suelo se ingresan como datos (Figura 18).

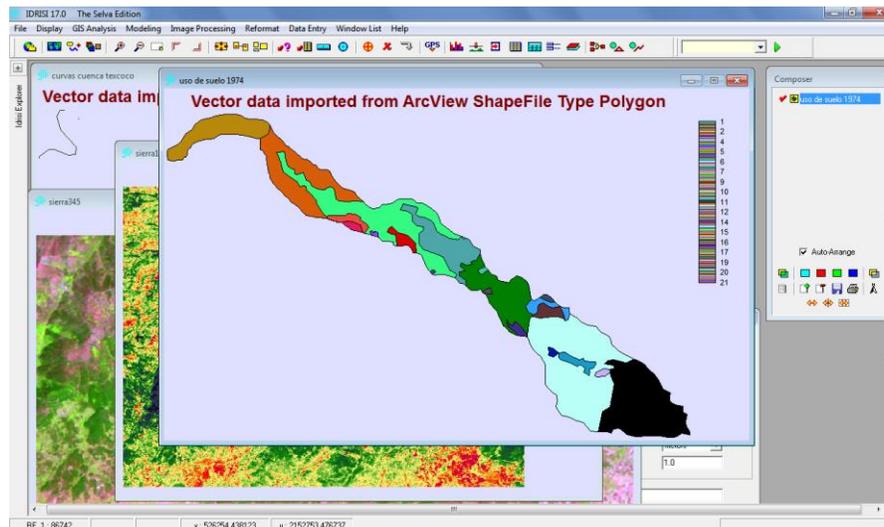


Figura 18. Ingreso de los distintos shapes al programas Idrisi32.

Para este estudio, se ingresaron los distintos shapes al programa de WATEM/SEDEM, los cuales fueron obtenidos del modelo digital de elevación (MDE), mapa de cobertura (Figura 19). Determinando así la primera etapa de datos requeridos para el modelo que necesita para una primera evaluación de los datos obtenidos y posteriormente comparados con los datos observados de la zona de estudio.

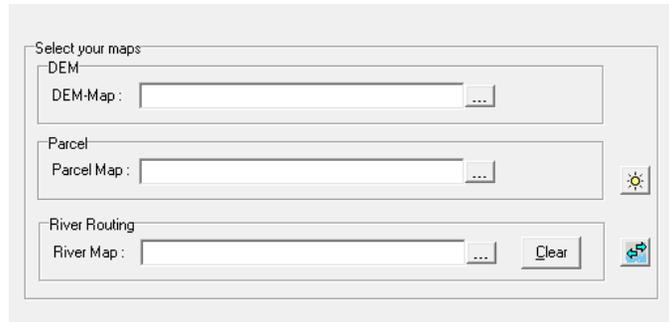


Figura 19. Información necesaria de entrada en la primera etapa.

5.3.1.2 Mapa de ríos

Este mapa, no se ingresó debido a la falta de datos observados a los largo de distintos puntos de la cuenca para corroborar el obtenido por el modelo.

5.3.1.3 Factor R de erosividad de la lluvia

Este factor de erosividad representa la habilidad o agresividad de la lluvia para producir erosión, es decir, la energía cinética de la lluvia necesaria para remover y transportar las partículas de suelo. Las gotas de lluvia primero mojan el suelo y después renueven las partículas. Cuando la precipitación excede la capacidad de infiltración, se presenta el escurrimiento superficial, el cual tiene la habilidad de remover y transportar las partículas del suelo.

Las gotas de lluvia la impactarse con la superficie del suelo, rompen los agregados y remueven las partículas de suelo, produciendo una ligera compactación. La capa compactada disminuye la capacidad de infiltración, originando el escurrimiento superficial. Wischmeier y Smith (1965) señalan que el mejor estimador de la erosividad de la lluvia es el EI_{30} , el cual se obtiene con la siguiente ecuación:

$$EI_{30} = (E)(I_{30}) \quad (5.3.1)$$

Dónde:

EI_{30} = Índice de erosividad para un evento ($MJ \text{ ha}^{-1} \text{ mm h}^{-1}$).

E = Energía cinética de la lluvia ($MJ \text{ ha}^{-1}$).

I_{30} = Intensidad máxima en 30 minutos continuos de lluvia (mm h^{-1}).

Con la suma de todos los EI_{30} de cada uno de los eventos del año, se obtiene el índice de erosividad anual (R).

$$R = \sum_{j=1}^n (EI_{30}) \quad (5.3.2)$$

Dónde:

R = Erosividad de la lluvia.

n = Número de eventos durante el año.

EI_{30} = Índice de erosividad de la lluvia por evento.

Cortés (1991), estimó el EI_{30} para las distintas regiones del país y reportó valores de erosividad que varían desde los 500 a los 29,000 MJ mm ha⁻¹ h año en el país. El propuso catorce modelos de regresión para que a partir de los datos de precipitación media anual se estime el valor de R de la EUPS para diferentes regiones del país.

La zona de estudio se encuentra ubicada en la región 8 y el modelo de predicción utilizado fue:

$$R = 1.9967 P + 0.003270 P^2 \quad (5.3.3)$$

Dónde:

R = Erosividad de la lluvia MJ ha⁻¹ mm h⁻¹.

P = Precipitación media anual de la región (mm) .

Utilizando la ecuación de R y los datos de precipitación media anual se estimaron los valores de R para el periodo 1960 a 2010. Los valores de R anuales deben de ser ingresado en Mj m⁻² mm h⁻¹ (Esto es dividir el valor de R entre 10,000) (Figura 20). Complementariamente se seleccionaron los valores mínimos y máximo del coeficiente de capacidad de transporte y el valor límite del mismo, de acuerdo con los datos propuestos por los autores del modelo, mismos que se ingresaron al modelo y se variaron posteriormente para la calibración del WATEM/SEDEM (Figura 20).

Water	
R-factor	0.125612
Transport Capacity Coef Low (kTc)	75
Transport Capacity Coef High (kTc)	250
Transport Capacity Coef Limit (kTc)	0.1

Figura 20. Ingreso de valor de R y coeficientes de capacidad de transporte.

5.3.1.4 Factor K de erosionabilidad del suelo

Es una compleja propiedad que se le entiende como la facilidad con la cual el suelo es desprendido por el salpicamiento, durante una lluvia o por flujo superficial. Esta propiedad del suelo está relacionada al efecto integrado de la lluvia, escurrimiento e infiltración.

Los suelos generalmente llegan a ser menos erosivos con una reducción en la fracción de limo a pesar del correspondiente incremento de la fracción de arcilla o arena.

El factor K representa el efecto de las propiedades del suelo y de las características del perfil del suelo en la pérdida de suelo. Los valores de K son asignados usando el nomograma de erosionabilidad del suelo, que combina el efecto del tamaño de las partículas, porcentaje de materia orgánica, código de la estructura del suelo y la clase de permeabilidad del perfil.

Los valores del factor K que está en función de la unidad de suelo, porcentaje de materia orgánica y su textura superficial que se encuentran reportados en el Cuadro 1 del anexo. El valor del factor K ponderado se ingresó al modelo (Figura 21). Es importante señalar que el factor K no tuvo una variación en el tiempo ya que no se contaba con análisis temporal de las propiedades de los suelos en la cuenca.



Figura 21. Factor de K ponderado para toda el área de estudio.

El factor de erosionabilidad del suelo (factor K para la ecuación de EUPS) se expresó en $\text{kg m}^{-2} \text{h MJ}^{-1} \text{mm}^{-1}$. Esta erosionabilidad del suelo puede ser calculada a partir del nomograma de la EUPS o usando la ecuación empírica de predicción del factor K del diámetro medio del diámetro geométrico de la partícula y contenido de materia orgánica.

5.3.1.5 Factor LS con un modelo digital de elevaciones

El Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) representa las elevaciones del territorio Mexicano y considera puntos sobre la superficie del terreno cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas (X, Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones (Z). Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular a cada segundo de arco. En la Figura 22 se muestra el CEM o DEM (Digital Elevation Model por sus siglas en inglés) del estado de México de donde se localizó la zona de la cuenca para ser utilizado en el software IDRISI 32.

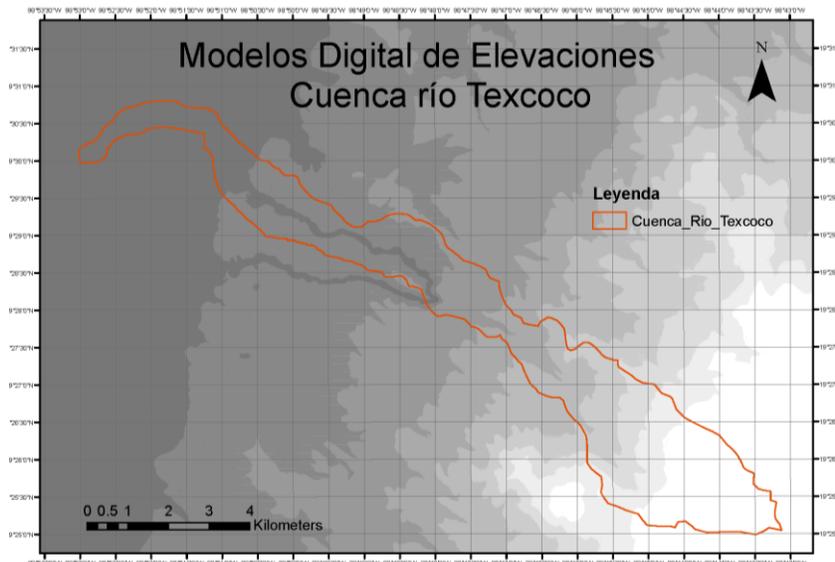


Figura 22. DEM del estado de México y ubicación de la cuenca del Río Texcoco.

Los datos de entrada necesarios para ejecutar el modelo WATEM/SEDEM se suministran en forma de capas raster IDRISI SIG (Clark Labs. Inc.), cada una con una resolución idéntica y cobertura espacial igual. Para este estudio se utilizó una resolución espacial de 20 x 20 m, con base en la recomendación de Van Rompaey et al. (2001).

El DEM (Modelo Digital de Elevaciones, por sus siglas en inglés) juega un papel central en WATEM/SEDEM. Se utiliza para calcular el gradiente de pendiente y el factor de longitud-pendiente (LS_{2D}), y para la trayectoria de los sedimentos aguas abajo. El DEM de la cuenca del Río Texcoco fue ingresado al modelo como se muestra en la Figura 19.

Otro aspecto de calidad del DEM es la presencia de depresiones y áreas planas. Es importante mantener el número de depresiones y áreas planas que no son colindantes con ríos tan bajo como sea posible, así como mantener la superficie de los mismos tan pequeña como sea posible. Esto debido a que el modelo sólo puede trazar la trayectoria de L y los sedimentos hacia los ríos, las depresiones y las áreas planas crean errores, ya que no es posible calcular la dirección del escurrimiento en ellos. Reduciendo el tamaño y la cantidad de depresiones y áreas planas se reduce su efecto en los cálculos. Esta reducción se puede realizar con IDRISI 32 con el modulo para remover depresiones (Analysis - Surface analysis - Feature extraction – Pit removal).

5.3.1.6 Factor C de cobertura y uso de suelo

Se utilizaron tres mapas de uso de suelo, el primero para 1974 que representa el área de estudio antes del establecimiento de las obras de conservación, el segundo año fue para el año de 1989 después de las obras y el último fue para el año 2010 donde se tiene un contraste más actualizado por la presencia de las obras.

En el año de 1974 se tenían reportadas usos del suelo similares a las de 1989 con la diferencia de que los terrenos erosionados que fueron rehabilitados y convertidos en zonas agrícolas, las zonas reforestadas y el crecimiento de las zonas urbanas.

Para el uso de suelo más actual obtenido fue para el 2010, se tiene un área mayor en la parte alta de bosque de pino y vegetación secundaria. En la parte baja se redujo el área de agricultura de temporal aumentando la zona urbana, en la parte media se redujo la vegetación secundaria y agricultura de temporal por áreas urbanas y zonas terrazadas.

Tomando en cuenta estos tres planos para cada etapa, se agruparon en tres grupos de uso de suelo: Zona de bosque, se consideraron todas las superficies de diferentes especies de árboles y a cada una se le asignó un valor de C^1 a fin de obtener un factor de C ponderado para los diferentes periodos; Zona de pastizal se identificaron las zonas con pastos y especies arbustivas a las cuales se le asignó un valor de C y se obtuvo el factor de C ponderado para cada periodo y las zonas agrícolas, a las que se les asignó un valor de C y se obtuvo el factor de C ponderado para cada etapas.

Para la selección del valor de C para cada tipo de uso, se tomaron como consideración el porcentaje cobertura en la superficie del uso, para lo forestal se consideró la densidad y el estado del bosque, es decir, los porcentajes en la superficie que tenían índices de tala, incendio, presencia de pastos o arbustos. Para pastizales también se toma en consideración las densidades. En el uso Agrícola, se considera la etapa de desarrollo del cultivo así como los residuos de materia orgánica.

El modelo el usuario tiene dos opciones, el primero es proporcionar un mapa del Factor C indicando el valor de C para cada pixel individual, o el valor ponderado para los principales usos de suelo, es decir, el uso de cultivo, bosque y pastizal. Los valores de C ponderados para las diferentes fechas de cultivo, bosque y pastizal se ingresaron al modelo como se muestra en la Figura 23.

C: Crop Factor			
<input type="radio"/> Map	Cropland :	Forest :	Pasture :
<input checked="" type="radio"/> Value	0.36	0.005	0.01

Figura 23. Valores promedio de C para los principales uso de suelo.

¹ Los valores de C asignados para los diferentes usos de los suelos y para los diferentes periodos fueron obtenidos de C, Agricultura, Erosión, Zona Urbana y otros y del Handbook No 537 publicado por USDA (1978).

5.3.1.7 Factor P de prácticas de manejo

El factor de la práctica de manejo (P) es la relación entre la pérdida de suelo con una específica práctica de conservación de suelo (Renard et al., 1997). Las técnicas establecidas para la conservación del suelo fueron las presas de gaviones y terrazas.

Los valores de P, que se utilizaron fueron los obtenidos experimentalmente en parcelas de erosión usando eventos de lluvia natural y simulada (RWCSCB, 1998; Yang y Shi, 1994) y se enumeran en el Cuadro 12.

Cuadro 52. Valores de P para varias prácticas de conservación de suelo.

Pendiente (grados)	Laboreo en pendiente	Presas de control	Terrazas en contorno
2.0-5.0	1	0.15	0.1
5.1-9.0	1	0.3	0.16
9.1-16.0	1	0.5	0.3
16.1-20.0	1	0.7	0.4
20.1-25.0	1	1	0.5

El valor P oscila de 0.1 a 0.9 dependiendo de la pendiente, mientras que es igual a 1 para el laboreo realizado de arriba hacia pendiente abajo.

Utilizando imágenes de Google maps y apoyados por el software SASplanet y el plano de 1989 realizado por Martínez (1999) se identificaron los polígonos con obras de conservación y se les determinó su área. Para cada tipo de obra se le asignó un valor de P y se obtuvo un factor P ponderado para después de las acciones y las que existen actualmente. El valor de P ponderado se ingresó en la pantalla que se muestra en la Figura 19.

5.3.2 Calibración del modelo

WATEM / SEDEM fue calibrado cambiando los valores KTC para diferentes tipos de uso de suelo. Para toda la red de cuadrícula con tierras de cultivo, se aplicó un valor de umbral KTC de 0.01. Para las áreas no cultivables, se utilizó un valor de umbral KTC de 0.001.

Por lo tanto, se utilizó un amplio rango de valores de la KTC para toda la zona de captación y para los años donde se cuenta con información de producción de sedimentos observados. De esta forma se definió el rango de valores de la KTC a ser utilizados para la calibración más detallada. Los valores de KTC fueron modificados e ingresado en el modelo WATEM / SEDEM hasta obtener las diferencias mínimas entre los valores observados y simulados.

En todos los casos, se han adoptado los valores por defecto de conectividad de parcelas de 10 por ciento y 75 por ciento para las tierras de cultivo y bosque/matorral, respectivamente. El modelo se ejecuta para un rango de valores de conectividad de parcelas para los dos tipos de uso del suelo mostraron que el modelo no es sensible a los cambios de los valores de conectividad.

El valor KTC óptimo se evaluó mediante la comparación de la desviación entre el valor predicho y observado de la producción de sedimentos, de acuerdo con el índice Nash y Sutcliffe (1970) que estima la eficiencia del modelo (ME) de la siguiente manera:

$$ME = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_{media})^2} \quad (5.3.4)$$

Dónde:

ME: es la eficiencia del modelo.

n: es el número de observaciones.

O_{media}: es el valor medio observado.

O_i: es el valor observado.

P_i: es el valor predicho.

El valor de ME puede variar desde - α a 1 y representa la proporción de la varianza inicial considerada por el modelo. Cuanto más cerca del valor de ME se aproxima a 1, más eficiente es el modelo. Los valores negativos de ME indican que el modelo produce más variación que la observada, es decir, el modelo es ineficiente.

La exactitud de la predicción de modelo se obtuvo utilizando la raíz del error cuadrático medio (RRMSE) propuesto por Van Rompaey et al, 2001.):

$$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i} \quad (5.3.5)$$

Dónde:

RRMSE: es la raíz del error cuadrático medio.

O_i: es el valor observado.

P_i: es el valor predicho.

n: es el número de observaciones.

Los valores de RRMSE van desde 0 a ∞. Cuanto más cerca del RRMSE aproxima a cero (el modelo es perfecto), mejor es el rendimiento del modelo.

6 Resultados y discusión

En este apartado se analizarán los cambios de uso del suelo en dos etapas (antes y después de las obras de conservación de suelos realizados) para conocer como impactaron al convertir terrenos degradados o recuperados en zonas agrícolas principalmente, los cambios de cobertura vegetal obtenidos utilizando el índice de vegetación de vegetación normalizado (NDVI), el impacto en las variables hidrológicas (escurrimientos medios, máximos y producción de sedimentos) y finalmente se presentan los resultados de la calibración del modelo WATEM/SEDEM para antes y después de las acciones realizadas y se utiliza el modelo para predecir los sedimentos en la primera década del 2000 en la cuenca del Río Texcoco.

6.1 Análisis de la variación de los usos del suelo

La cuenca del Río Texcoco antes de iniciar las obras de conservación (1974) de acuerdo con la información obtenida a partir de fotografías aéreas reportó un 13.6% de su territorio con fuertes problemas de erosión, donde afloraba el tepetate y los terrenos degradados tenían una gran cantidad de cárcavas; existía una agricultura tradicional con cultivos de escarda en su mayoría y algunas áreas con granos pequeños en la parte media y baja de la cuenca además en la parte media alta de la cuenca existían bosque de pino, oyamel y encino.

Los altos grados de degradaciones de suelos provocaban una gran producción de sedimentos que ponían en riesgo las obras de rehabilitación del vaso del Lago de Texcoco (Comisión de Aguas del Valle de México) razón por la cual, se inició un proceso de recuperación de terrenos degradados con razamientos, subsoleos, construcción de terrazas de base angosta y de banco y presas de control de azolves que se realizaron después de 1974 para reducir la producción de sedimentos, situación que provocó un cambio de uso del suelo de terrenos erosionados a zonas de cultivo y de zonas agrícolas y degradadas a zonas urbanas de acuerdo con el levantamiento del uso del suelos realizado en 1989.

Las acciones de conservación del suelos y agua realizadas en el periodo de 1974 a 1980 originaron para el año de 1989 se reportará una disminución en la zona cubierta con pastizales y una drástica reducción de las zonas erosionadas con una disminución del 93.4%, lo que contrasta con un incremento de 13.9 veces las zonas reforestada, con un 34.3% de la zona agrícola y con un aumento de 3.7 veces las zonas urbanas. Los cambios en los usos del suelo, permiten inferir que existen acciones que aumentan la cobertura vegetal de los terrenos, reduciendo los escurrimientos superficiales, la erosión de los suelos y la capacidad de transporte del flujo superficial para acarrear azolves, lo que debe manifestarse en una disminución en la producción de sedimentos.

El efecto acumulado de las acciones de conservación de suelo realizadas para el 2010 muestran que hubo algunos cambios en la superficie forestal de menos del 10% lo cual se explica por la

restricción en la autorización de permisos de uso forestal, la presencia de pastizales naturales ha disminuido hasta en un 78.5 % y lo más destacable es que la superficie erosionada ha desaparecido, que la superficie reforestada se incrementó en un 79 %, las zonas agrícolas crecieron en un 25 % y el área urbana creció en un 91 % (Cuadro 13 y Figura 24).

Cuadro 63. Comparación de cambio en área del uso de suelo de la zona de estudio.

Uso de suelo y vegetación	1974	1989	Variación en el periodo 1974 y 1989	2010	Variación en el periodo 1974 y 2010	Cambios en el uso del suelo
	Superficie (ha)					%
Bosque de pino	538.3	538.3	-	490.3	(48.0)	(9.8)
Bosque de oyamel	823.5	823.5	-	793.1	(30.4)	(3.8)
Bosque de encino	359.8	359.8	-	335.6	(24.2)	(7.2)
Pastizal natural	86.4	83.1	(3.3)	48.4	(38.0)	(78.5)
Reforestación	3.6	50.1	46.5	17.9	14.3	79.9
Agricultura	705.4	947.7	242.3	941.6	236.2	25.1
Erosión	396.4	26.0	(370.4)	-	(396.4)	(100.0)
Zona urbana	26.8	99.4	72.6	300.9	274.1	91.1
Otros	-	12.3	12.3	12.3	-	
Total	2,940.2	2,940.2		2,940.2		

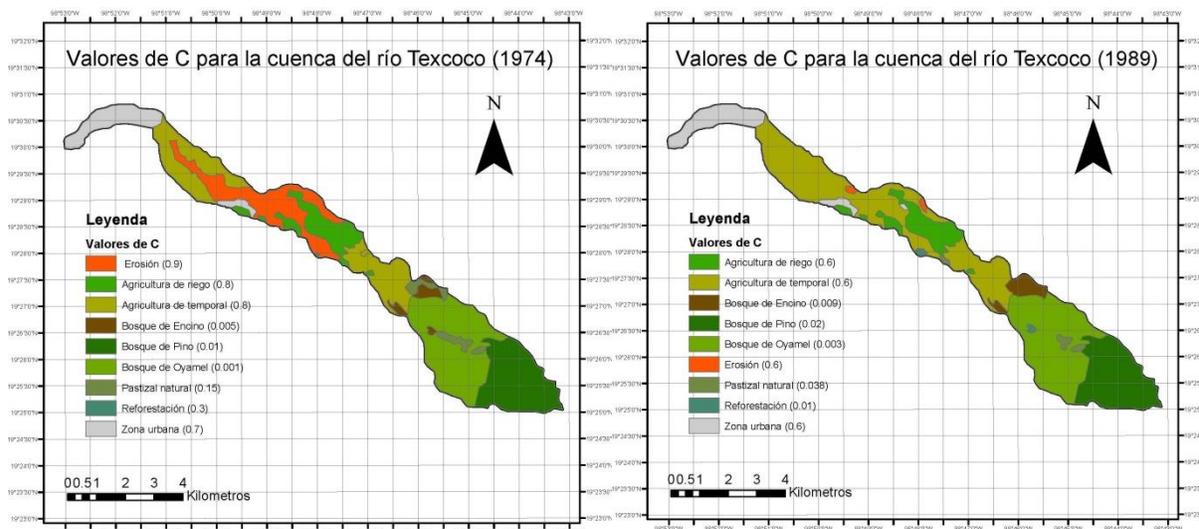


Figura 24. Usos del suelo en la cuenca del Río Texcoco (1974 y 1989)

Es importante destacar que el uso del suelo reciente (2010) muestra que la parte media y baja se ha incrementado la superficie agrícola de temporal (25.1%) con la presencia de obras de conservación de suelos como fueron la roturación para recuperar zonas de tepetates y la construcción de terrazas de banco para el desarrollo de cultivos, sin embargo, debe señalarse que

parte de las zonas agrícolas de la parte baja y media de la cuenca se han convertido en zonas urbanas debido a la creciente población que se reportada en esta zona aledaña a la Ciudad de Texcoco y la Ciudad de México (Figura 25).

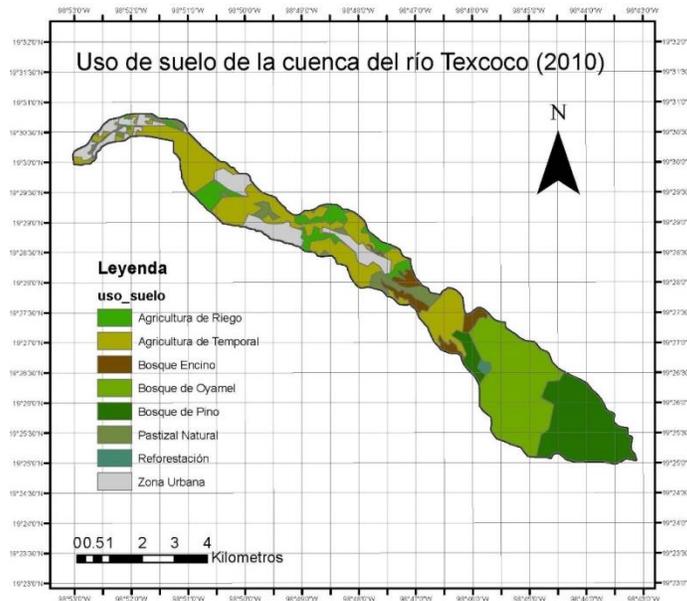


Figura 25. Usos del suelo identificados en la cuenca del Río Texcoco en el 2010.

En los terrenos de la parte media de la cuenca que se encontraban completamente erosionados, como ya fue mencionado, se construyeron terrazas de banco en más 300 ha terrenos que ahora se destinan a la producción del cultivo de maíz y recientemente se han construido invernaderos para la producción de hortalizas y flores.

En la margen derecha e izquierda del Río Texcoco y en el especial en la parte media de la cuenca donde existían terrenos degradados, ahora son terrenos terraceados que se utilizan en la agricultura y que todavía en la margen derecha del Río Texcoco se muestran los vestigios de las cárcavas que ahora se encuentran estabilizadas como productos del manejo y las acciones de recuperación de tierras (Figura 26).



Margen derecha de la cuenca del Río Texcoco



Margen izquierda de la cuenca del Río Texcoco



Figura 26. Vestigios de zonas cárcavedas que fueron recuperadas y actualmente se cultivan en San Pablo Ixayoc

Los cambios de uso del suelo afectaron la cubierta vegetal y la protección del terreno contra los procesos erosivos, razón por la cual, la superficie de cada uso del suelo fueron identificadas para cada periodo a fin asignarles un valor del parámetro C (factor de protección) a cada área y obtener valores ponderados a utilizar en el modelo WATEM/SEDEM.

Las acciones de conservación modificaron la pendiente de las laderas, razón por la cual a medida que se construyen más obras de protección como fueron las terrazas de banco para la agricultura se redujo el riesgo a la erosión lo cual es explicado por el factor P del modelo de predicción WATEM/SEDEM y fue obtenido en forma ponderada en cada etapa de análisis. Las terrazas de banco construidas en la cuenca muestran las modificaciones realizadas en el terreno y como estas influyen en la longitud de la pendiente y en el grado de pendiente de la ladera (Figura 27).



Figura 27. Terrazas de banco construidas para reducir los procesos erosivos en San Pablo Ixayoc.

Las acciones de conservación de suelos realizadas en la cuenca han recuperado los terrenos degradados para incorporarlos a la producción de alimentos, sin embargo, estos terrenos se encuentran amenazados por el crecimiento de las zonas urbanas y la construcción de invernaderos lo cual también tiende a acelerar los procesos de degradación de los suelos ahora como zonas urbanas generadoras de escurrimientos y de contaminación urbana que van de alguna manera a incidir en la producción de sedimentos en la cuenca (Figura 28).



Figura 28. Invernadero y zona urbana generadora de escurrimiento y contaminación en el poblado de San Pablo Ixayoc.

6.2 Análisis de los índices de vegetación antes y después de las obras

La zona bajo estudio ha pasado por varios fuertes cambios en el lapso de 50 años, estos cambios de uso de suelo se han visto reflejados en la producción de escurrimientos los cuales se fueron reduciendo gracias a los trabajos de conservación realizados en la cuenca y como consecuencia se logró reducir las zonas erosionadas.

Para identificar estos cambios, se obtuvieron valores de NDVI para los distintos polígonos identificados de uso de suelo para 1974 y 2010 en las épocas secas y de lluvias. En la época de secas, las zonas agrícolas reportaron valores de NDVI que oscilaron para las zonas de riego de 0.039 a 0.37 con un promedio de 0.197 y para la zona de temporal de 0.013 a 0.472 con un promedio de 0.27 en 1974, mientras que en el 2010, los valores de NDVI para las zonas de riego variaron de 0.274 a 0.716 con una media de 0.495 y para temporal de 0.248 y 0.818 con una media de 0.261, lo que indica hubo un incremento en los valores de NDVI de 0.298 y de 0.261 para riego y temporal respectivamente indicando que existió un incremento en la cobertura vegetal (Figura 29 y Cuadro 14).

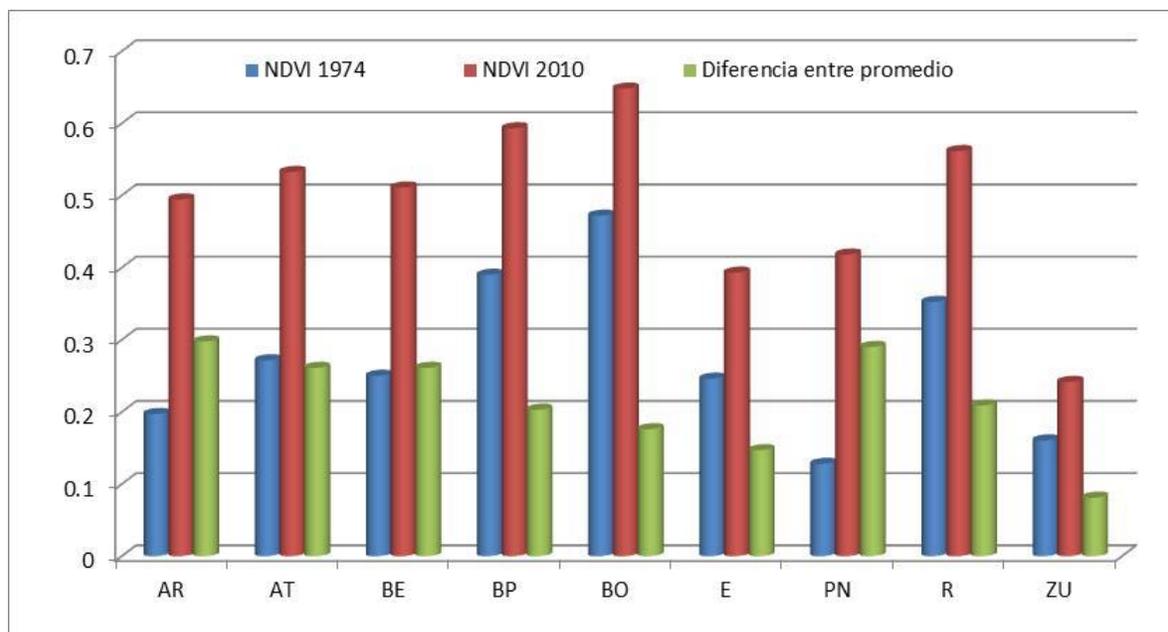


Figura 29. Valores de NDVI para diferentes usos del suelo en 1974 y 2010 de la época de secas en la cuenca del Río Texcoco.

Cuadro 74. Valores de NDVI para los años de 1974 y 2010 para la época de secas en la cuenca del Río Texcoco.

Uso de Suelo		Valores de NDVI								Diferencia entre promedio
		1974				2010				
		Min	Max	Media	Desv. Est	Min	Max	Media	Desv. Est	
Agricultura riego	AR	0.039	0.37	0.197	0.066	0.274	0.716	0.495	0.141	0.298
Agricultura temporal	AT	0.013	0.472	0.2715	0.080	0.248	0.818	0.533	0.142	0.261
Bosque encino	BE	0.03	0.412	0.25	0.092	0.265	0.758	0.511	0.143	0.261
Bosque pino	BP	0.167	0.439	0.39	0.045	0.402	0.785	0.593	0.139	0.203
Bosque oyamel	BO	0.185	0.531	0.472	0.085	0.420	0.877	0.648	0.143	0.176
Erosión	E	-0.0531	0.259	0.246	0.077	0.181	0.605	0.393	0.142	0.147
Pastizal natural	PN	-0.018	0.274	0.128	0.046	0.217	0.620	0.418	0.137	0.290
Reforestación	R	0.178	0.365	0.3525	0.045	0.413	0.711	0.562	0.134	0.209
Zona urbana	ZU	0.0651	0.238	0.1605	0.087	0.300	0.584	0.242	0.143	0.081

En la zona de bosques los valores de NDVI medios se incrementaron en un 65%, la zona erosionada se redujo en un 60%, las zonas reforestadas aumentaron en un 59%, las zonas de pastizal en un 227% y la zona urbana en un 51% con respecto al que se tenía en año de 1974, lo que indica un incremento en la cobertura en todos los usos del suelo, que puede ser atribuible a las prácticas de manejo y a las restricciones para la extracción de las especies forestales en la zona.

Para la época de lluvias los valores promedio de NDVI de las zonas de agricultura de riego fueron de 0.209 y de 0.518 para 1974 y 2010 respectivamente lo indica que hubo un incremento de 0.308 que responde a mayores coberturas de vegetación. Para las zonas con agricultura de temporal los valores de NDVI fueron ligeramente mayores y la diferencia entre de los valores promedio de NDVI menores entre los años 1974 y 2010 (Figura 30 y Cuadro 15).

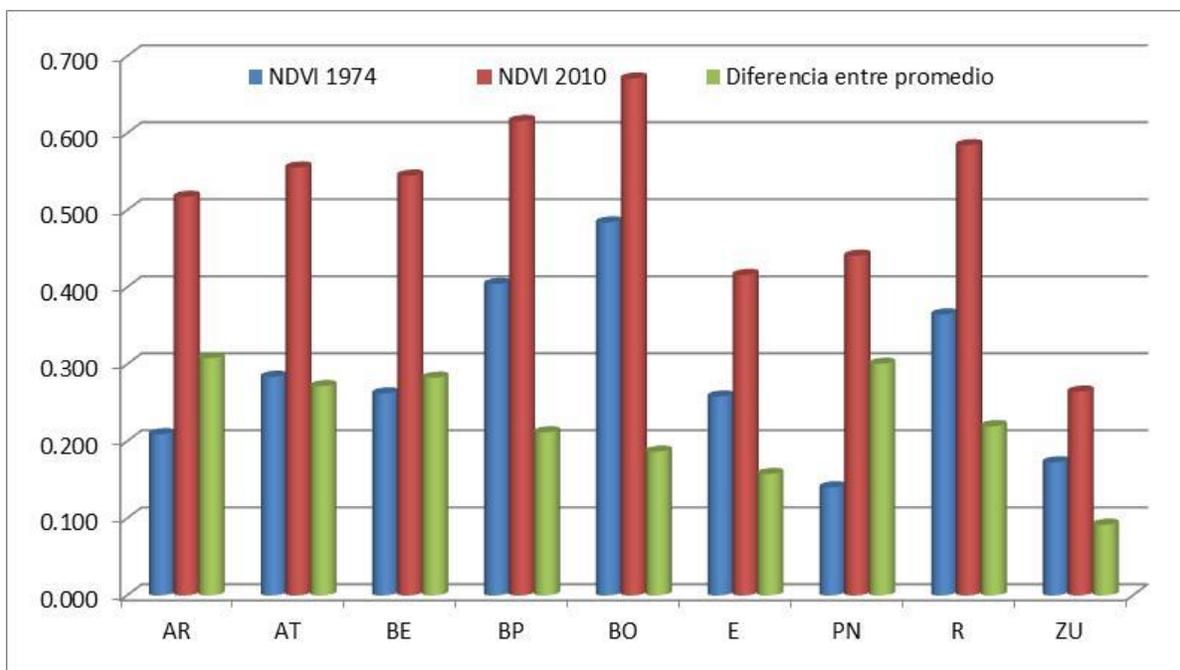


Figura 31 Valores gráficos de NDVI para la época de lluvias de la cuenca del Río Texcoco.

Cuadro 15. Valores de NDVI para los años de 1974 y 2010 para la época de lluvias en la cuenca del Río Texcoco.

Uso de Suelo		Valores de NDVI								Diferencia entre promedio
		1974				2010				
		Min	Max	Media	Desv. Est	Min	Max	Media	Desv. Est	
Agricultura riego	AR	0.051	0.393	0.209	0.078	0.286	0.739	0.518	0.153	0.308
Agricultura temporal	AT	0.025	0.495	0.284	0.092	0.260	0.841	0.556	0.155	0.272
Bosque encino	BE	0.042	0.435	0.262	0.104	0.277	0.781	0.545	0.156	0.283
Bosque pino	BP	0.179	0.462	0.404	0.058	0.414	0.808	0.616	0.151	0.212
Bosque oyamel	BO	0.197	0.554	0.484	0.097	0.432	0.900	0.671	0.155	0.187
Erosión	E	-0.041	0.282	0.258	0.089	0.194	0.628	0.416	0.154	0.158
Pastizal natural	PN	-0.006	0.297	0.140	0.058	0.229	0.643	0.441	0.175	0.301
Reforestación	R	0.190	0.388	0.365	0.053	0.425	0.734	0.585	0.151	0.220
Zona urbana	ZU	0.077	0.261	0.173	0.099	0.312	0.607	0.265	0.155	0.092

La zona de bosques, los valores medios de NDVI aumentaron en un 66% resultado de la reforestación realizada, en la zona erosionada se redujo y el que mayor incremento se tuvo en la zona de pastizal con un incremento del 214% en diferencia con el año de 1974. Para la zona urbana, el incremento en el NDVI fue del 53%.

El uso de las imágenes de satélite con sus bandas 3 y 4 de diferentes años y temporadas del año similares permite obtener valores de reflectancias con sus estadísticos para comparar estadísticamente los cambios en los índices de vegetación (NDVI) que se presentan a través del tiempo y que son indicadores de cambios en cobertura vegetal y la eficiencia de las actividades de reforestación, sin embargo debe reconocerse que la calidad de las imágenes analizadas en las

diferentes épocas tienen diferentes calidades, situación que podría sesgar los cambios o incrementos de los valores de NVDI de los diferentes usos del suelo.

6.3 Cambios en las variables hidrológicas producto del manejo

La información de la precipitación anual reportados por el Servicio Meteorológico Nacional para el período de 1960 a 1990, los escurrimientos superficiales (medios y máximos anuales) y la producción de sedimentos reportados de la estación hidrométrica de la cuenca del Río Texcoco por la CONAGUA (BANDAS) para el periodo de 1960 a 1990, fue analizada para conocer las relaciones precipitación escurrimiento, la variación de los escurrimientos máximos instantáneos y los sedimentos en el período de 1960 a 1990 que considera la etapa de antes (1960-1977) y después de las acciones de conservación de suelos en la cuenca (1978-1990).

6.3.1 *Relación entre la precipitación y el escurrimiento con o sin obras de conservación*

La precipitación anual muestra una variación aleatoria en la zona de estudio y el promedio fue de 586.9 mm con un rango de variación de 198 mm y un coeficiente de variación de 10.3 % para el periodo de antes de las acciones de conservación y para después, la precipitación media fue de 564 mm y un rango de variación de 346 mm, el cual es ligeramente mayor que el reportado para el periodo de antes de las obras, lo cual se explica con un ligero incremento del 7.2 % en el coeficiente de variación (Cuadro 16 y Figura 32).

Los datos de escurrimiento muestran también una variación aleatoria en ambos periodos, sin embargo, el escurrimiento medio anual en el primer periodo (antes de las obras) fue casi cuatro veces mayor que el reportado para después de las acciones, lo que indica que hubo un índice del 72% para reducir los escurrimientos superficiales y aumentar la recarga de acuíferos en 36.4 mm promedio por año, que representa un volumen superior a un millón de m³ por año (Cuadro 16 y Figura 32).

La relación precipitación escurrimiento o coeficiente de escurrimiento varió de 0.04 a 0.16 con un valor promedio de 0.08 para antes de las obras y de 0 a 0.07 con valor promedio de 0.02 para después de las acciones de conservación lo que sugiere que estas tuvieron una eficiencia del 75% para reducir los coeficientes de escurrimientos (Figura 33).

Cuadro 16. Relaciones precipitación escurrimiento para antes y después de las acciones de conservación de suelos para la cuenca del Río Texcoco.

Antes				Después			
Años	Precipitación (mm)	Escurrecimiento (mm)	Coefficiente de Escurrecimiento	Años	Precipitación (mm)	Escurrecimiento (mm)	Coefficiente de Escurrecimiento
1960	584.0	29.1	0.05	1978	572.0	28.7	0.05
1961	512.0	72.8	0.14	1979	655.0	18.2	0.03
1962	621.0	27.4	0.04	1980	581.0	6.2	0.01
1963	695.0	88.6	0.13	1981	727.0	39.3	0.05
1964	664.0	33.8	0.05	1982	442.0	32.4	0.07
1965	600.0	77.6	0.13	1983	517.0	10.0	0.02
1966	599.0	65.9	0.11	1984	694.0	16.8	0.02
1967	615.0	31.3	0.05	1985	586.0	2.2	0.00
1968	636.0	63.1	0.10	1986	474.0	6.8	0.01
1969	594.0	45.0	0.08	1987	533.0	8.2	0.02
1970	517.0	27.3	0.05	1988	543.0	4.2	0.01
1971	514.0	25.6	0.05	1989	381.0	3.1	0.01
1972	512.0	65.7	0.13	1990	632.0	-	-
1973	595.0	38.4	0.06				
1974	653.0	41.9	0.06				
1975	497.0	41.7	0.08				
1976	634.0	98.5	0.16				
1977	523.0	23.6	0.05				
n	18			n	13		
Min	497.0	23.6	0.04	Min	381.0	-	-
Max	695.0	98.5	0.16	Max	727.0	39.3	0.07
Media	586.9	49.9	0.08	Media	564.4	13.5	0.02
Desv. Est	60.7	23.6	0.04	Desv. Est	98.9	12.7	0.02
Coef de Var.	10.3	47.3	46.5	Coef de Var.	17.5	93.6	93.3

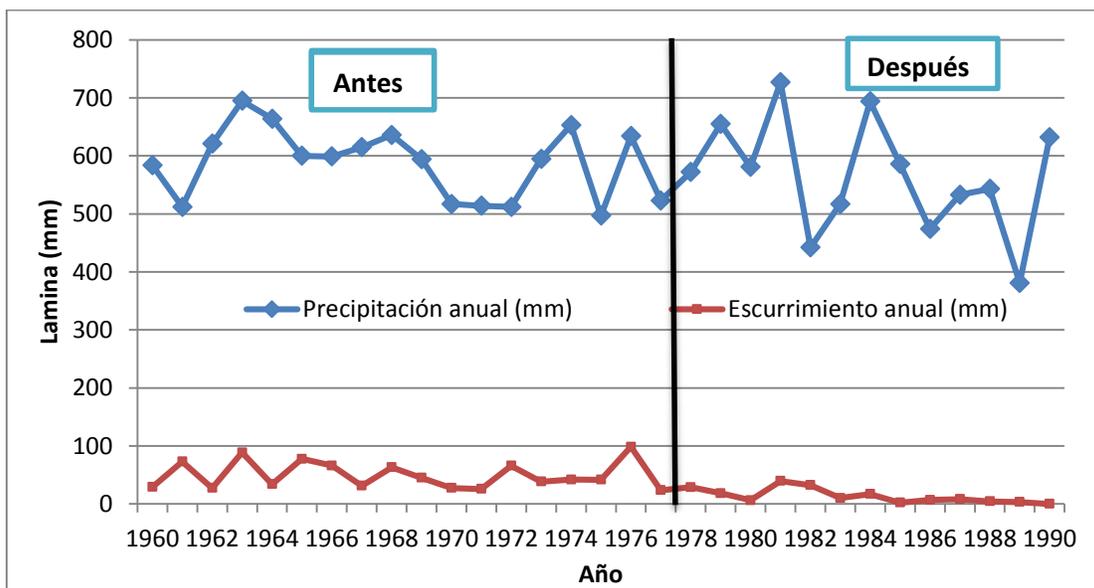


Figura 32. Variación de la precipitación y el escurrimiento para antes y después de las acciones de conservación en la cuenca del Río Texcoco

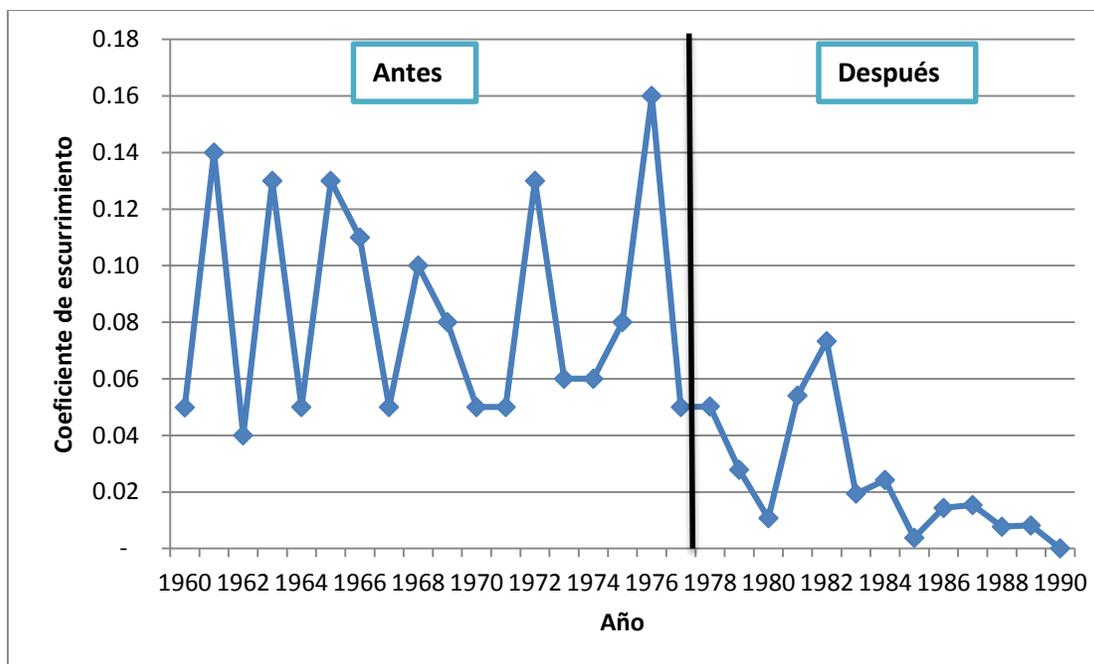


Figura 33. Variación de los coeficientes de escurrimiento para ambos periodos en la cuenca del Río Texcoco

La precipitación para los dos periodos de estudio fue analizada estadísticamente utilizando la prueba de F y se encontró que no hay diferencias estadísticamente significativas entre la precipitación en ambos periodos. La prueba t muestra que valor estadístico de t fue de 0.20, que es menor que el valor de t de las tablas (2.11) lo que indica que no existen diferencias estadísticas significativas de la precipitación en ambos periodos, o sea que los datos de precipitación son similares (Cuadro 17).

Cuadro 17. Prueba de F para comparar las relaciones precipitación escurrimiento en ambos periodos de la cuenca del Río Texcoco.

Prueba F para varianzas de dos muestras	Precipitación (mm)	Escurrimiento (mm)	Coefficiente de escurrimiento
F	0.2647	3.4584	3.3825
P(F<=f) una cola	0.0064	0.0170	0.0185
Valor crítico para F (una cola)	0.4201	2.5828	2.5828
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales para escurrimiento y coeficiente de escurrimiento e iguales para precipitación			
Estadístico t	0.2074	5.5188	5.5818
P(T<=t) una cola	0.419	3.79E-06	3.21E-06
Valor crítico de t (una cola)	1.6991	1.7033	1.7033
P(T<=t) dos colas	0.8371	7.58E-06	6.41E-06
Valor crítico de t (dos colas)	2.0452	2.0518	2.0518
Valor t de las tablas	2.1100	2.0520	2.0520

En contraste, la prueba de F para los valores del escurrimiento y coeficientes de escurrimiento para ambos periodos reporta valores de F (3.4 y 3.3 respectivamente) que son mayores que el Valor crítico (2.518) y $P(F \leq f)$ una cola (0.017 y 0.018 respectivamente) son menores que 0.005, entonces las varianzas son desiguales y hay diferencias estadísticamente significativas en los escurrimientos y los coeficientes de escurrimientos de ambos periodos (Cuadro 17).

La prueba de t muestra para escurrimiento y coeficiente de escurrimiento muestra que los estadísticos de t fueron de 5.51 y 5.58 que son mayores que el valor de t de las tablas (2.05), lo que indica, que existen diferencias altamente significativas para ambas variables hidrológicas, y que estas diferencias se atribuyen a las obras de conservación de suelos realizadas, a pesar de no existir diferencias significativas en la precipitación en ambos periodos (Cuadro 22).

6.3.2 Escurrimientos máximos instantáneos medidos en la estación hidrométrica

La información disponible en la estación hidrométrica de la cuenca del Río Texcoco permitió analizar estadísticamente la variación de los escurrimientos máximos instantáneos anuales en los periodos 1 y 2 de antes de las obras (1946 a 1960 y de 1961 a 1976 respectivamente) y el periodo después de las obras (Cuadro 18 y Figura 34).

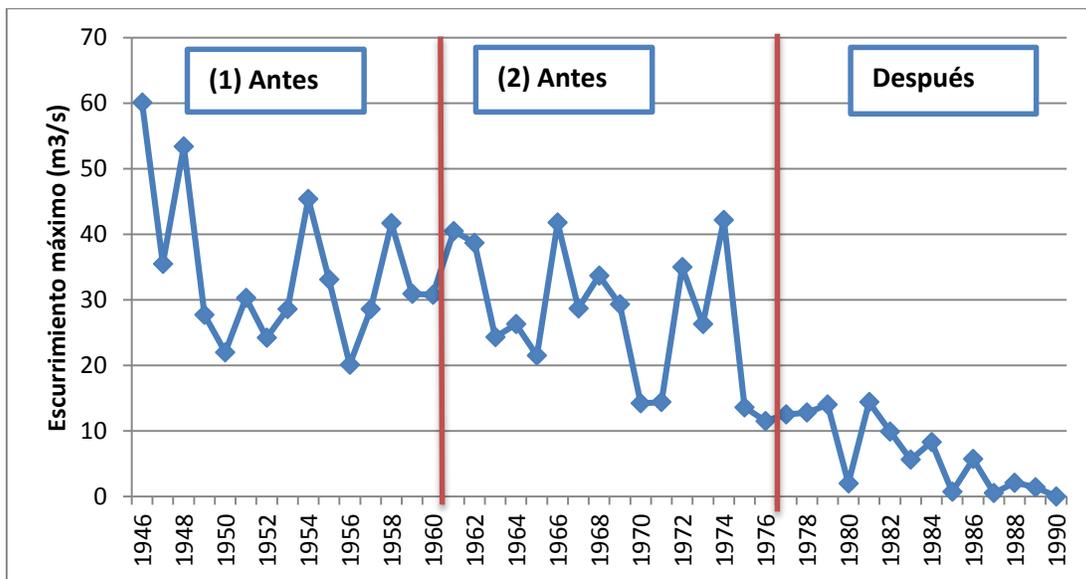


Figura 34. Variación de los escurrimientos máximos instantáneos en el periodo de 1946 a 1990 de la cuenca del Río Texcoco

Los escurrimientos máximos instantáneos en los dos periodos de estudio (de 1946 a 1976) fue de $61 \text{ m}^3/\text{s}$ y los mínimos de $14 \text{ m}^3/\text{s}$ con un comportamiento aleatorio en el tiempo, pero con una tendencia a irse reduciendo, pero después de las obras realizadas estos valores decrecen abruptamente hasta llegar a menos de $1 \text{ m}^3/\text{s}$ como producto de la construcción de presas de

control de azolves que regulan el flujo en cauces y de la construcción de terrazas de banco, razamientos, subsoleo y nivelaciones que cambiaron la configuración del terreno y redujeron las avenidas máximas instantáneas (Figura 34).

El análisis de los escurrimiento máximos instantáneos en los periodos de antes (1 y 2) muestran gastos máximos iguales (mayores de 60 m³/s) y los gastos medios y mínimos son similares y su comportamiento temporal es aleatorio, al igual que la precipitación. Ahora, si se comparan los escurrimientos máximos del periodo de antes (2) y después se observa una reducción de cinco veces la magnitud de la avenida máximas extraordinarias, efecto de la reducción del volumen y velocidad del flujo superficial causado por las obras realizadas (Cuadro 18).

Cuadro 18. Escurrimiento máximo anual del Río Texcoco para el periodo de 1946 a 1990.

Antes 1		Antes 2		Después	
Año	Escurrimiento	Año	Escurrimiento	Año	Escurrimiento
1946	60.10	1960	30.80	1978	12.83
1947	35.50	1961	36.30	1979	14.03
1948	53.40	1962	38.70	1980	2.02
1949	27.70	1963	24.30	1981	14.40
1950	22.00	1964	26.30	1982	9.90
1951	30.03	1965	21.50	1983	5.61
1952	24.50	1966	61.80	1984	8.32
1953	28.60	1967	28.73	1985	0.69
1954	49.40	1968	33.67	1986	3.10
1955	33.10	1969	29.28	1987	0.51
1956	20.10	1970	14.20	1988	2.06
1957	28.60	1971	14.40	1989	1.43
1958	41.70	1972	35.00	1990	-
1959	30.90	1973	26.26		
		1974	42.22		
		1975	15.36		
		1976	11.46		
		1977	12.48		
n	14		18		13
Min	20.10		11.46		-
Máx	60.10		61.80		14.40
Media	34.69		27.93		5.76
Desv. Est	12.09		12.67		5.45
Coef de var.	34.86		45.38		94.62

Las avenidas extraordinaria de acuerdo con la información disponible tuvieron un el gasto máximo instantáneo fue de 61 m³/s para un periodo de retorno de 46 años, 41 m³/s para un periodo de retorno de 10 años y de 24 m³/s para un periodo de retorno de 2 años (Cuadro 19).

Cuadro 19. Esgurrimiento máximos instantáneos para diferentes periodos de retorno para el Río Texcoco.

Periodo de retorno	Esgurrimiento máximo (m ³ /s)
46 años	61.00
10 años	41.88
5 años	35.45
2 años	24.25

Es importante destacar que cuando se realizan trabajos de manejo de los recursos naturales en las cuencas, se modifican las condiciones de esgurrimiento y por lo tanto el análisis de las avenidas extraordinaria se debe realizar para los periodos de antes y después de las acciones. Los esgurrimientos máximos instantáneos ordenados de mayor a menor para los periodos de antes y después de las acciones de muestran una reducción considerable de los gastos máximos en los diferentes periodos de análisis (Figura 35).

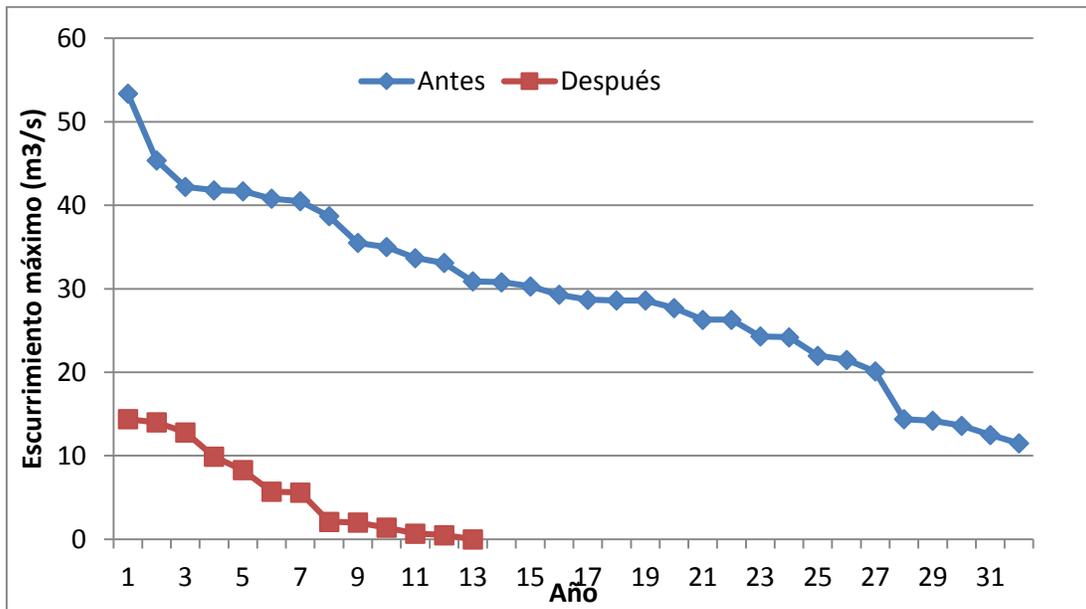


Figura 35. Esgurrimientos máximos ordenados para antes y después de las acciones en la cuenca del Río Texcoco.

Los esgurrimientos máximos instantáneos ordenados de los periodos sugieren que para predicciones probabilísticas de las avenidas extraordinarias para el diseño de obras de infraestructura hidráulica se deben utilizar las bases de datos existentes del periodo donde se realizaron acciones o en su defecto modificar los coeficientes de esgurrimiento que se consideren para la predicción.

La prueba de F realizadas para los esgurrimientos máximos instantáneo de los periodos de antes (1 y 2) muestra que el valor de F (0.91) que es mayor que el valor crítico de F para una cola (0.4) y

$P(F \leq f)$ (0.44) de una cola que es mayor que 0.005, entonces hay diferencias estadísticamente significativas entre las varianzas, por lo tanto no existen diferencias significativas en los escurrimientos máximos de los dos periodos de antes de las acciones. Con prueba de t que se realizó para los escurrimiento máximos se encontró que las varianzas son desiguales con un valor de t es de 1.5 que es menor que el t de las tablas, por lo tanto, no existen diferencias significativas en las medias de las dos base de datos (antes 1 y 2) lo que confirma que no existen diferencias entre los valores medios de los escurrimientos máximos instantáneos de los dos periodos de antes de las acciones de conservación (Cuadro 20).

Cuadro 20. Estadísticos para la comparación de medias del escurrimiento máximo anual para los periodo de 1946 a 1990.

Prueba F para varianzas de dos muestras	Escurrecimiento máximo anual (m ³ /s) Antes 1 y Antes 2	Escurrecimiento máximo anual (m ³ /s) Antes 2 y Después
F	0.911	5.404
$P(F \leq f)$ una cola	0.439	0.003
Valor crítico para F (una cola)	0.400	2.583
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales		
Estadístico t	1.535	6.621
$P(T \leq t)$ una cola	0.068	3.08E-07
Valor crítico de t (una cola)	1.699	1.708
$P(T \leq t)$ dos colas	0.136	6.15E-07
Valor crítico de t (dos colas)	2.045	2.060
Valor t de las tablas	2.045	2.060

En contraste, la prueba de F para determinar si existen diferencias estadísticas entre los escurrimientos máximos instantáneos de los periodos de antes 2 y el después, se encontró que el valor de F (5.4) es mayor que el valor crítico de F (2.5), entonces las varianzas son desiguales y se comprobó que existen diferencia significativas entre los escurrimientos máximos de los dos periodos lo cual está asociado con el manejo de la cuenca.

La prueba de t se utilizó para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de los escurrimientos máximos de los dos periodos analizados, encontrando que el estadístico t (6.2) estimado es mayor que el t de las tablas (2.06) lo que indica que si existen diferencias altamente significativas entre las medias de ambas poblaciones analizadas (Cuadro 20), situación que está acorde con lo encontrado con la prueba de F y que confirma que estadísticamente las acciones de conservación realizadas tienen impacto en los servicios hidrológicos de la cuenca ya que reducen los riesgos de las avenidas extraordinarias que podrían causar problemas con inundaciones en las partes bajas de la cuenca.

6.3.3 Producción de sedimentos y degradación específica

Los sedimentos en suspensión reportados por la Gerencia de Aguas del Valle de México (1990), en la estación de aforo de la cuenca del Río Texcoco, se agruparon en dos periodos, el primero sin manejo de 1961 a 1977 y con manejo integral de la cuenca de 1978 a 1990. Con el peso específico de las partículas de 1.2 t m^{-3} se calculó la producción de sedimentos. La degradación específica se calculó dividiendo la producción de sedimentos entre el área de la cuenca (Cuadro 21).

Cuadro 21. Producción anual de sedimentos y degradación específica en la cuenca del Río Texcoco en dos periodos (1960-1977 y 1978-1990).

Antes				Después			
Años	Producción Sedimentos (m ³)	Producción Sedimentos (t)	Degradación Específica (t ha ⁻¹)	Años	Producción Sedimentos (m ³)	Producción Sedimentos (t)	Degradación Específica (t ha ⁻¹)
1960	7,844.9	9,437.1	3.21	1978	4,380.0	5,256.0	1.79
1961	7,961.0	9,553.2	3.25	1979	3,770.0	4,524.0	1.54
1962	11,930.0	14,316.0	4.87	1980	110.0	132.0	0.04
1963	17,641.0	21,169.2	7.20	1981	6,160.0	7,392.0	2.51
1964	5,829.0	6,994.8	2.38	1982	2,170.0	2,604.0	0.89
1965	13,268.0	15,921.6	5.42	1983	600.0	720.0	0.24
1966	9,832.0	11,798.4	4.01	1984	1,090.0	1,308.0	0.44
1967	6,272.0	7,526.4	2.56	1985	210.0	252.0	0.09
1968	14,540.0	17,448.0	5.93	1986	320.0	384.0	0.13
1969	4,190.0	5,028.0	1.71	1987	130.0	156.0	0.05
1970	4,710.0	5,652.0	1.92	1988	60.0	72.0	0.02
1971	3,480.0	4,176.0	1.42	1989	-	-	-
1972	16,460.0	19,752.0	6.72	1990	-	-	-
1973	6,090.0	7,308.0	2.49				
1974	5,290.0	6,348.0	2.16				
1975	3,030.0	3,636.0	1.24				
1976	1,430.0	1,716.0	0.58				
1977	1,410.0	1,692.0	0.58				
n	17			13			
Min	1,410.0	1,692.0	0.58	-	0	0	
Max	17,641.0	21,169.2	7.20	6,160.0	7,392.0	2.51	
Media	7,844.9	9,413.9	3.20	1,461.5	1,753.8	0.60	
Desv. Est.	5,024.6	6,215.1	2.11	2,041.4	2,449.7	0.83	
C. de Var.	64.0	66.0	66.02	139.7	139.7	139.68	

Los estadísticos de la producción de sedimentos de la cuenca del Río Texcoco muestran un rango de variación de 19,477 t con un valor promedio de más de 9 mil toneladas y un coeficiente de variación de más del 66 %, lo cual contrasta con la producción de sedimentos de 7.392 t y con un valor promedio de 1.7 toneladas, pero con un alto coeficiente de variación de los datos de más 130 % que se registró para el segundo periodo. Lo anterior indica una reducción de más cinco veces la producción de sedimentos atribuible a la reducción de los escurrimientos medios y máximos y a los cambios de uso y cobertura vegetal del suelo (Cuadro 21 y Figura 36).

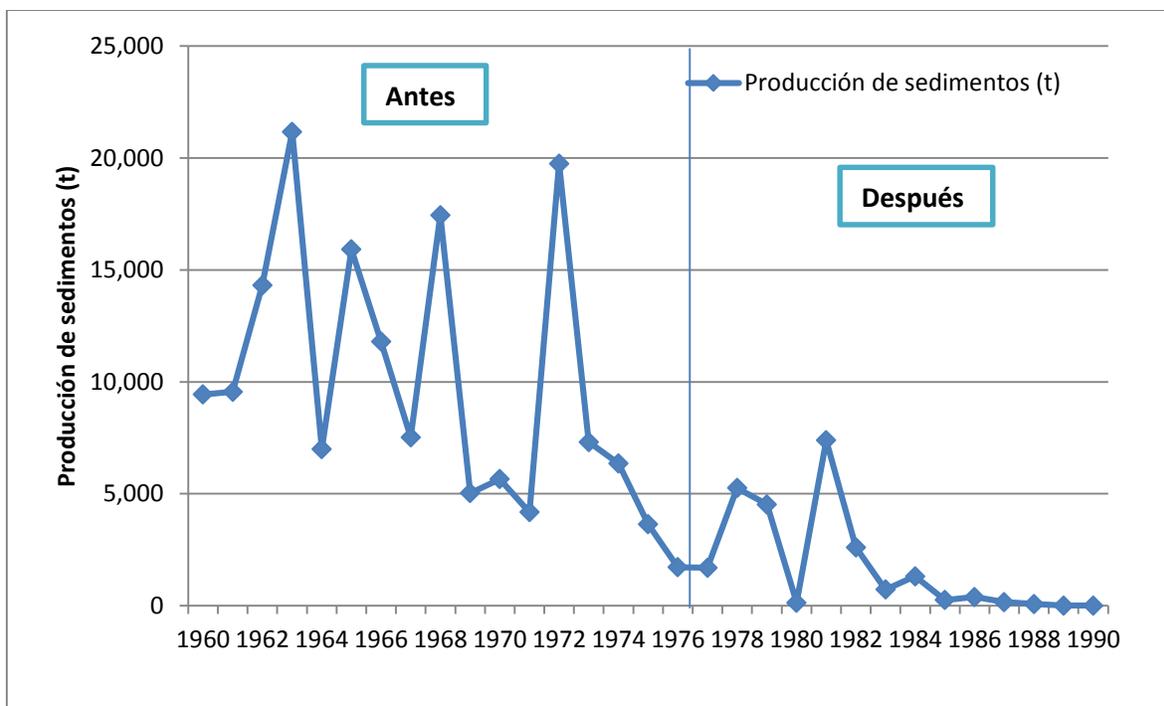


Figura 36 .Producción anual de sedimentos en la cuenca del Río Texcoco, antes y después de las obras de conservación.

La degradación específica de los suelos de la cuenca del Río Texcoco antes de las acciones de conservación varió de 0.58 a 7.2 t ha⁻¹ con un valor medio de 3.2 t ha⁻¹ y un coeficiente de variación del 66 %, lo que contrasta con los valores de degradación específica registrada después de las acciones, que tienen un rango de variación de 0 a 2.51 t ha⁻¹, con un promedio de 0.6 t ha⁻¹ y un coeficiente de variación del 139 %, lo que indica que las tasas de degradación promedio disminuyeron más de cinco veces con fue reportado con la producción de sedimentos de la cuenca del Río Texcoco (Cuadro 21).

Considerando la importancia de la degradación específica reportada para cuenca y su variación en los periodos de antes y después de las acciones, estos valores se compararon con la precipitación media y el escurrimiento medio anual; se encontró que la precipitación y la degradación específica muestran un comportamiento aleatorio en ambos periodos, con la diferencia que la precipitación mantiene sus valores a lo largo de los años, y la degradación específica decrece considerablemente después de las acciones de conservación de suelos (Figura 37).

La relación entre el escurrimiento superficial y la degradación específica anual también muestran un comportamiento aleatorio en el periodo de estudio, sin embargo, se evidencia la reducción de la lámina de escurrimiento superficial en el periodo después de las acciones, comportamiento similar que muestran los valores de la degradación de los suelos (Figura 38). Esto sugiere, que las acciones de conservación al modificar la cobertura vegetal, los usos del suelo y la topografía de las laderas modifican la relación precipitación escurrimientos con un efecto consecuente sobre la

degradación de los suelos lo cual puede ser atribuible a la variación de los parámetros de protección de los suelos por la vegetación y las obras y prácticas de manejo de los suelos.

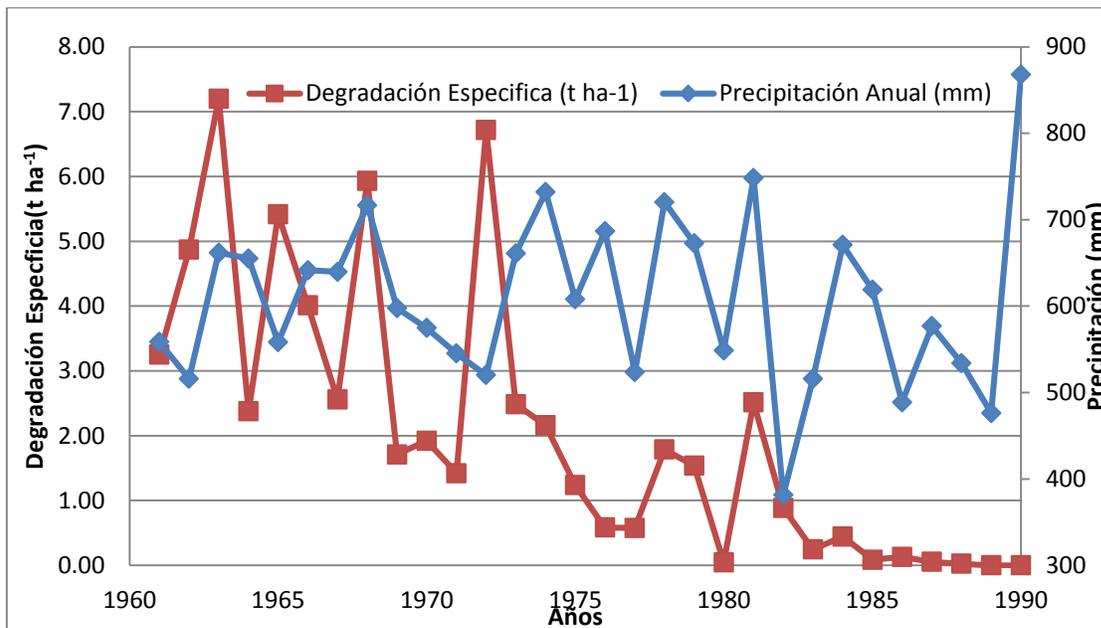


Figura 37. Degradación específica de la cuenca del Río Texcoco, antes y después del manejo integral.

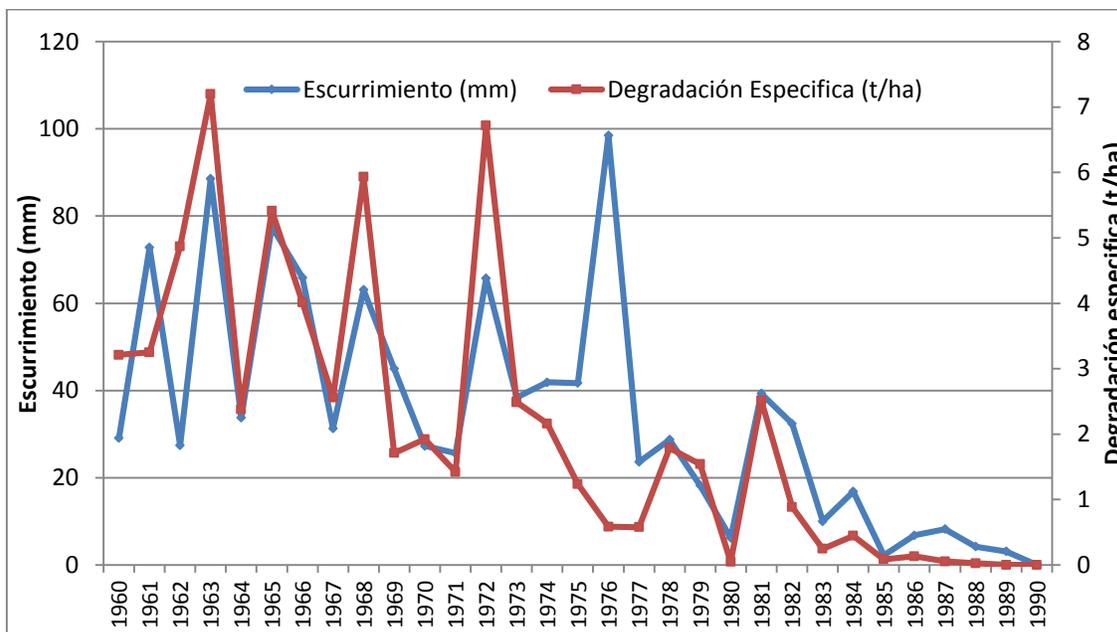


Figura 38. Escurrecimiento y degradación específica para antes y después de las acciones de conservación en la cuenca del Río Texcoco.

Los datos de degradación específica de los suelos observada en los periodos de antes (1960-1977) y después (1978-1990) fueron analizados utilizando una prueba de F para determinar si existen

diferencias estadísticamente entre las dos bases de datos y se encontró que el valor de F (6.06) es mayor que el valor crítico de F para una cola (2.58) y $P(F \leq f)$ (0.0015) de una cola es menor que 0.005, lo que indica que si hay diferencias estadísticamente significativas entre las varianzas y que las medias difieren entre sí, lo que es atribuible a las acciones realizadas. La prueba de t realizada a las dos bases de datos con varianzas desiguales reporto un valor de t de 4.8 que es mayor que el de las tablas por lo tanto existen diferencias significativas entre las medias de la degradación específica de los dos periodos (antes y después) analizados (Cuadro 22).

Cuadro 22. Estadísticos para la comparación de medias de la degradación específica para los periodos de 1960 a 1977 y 1978 a 1990 en la cuenca del Río Texcoco.

Prueba F para varianzas de dos muestras	Degradación Específica (t ha⁻¹)
F	6.0580
P(F<=f) una cola	0.0015
Valor crítico para F (una cola)	2.5828
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales	
Estadístico t	4.8636
P(T<=t) una cola	2.94E-05
Valor crítico de t (una cola)	1.711
P(T<=t) dos colas	5.876E-05
Valor crítico de t (dos colas)	2.0639
Valor t de las tablas	2.0640

Los sedimentos en suspensión que salen de la cuenca, en el periodo sin manejo, variaron de 17,641 m³ (21,169.1 t) a 1,410 m³ (1,692 t), con un promedio de 7,845 m³ (9,414 t), lo que indica que la degradación específica varió de 7.2 t ha⁻¹ año⁻¹ a 0.58 t ha⁻¹ año⁻¹ y con un promedio de 3.2 t ha⁻¹ año⁻¹, valores que concuerdan con los reportados por Martínez y Fernández (1983) para las cuencas del Altiplano Mexicano.

En contraste, para el segundo período con manejo integral, la producción de sedimentos varió de 6,160 m³ (7,392 t) a 0 m³ con un promedio de 1,461 m³ (1,754 t) y la degradación específica fluctuó de 0 a 2.51 t ha⁻¹ año⁻¹ con un promedio de 0.59 t ha⁻¹ año⁻¹.

La producción de sedimentos promedio para antes y después del manejo integral en la cuenca, variaron de 9,436 a 1,754 t, lo cual significa que, en promedio, las obras tuvieron una eficiencia para disminuir la producción de azolves en 7,682 ton anuales. La degradación específica de la cuenca del Río Texcoco fue de 3.2 t ha⁻¹ en el primer período y de 0.6 t ha⁻¹ en el segundo, lo que indica que las obras y prácticas de conservación de suelo y agua reducen en 2.6 t ha⁻¹ año⁻¹ en promedio la degradación de los suelos de la cuenca, valor comparable a la degradación media de los suelos de México que es de 2.67 t ha⁻¹ año⁻¹.

La cuenca del Río Texcoco aportó 182,835 ton de sedimentos al Ex Lago de Texcoco, lo que se traduce en una degradación de 62 t ha^{-1} (6.2 mm) en el período en estudio (1961-1990). Con la rehabilitación de los suelos erosionados en un 13.5% del área total de la cuenca y con las obras y prácticas de conservación, se logró reducir a un mínimo la erosión de los suelos y las partículas removidas se depositan en diferentes zonas de la cuenca. Además no existe aporte de azolves del área de drenaje del Río Texcoco, lo que confirma la bondad de las obras realizadas por la Comisión del Lago de Texcoco.

6.4 Calibración del modelo WATEM/SEDEM

Para la calibración del modelo se utilizaron los parámetros ponderados descritos en la metodología (K, C y P) para los tres periodos de análisis, el modelo de elevación digital y los valores de R anuales para estimar la producción de sedimentos con el modelo WATEM/SEDEM. Los valores estimados de sedimentos anuales fueron comparados con los sedimentos medidos y con la modificación del valor del KTC se simuló la producción de sedimentos hasta obtener el menor error en la predicción.

6.4.1 Valor de R anual para las tres etapas

Para calibrar el modelo con los valores de precipitación anual se estimaron los valores de erosividad de la lluvia (R) del periodo de 1960 hasta 2010. Los valores de R se ingresaron al modelo WATEM/SEDEM y realizaron estimaciones de sedimentos para las tres etapas de análisis previamente definidas (Cuadro 23).

Cuadro 23. Valores de R para las tres etapas (1960-1977), (1978-1990) y (1991-2010) en la cuenca del Río Texcoco

1960-1977			1978-1990			1991-2010		
Año	Precipitación anual (mm)	R	Año	Precipitación anual (mm)	R	Año	Precipitación anual (mm)	R
1960	568.1	2189.68	1978	720.4	3135.47	1991	659.7	2740.34
1961	558.5	2135.14	1979	672.8	2823.58	1992	774.0	3504.42
1962	515.9	1900.42	1980	548.8	2080.65	1993	541.3	2038.94
1963	661.7	2752.98	1981	748.2	3324.49	1994	627.0	2537.46
1964	655.1	2711.38	1982	381.4	1237.22	1995	561.6	2152.69
1965	558.1	2132.88	1983	515.7	1899.34	1996	524.2	1945.22
1966	641.5	2626.56	1984	670.8	2810.80	1997	529.0	1971.33
1967	639.6	2614.81	1985	619.1	2489.50	1998	661.7	2752.98
1968	716.6	3110.03	1986	488.6	1756.23	1999	530.1	1977.34
1969	597.7	2361.62	1987	576.9	2240.20	2000	628.5	2546.62
1970	574.7	2227.52	1988	533.9	1998.15	2001	511.7	1877.92
1971	545.3	2061.14	1989	476.2	1692.35	2002	588.6	2308.15
1972	520.1	1923.03	1990	868.0	4196.83	2003	617.0	2476.82
1973	660.8	2747.29				2004	711.0	3072.71
1974	732.1	3214.41				2005	493.5	1781.75
1975	607.9	2422.20				2006	512.8	1883.80
1976	686.8	2913.77				2007	817.5	3817.66
1977	523.6	1941.97				2008	430.3	1464.65
						2009	655.0	2710.75
						2010	283.4	828.50

Los valores de R en el periodo de estudio variaron de 4,196 a 828 Mj ha⁻¹ mm h⁻¹ con un comportamiento aleatorio similar a los datos de precipitación, por lo que se infiere que este parámetro no tiene diferencias estadísticas en los diferentes periodos como fue reportado para la precipitación analizada previamente (Figura 39).

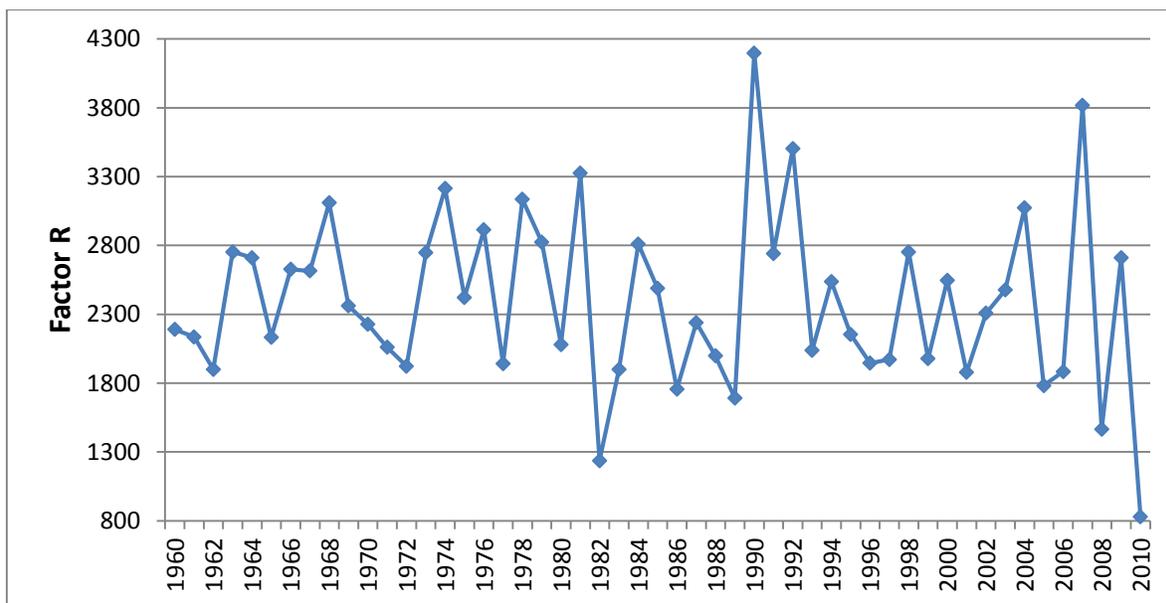


Figura 39. Valores de R en el periodo de estudio (1960-2010) para la cuenca del Río Texcoco

6.4.2 Estimación del factor K ponderado para la zona de estudio.

Los tipos de suelos reportados para la cuenca con su información de textura permitieron asignar los valores de K para cada polígono y con el software ArcGIS 10 se clasificaron las capas por valor y se calcularon las superficies de acuerdo al valor de K de cada capa (Figura 40).

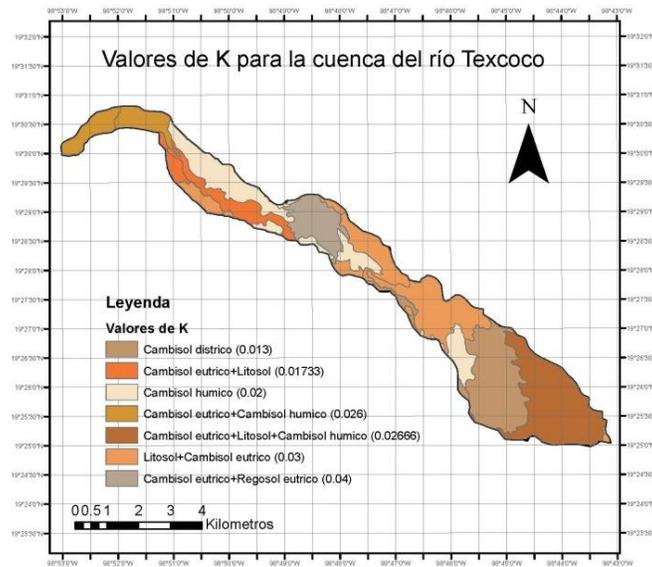


Figura 40. Valores del factor K para la cuenca del Río Texcoco.

El factor K ponderada se estimó multiplicando las áreas obtenidas por su respectivo K para obtener un total de K, dicho valor fue dividido por la superficie total de la zona de estudio, obteniendo así el K ponderado de la cuenca estudiada y el factor K ponderado fue utilizado para ser ingresado en el modelo para las tres etapas analizadas (Cuadro 24).

Cuadro 24. Superficies de los distintos valores de K y el K ponderado para la cuenca del Río Texcoco.

Clave	Descripción	Factor K	Area (ha)	K x Area
Bd/3	Cambisol districo / Textura fina	0.01	39.54	0.51
Be+Bh/2	Cambisol eutrico + Cambisol humico / Textura gruesa	0.03	157.33	4.72
Be+Bh/2	Cambisol eutrico + Cambisol humico / Textura media	0.03	115.21	3.00
Be+Hh/2	Litosol + Cambisol eutrico / Textura media	0.03	14.25	0.43
Be+I+Bh/2	Cambisol eutrico + Litosol + Cambisol humico / Textura media	0.03	579.42	15.45
Be+I+Hh/1	Cambisol eutrico + Litosol / Textura fina	0.02	233.04	4.04
Be+Re/2	Cambisol eutrico + Regosol eutrico / Textura media	0.04	220.36	8.81
Bh/2	Cambisol humico / Textura media	0.02	5.31	0.11
Bh+Be/2	Litosol + Cambisol eutrico / Textura media	0.03	340.72	10.22
Bh+Tm/1	Cambisol humico + Andosol molico / Textura gruesa	0.01	496.77	6.46
Hh/2	Feozem haplico / Textura media	0.02	406.09	8.12
Hh+Be/2	Feozem haplico + Cambisol eutrico / Textura media	0.03	58.04	1.74
Hh+I/2	Feozem haplico + Litosol / Textura media	0.02	2.95	0.06
Hh+I72	Feozem haplico / Textura media	0.02	4.23	0.08
I+Be/2	Litosol + Cambisol eutrico / Textura media	0.03	58.21	1.75
Tm+Hh/2	Andosol molico + Feozem haplico / Textura media	0.02	95.09	1.90
Vp/3	Cambisol eutrico + Cambisol humico / Textura media	0.03	113.64	2.95
Total			2940.20	70.35
K ponderada			0.02	

Es importante señalar que es posible que el factor K cambie en el tiempo, pero en este trabajo solo se revisó la información para identificar los tipos de suelos, pero no fue posible asociarlos con el tamaño de partículas, contenidos de materia orgánica, tipo y tamaño de la estructura y permeabilidad de los suelos que permitiera estimar el factor K en las diferentes épocas, por lo que se optó por considerar el factor K reportado para cada grupo de suelos y se asumió constante en el tiempo de predicción del modelo WATEM/SEDEM.

6.4.3 Factor C utilizado para la calibración modelo.

El factor C se asoció a las distintas coberturas presentes en los diferentes periodos en la zona estudiada y los valores de C se obtuvieron de la bibliografía reportada (Handbook No. 537 publicado por USDA (1978). Los usos de suelos identificados en cada etapa fueron agrupados en zonas forestales (bosque de pino, oyamel y encino), pastizales y agrícola (reforestación, agricultura, erosión y zonas urbanas) (Cuadro 25).

Cuadro 25. Valores de C para los distintos usos de suelo y vegetación, para los periodo bajo análisis en la cuenca del Río Texcoco.

Uso de suelo y vegetación	1974		1989		2010	
	Superficie (ha)	Valores de C	Superficie (ha)	Valores de C	Superficie (ha)	Valores de C
Bosque de pino	538.3	0.010	538.3	0.020	490.3	0.030
Bosque de oyamel	823.5	0.001	823.5	0.003	793.1	0.004
Bosque de encino	359.8	0.005	359.8	0.009	335.6	0.010
Pastizal natural	86.4	0.150	83.1	0.038	48.4	0.012
Reforestación	3.6	0.300	50.1	0.010	17.9	0.001
Agricultura	705.4	0.800	947.7	0.600	941.6	0.500
Erosión	396.4	0.900	26.0	0.600	-	0.900
Zona urbana	26.8	0.700	99.4	0.600	300.9	0.500
Otros	-	0.900	12.3	0.900	12.3	0.900
Total	2,940.2		2,940.2		2,940.2	

Los usos de suelo y vegetación que utiliza el modelo WATEM/SEDEM son Bosque, Pastizal y Agrícola, por esta razón, considerando el uso del suelo y vegetación, el factor C asignado el área de cada uso el valor de C se pondero para obtener los factores de C para cada uso del suelo (bosque, pastizal y agrícola) y periodo de análisis (Cuadro 26).

Cuadro 26. Facto C para el bosque, pastizal y agrícola para tres épocas analizadas en la cuenca del Río Texcoco.

Uso del suelo	1960-1977	1978-1990	1991-2010
Bosque	0.005	0.010	0.013
Pastizal	0.150	0.038	0.012
Agrícola	0.831	0.577	0.497

6.4.4 Factor P de prácticas de conservación para calibrar el modelo.

El factor P fue obtenido mediante el mapa de coberturas donde se ubican actualmente las terrazas construidas en la segunda etapa del estudio y mediante una imagen de satélite de Google Earth se delimitaron los polígonos con terrazas y presas (Figura 41).



Figura 41. Ubicación de las terrazas existentes a los largo del Río Texcoco.

Para la primera etapa el factor P se consideró como 1 para toda la cuenca al no existir acciones de conservación. En la segunda y tercera etapa, a las zonas identificadas con terrazas y presas de se les asignó un factor P de acuerdo con la bibliografía existente. Los valores del factor P para cada práctica de conservación identificada en la actualidad considero la pendiente y tipo de obra (Cuadro 27).

Cuadro 27. Valores de P para las etapas de análisis en la cuenca del Río Texcoco.

Años	Presas	Terrazas
1960-1977	1	1
1978-1990	0.50	0.3000
1991-2010	0.50	0.3000

6.4.5 Calibración del modelo WATEM/SEDEM

Con la información de los parámetros R, K, C, P y LS para las dos etapas de 1960-1977 y de 1978-1990 se corrió el modelo WATEM/SEDEM y utilizando valores de KTC máximos y mínimos propuestos por los autores se obtuvo la producción de sedimentos estimada (PSE) y se comparó con la producción de sedimentos medida (PSM), encontrando una baja eficiencia en la predicción.

Por esta razón para utilizar el modelo WATEM/SEDEM se realizó un proceso de calibración interactivo para optimizar los valores de KTC arable y los valores del factor para zonas de bosques, pastizales y agrícolas para antes y después de los trabajos de conservación y con los valores óptimos de estos parámetros realizar la predicción de la producción de sedimentos. Con los parámetros óptimos de la segunda etapa se realizó la predicción de sedimentos para el periodo de 2000 a 2010.

6.4.5.1 Proceso iterativo de calibración del modelo WATEM/SEDEM

Los valores de KTC son importantes ya que se refieren a la longitud de la pendiente necesaria para producir una cantidad de sedimento igual al sedimento que se produciría en un suelo desnudo con idéntica pendiente. Además, este factor depende de la escala (tamaño de pixel) por lo que se necesita ser calibrado para cada aplicación del modelo. Así mismo, existe una diferencia significativa entre el suelo arable (altamente susceptible a la erosión) y el suelo resistente a la erosión que están cubiertos por pastizales y bosques (Van Rompaey et al, 2001), razón por la cual para correr el modelo y analizar la relación entre los PSE y PSM se realizó un proceso iterativo modificando primero los valores de KTC y después el resto de los parámetros hasta encontrar la máxima eficiencia del modelo predictivo con los valores del índice de eficiencia (ME) y la raíz del error cuadrático medio (RRMSE).

Para la calibración del modelo WATEM/SEDEM se variaron los valores de KTC para estimar la producción de sedimentos y compararlos con los registros de sedimentos medidos a la salida del

Río Texcoco para que con un solo conjunto de parámetros optimicen la función del error. Los valores de KTC máximo y mínimo donde el promedio de los dos fue el valor graficado. El rango de valores de KTC se eligió considerando información de trabajos previos donde las condiciones del tamaño de pixel fueron similares a la de nuestro estudio (Haregeweyn, 2011) de un tamaño de pixel que no excedía de 20 x 20 m.

Con las combinaciones de KTC y los parámetros se obtienen la PSE al compararlos con la PSM se obtiene los valores de ME Y RRMSE que al graficarlos se encuentran los máximos y los mínimos, del tal forma que la mejor combinación de parámetros es con se obtiene un valor mínimo de RRMSE y un valor máximo de ME en las gráficas. De esta forma, al obtener un valor de ME lo más cercano a 1 es que se tiene una mayor eficiencia por parte del modelo en la comparación de los valores observados y predichos, y cuando el valor de RRMSE se aproxima a cero significa que el modelo tiene una excelente predicción de la producción de sedimentos.

Con valores máximos de ME y mínimos de RRMSE se obtuvo el valor de KTC óptimo para cada periodo y después para cada año y para los dos periodos se corrió el modelo con los valores de R anuales y los valores de los parámetros de C y P propuestos de acuerdo a la bibliografía como constantes para cada período.

Para obtener los valores óptimos de KTC, para la primera etapa, donde no se tenían obras de conservación, al correr el modelo se obtuvo un valor óptimo de KTC = 0.0085 m, teniendo como KTC max = 0.0086 y el KTC min = 0.0084 y los valores óptimos de ME y RRMSE fueron de 0.33 y 0.917 respectivamente. En el segundo periodo con las acciones de conservación de suelos, se seleccionaron los parámetros y los valores R anuales y al correr el modelo se obtuvo un valor de KTC óptimo igual a 0.007 m, con valores de KTC max = 0.0069 y un KTC min = 0.0071 y al correr el modelo se encontraron valores de ME y RRMSE de 0.55 y de 0.695 respectivamente, lo que indica que la predicción en la segunda etapa fue mejor que en la primera (Figura 42 y 43).

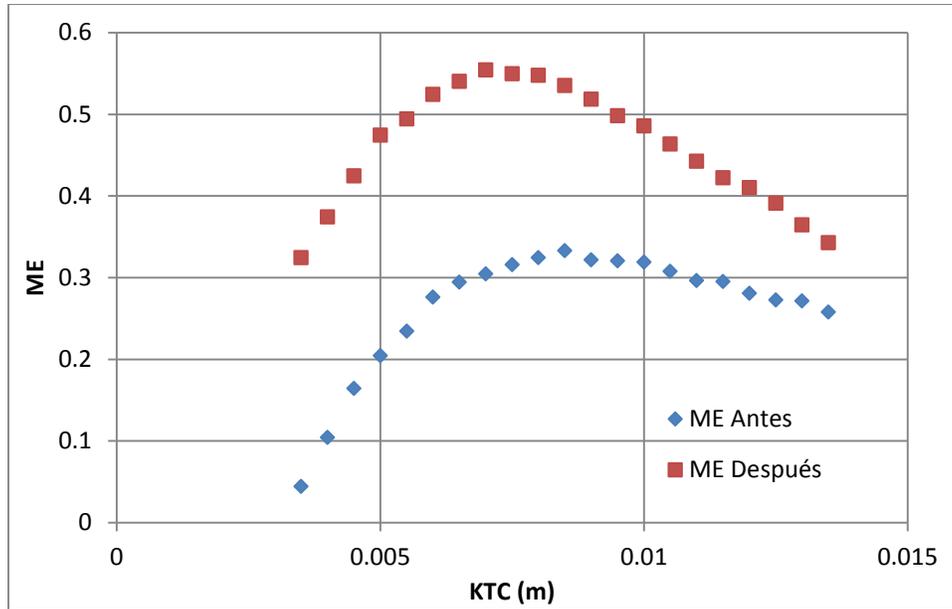


Figura 42. Curva de calibración de KTC para WATEM/SEDEM con los valores de ME.

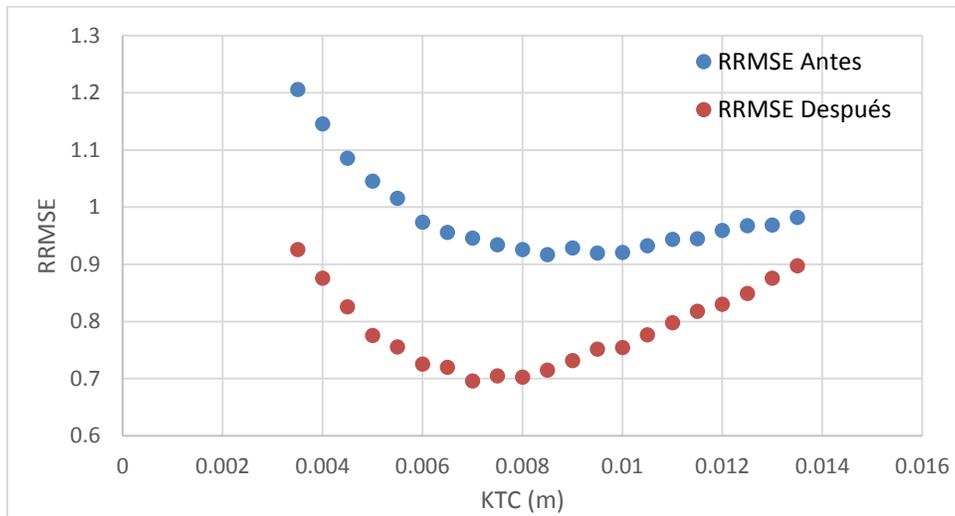


Figura 43. Valores de RRMSE para los distintos valores de KTC (m).

Con el valor de KTC óptimo encontrado, se procedió con la segunda etapa de la calibración la cual consistió en ajustar los parámetros que variaron en los periodos de análisis con la finalidad de mejorar el ajuste entre los valores observados de 50 años y los valores estimados con el modelo WATEM/SEDEM. En esta etapa se procedió a obtener los valores óptimos de parámetros C para los tres tipos de coberturas solicitadas por el modelo (bosque, pastizal y agrícola). Para ello, se procedió a obtener el factor C óptimo para la zona forestal y se fijaron como constantes los factores de C para las zonas de pastizales y agrícolas.

El modelo WATEM/SEDEM con los valores de KTC óptimo y los parámetros fijos, se variaron los valores de C de bosque de 0.001 a 0.012 en la primera etapa, encontrando que el factor C de

bosque fue de 0.0045 ya que se tuvo un valor máximo de ME = 0.38 y un valor mínimo de RRMSE = 0.8668 para la etapa de 1960-1977. Para la segunda etapa, los valores del factor C para bosque variaron de 0.0045 a 0.016 y se encontró un valor del factor C = 0.0095 para bosque ya que el valor máximo de ME fue de 0.60 y el mínimo de RRMSE fue de 0.6454 para la etapa con obras de conservación de 1978 a 1990 (Figuras 44 y 45).

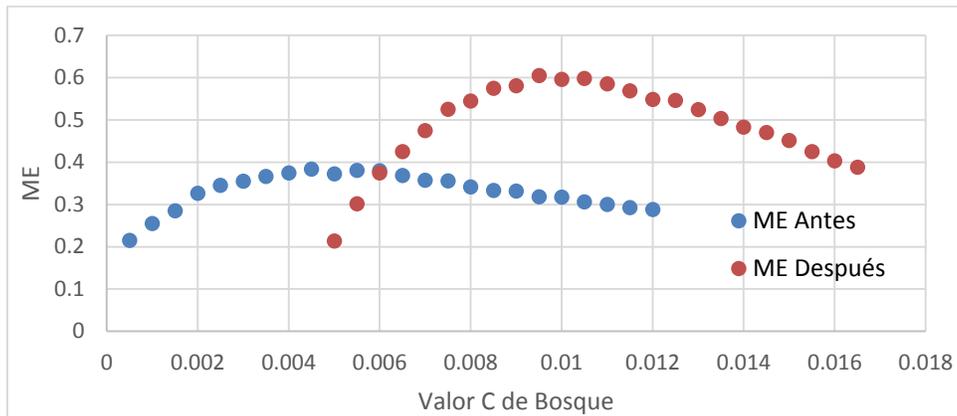


Figura 44. Valores de ME para los distintos valores de C para Bosque

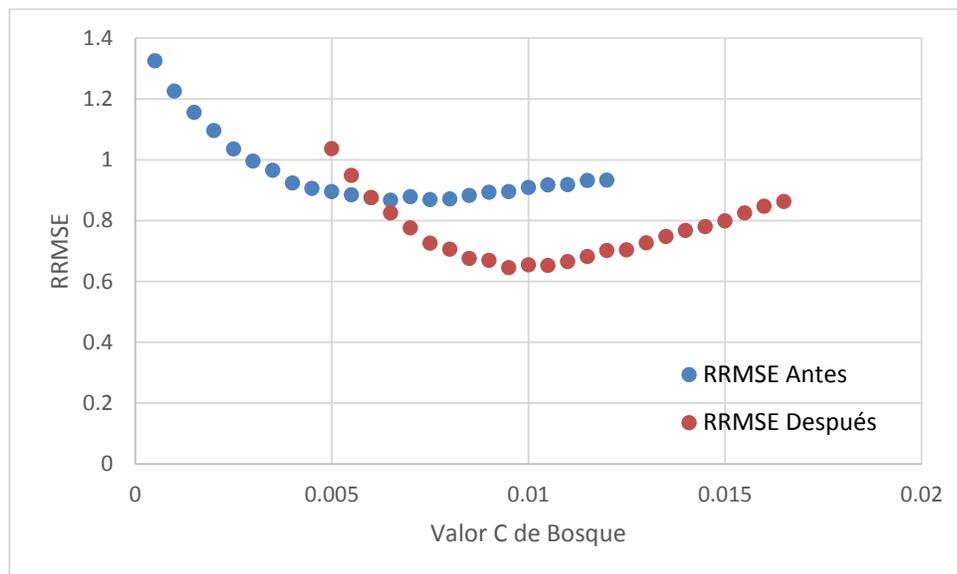


Figura 45. Valores de RRMSE para los distintos valores de C de Bosque.

Para optimizar el factor C para las zonas de pastizal con los valores de KTC y el factor de C para bosque óptimos, se corrió el modelo WATEM/SEDEM variando los valores del factor C para pastizales de 0.08 a 0.21 y se encontró un valor óptimo del factor C de 0.13 que optimiza en un máximo el coeficiente de eficiencia del modelo con un ME de 0.44 y minimiza las diferencias entre los valores de producción de sedimentos medidos (PSM) y la producción de sedimentos estimados (PSE) con RRMSE de 0.67 para antes de las obras de conservación (1960 a 1997). Para después de

las obras (1998 – 1990) se corrió el modelo se encontró que el factor C que optimizaba los errores en la predicción para pastizal fue de 0.135 con un valor del coeficiente de eficiencia ME de 0.66 y un RRMSE de 0.5954 (Figuras 46 y 47).

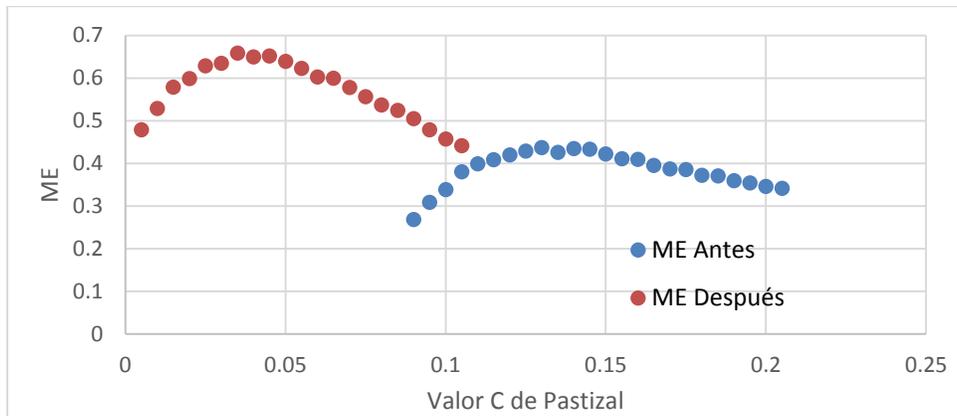


Figura 46. Valores de ME para los distintos valores de C para Pastizal

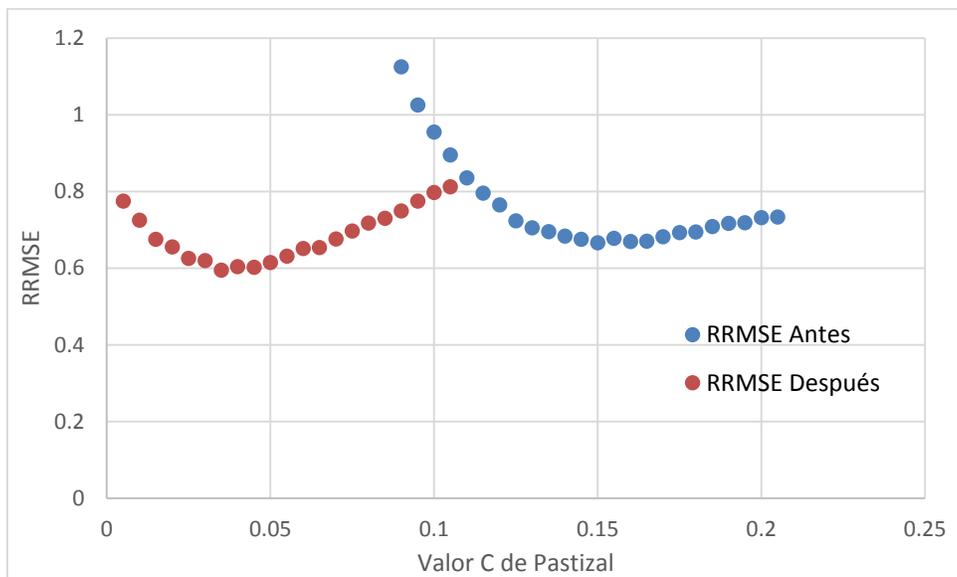


Figura 47. Valores de RRMSE para los distintos valores de C de Pastizal.

Con los valores de KTC y los factores de C para las zonas de bosque y pastizales óptimos, se corrió el modelo WATEM/SEDEM para optimizar el factor C de las zonas agrícolas, así que utilizando valores de C que variaron de 0.6 a 0.85 se encontró un valor del factor C para las zonas agrícolas de 0.8 con un coeficiente de eficiencia ME de 0.47 y un RRMSE = 0.49 para la primera etapa. Para segunda etapa se obtuvo un factor de C óptimo para zonas agrícolas de 0.55 con un valor de ME de 0.69 y un RRMSE de 0.53 (Figuras 48 y 49).

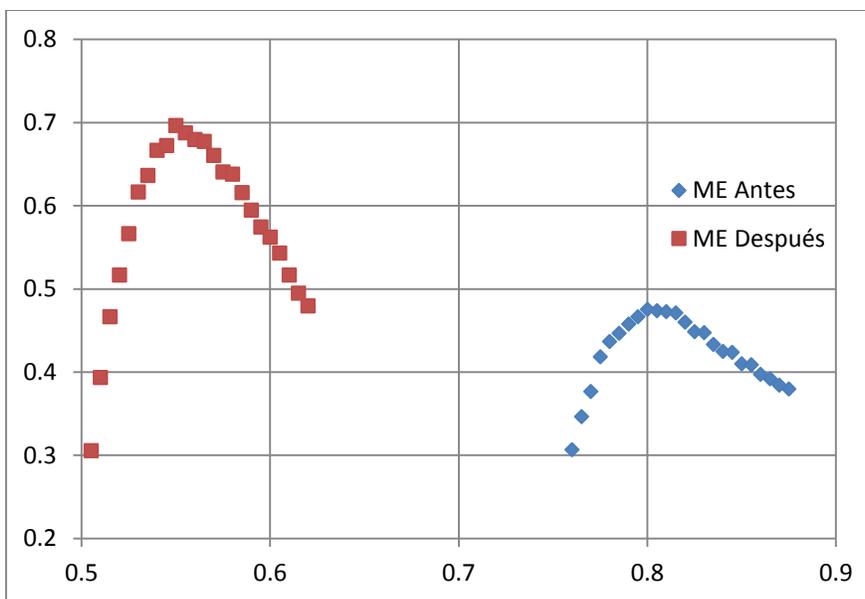


Figura 48. Valores de ME para los distintos valores del factor C agrícola.

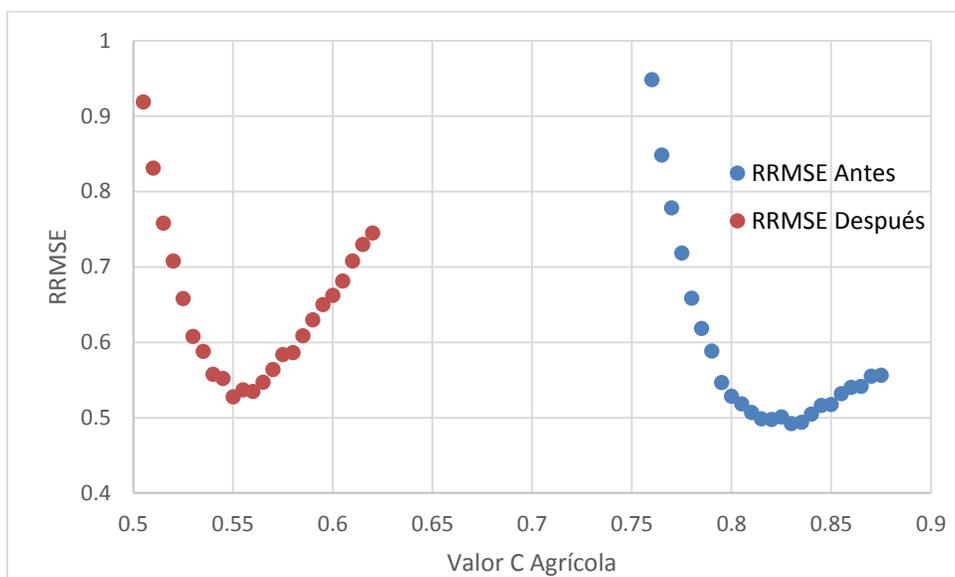


Figura 49. Valores de RRMSE para los distintos valores del factor C agrícola.

El proceso de calibración interactivo permitió obtener el factor óptimos para las zonas de bosque, pastizal y agrícola para las dos periodos de análisis, mismos que sirvieron correr nuevamente el modelo y optimizar los valores de KTC para ambas etapas. Para la primera etapa el KTC óptimo fue de 0.0085 para la etapa sin obras y 0.007 para la etapa con obras. Con esta calibración se obtuvo un valor de ME de 0.47 y de 0.69 para las etapas sin y con manejo (1960-1977 y 1978-1990) respectivamente (Cuadro 28 y Figuras 50 y 51).

Cuadro 28. Indicadores de desempeño obtenidos en el proceso de calibración de WATEM/SEDEM.

Periodo evaluado	Antes	Después
	1960-1977	1978-1990
C de Bosque	0.0045	0.0095
C de Pastizal	0.135	0.035
C Agrícola	0.8	0.55
KTC	0.0085	0.007
ME	0.48	0.70
RRMSE (%)	49.24	52.78

El modelo WATEM/SEDEM tiene una precisión razonable considerando las deficiencias de información, sobre todo se aprecia que en la primera etapa de estudio de 1960 a 1977 no se cuenta con datos confiable, razón por la cual el coeficiente de eficiente es bajo de 0.48, sin embargo para la segunda etapa la eficiencia del modelo mejor con un valor de ME de 0.7 que es muy similar a los valores reportados para la franja de loess en el centro de Bélgica (ME = 0.77, Van Rompaey *et al.*, 2001.), los canales de los ríos de la cuenca Murrumbidgee en Australia (ME = 0.89, Verstraeten *et al.*, 2007.), el impacto del cambio de uso del suelo y las presas en España (ME de 0.84, Boix-Fayos *et al.*, 2008) y para el modelado a escala regional de la descarga de sedimentos en España (ME = 0.42 y -0.82, de Vente *et al.*, 2008;. ME = 0.97, Alatorre *et al.*, 2010).

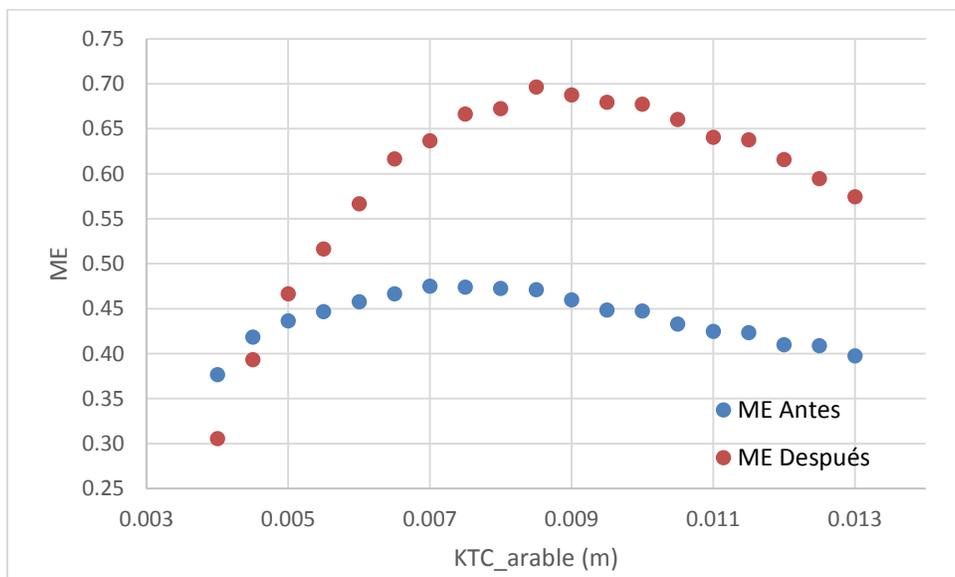


Figura 50. Valores de ME para los distintos valores de KTC y C óptimos de coberturas.

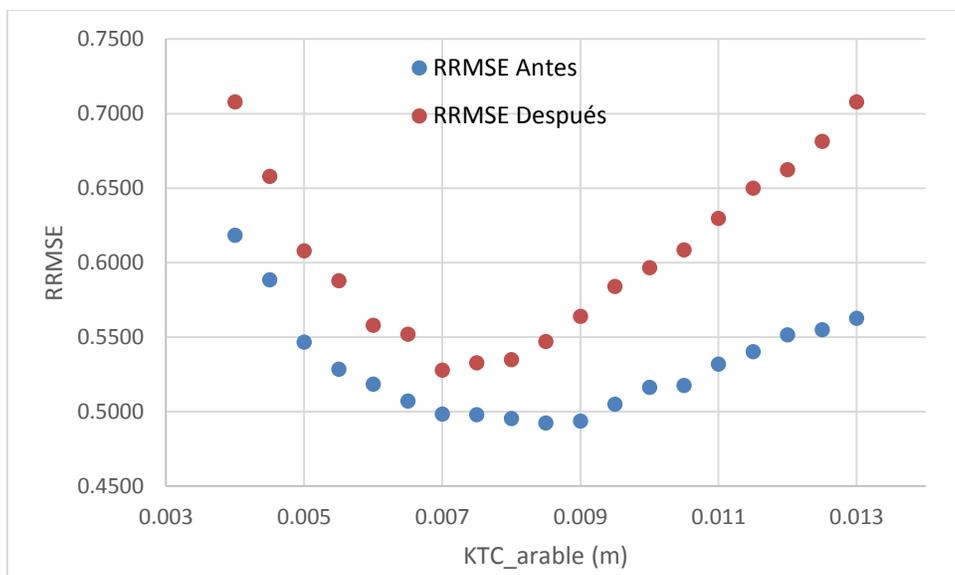


Figura 51. Valores de RRMSE para los distintos valores de KTC y C óptimos de coberturas.

Las predicciones de la producción de sedimentos en la primera etapa tuvieron un coeficiente de eficiencia bajo como se señaló previamente, estos son ligeramente mejores que los reportados para las cuencas italianas ubicadas en diferentes ecosistemas (ME = -0.33, Van Rompaey *et al.*, 2005) y para las cuencas montañosas de la meseta de Loess Chino (ME = -0.32, Feng *et al.*, 2010).

Es importante señalar que el modelo WATEM/SEDEM a pesar de ser paramétricos, tiene un algoritmo asociado con la pendiente como es el factor KTC que permite estimar con eficiencia la producción de sedimentos que se tuvo mayor precisión en el segundo periodo en comparación con el primero.

6.4.5.2 Predicción de la producción de sedimentos utilizando el modelo WATEM/SEDEM

Para las etapas de antes y después de las acciones de conservación de suelos en la cuenca del Río Texcoco se corrió el modelo WATEM/SEDEM como los parámetros previamente calibrados para cada una de ellas y se obtuvo la producción de sedimentos estimados (PSE) mismos que se compararon gráficamente con la producción de sedimentos medidos (PSM) y se encontró que en la primera etapa existen mayor dispersión entre los valores de PSE y PSM mientras que para el segundo periodo las diferencias entre los valores de PSE Y PSM se reducen como se había señalado ya que el coeficiente de eficiencia del modelo WATEM/SEDEM es mayor para el segundo periodo en comparación con el primero (Figura 52).

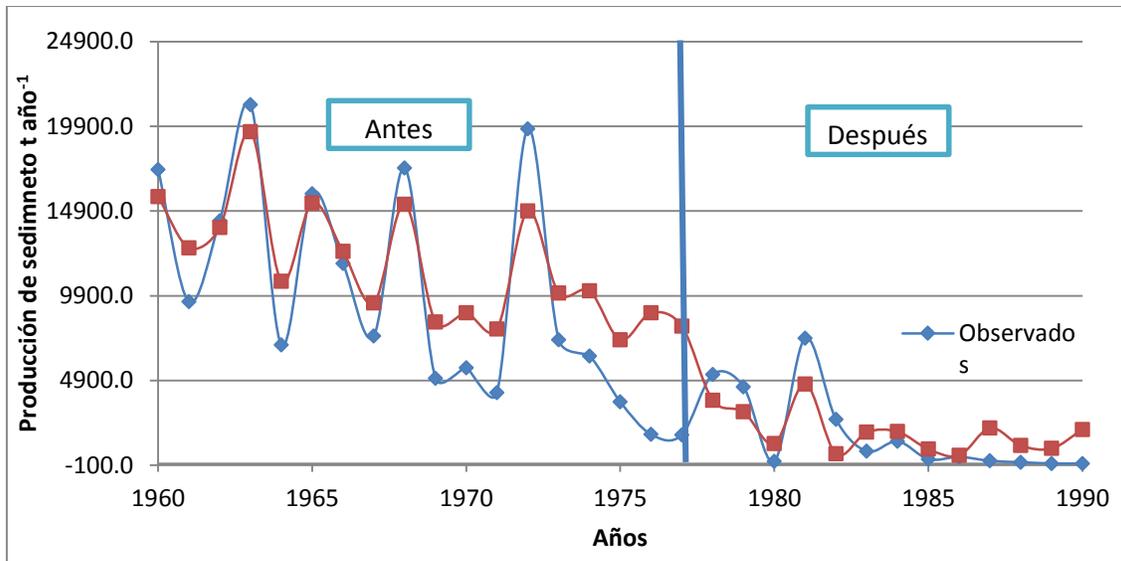


Figura 52. Producción de sedimento ($t \text{ año}^{-1}$) observada y estimada para la cuenca del Río Texcoco

Es importante destacar que la producción de sedimentos observado y estimado en la cuenca tiene un comportamiento aleatorio y una tendencia a reducirse en el tiempo en ambas etapas, lo que sugiere que con el manejo de los suelos en el tiempo se ha reducido la producción de sedimentos que produce esta cuenca. Sin embargo, si comparamos la relación entre precipitación y la producción de sedimentos estimada, se observa que mientras la precipitación tiene un comportamiento aleatorio en ambos periodos, la producción de sedimentos anuales en el segundo periodo se reducen a pesar de tener precipitaciones similares, lo que indica que las prácticas de manejo han impactado en la reducción de la producción de sedimentos de la cuenca como se ha señalado previamente (Figura 53).

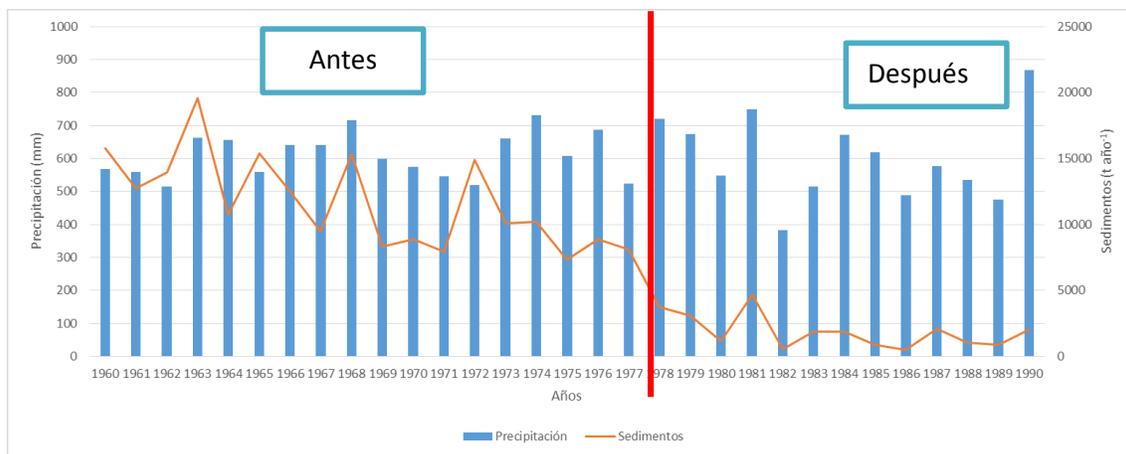


Figura 53. Relación entre precipitación y producción de sedimentos en el período de 1960-2010 en la cuenca del Río Texcoco.

El modelo WATEM/SEDEM con los parámetros de los periodos se corrió para obtener la producción de sedimentos estimados y se compararon con la producción de sedimentos medidos encontrando que existe una sobreestimación de la producción de sedimentos, como se explica con los coeficientes de eficiencia (ME) que sus valores varían de 0.48 a 0.70 para ambos periodos que se identifica con una eficiencia del modelo para predecir la producción de sedimentos (Figura 54). Esto indica que el desempeño del modelo es bueno por lo que demuestra que el modelo al ser calibrado adecuadamente puede proporcionar valores aceptables.

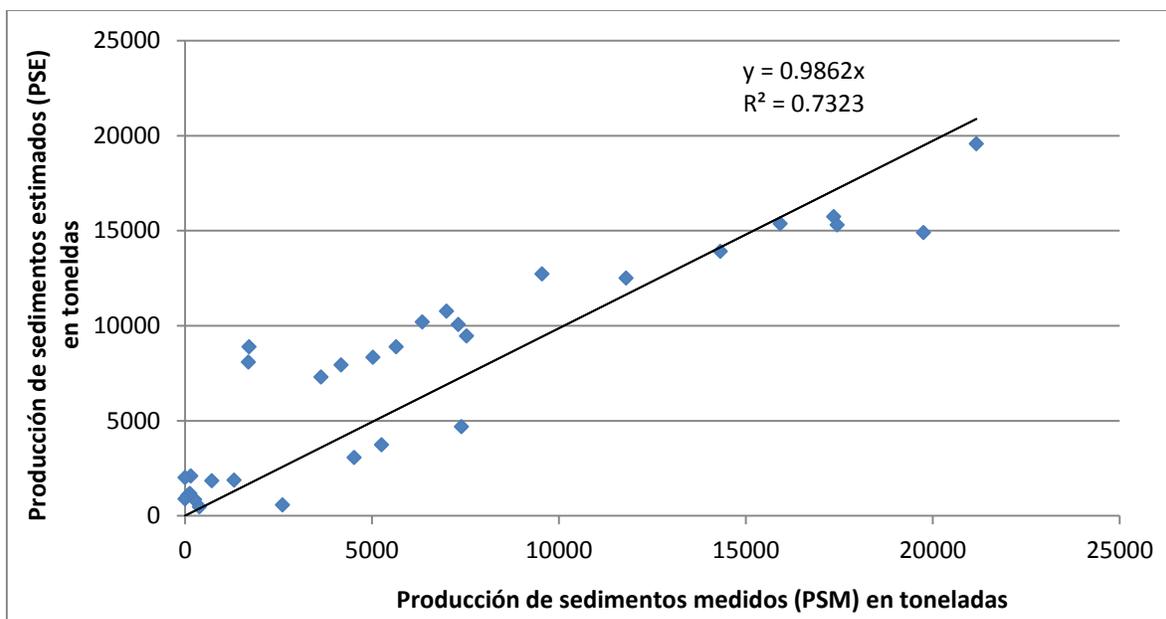


Figura 54. Desempeño de WATEM/SEDEM con valores observados.

La degradación específica estimadas de los suelos a partir de la producción de sedimentos² de la cuenca del Río Texcoco para el periodo de 1960 a 1990 muestra una tendencia a disminuir en el tiempo y reporta valores mayores de 7 t ha^{-1} antes de las acciones de conservación y con una degradación media de 3.27 t ha^{-1} en el periodo antes de las obras y de 0.5 t ha^{-1} después de las acciones de conservación y manejo de los suelos en la cuenca (Figura 55).

² Degradación específica es igual a la producción de sedimentos anuales en toneladas entre el área de la cuenca en hectáreas

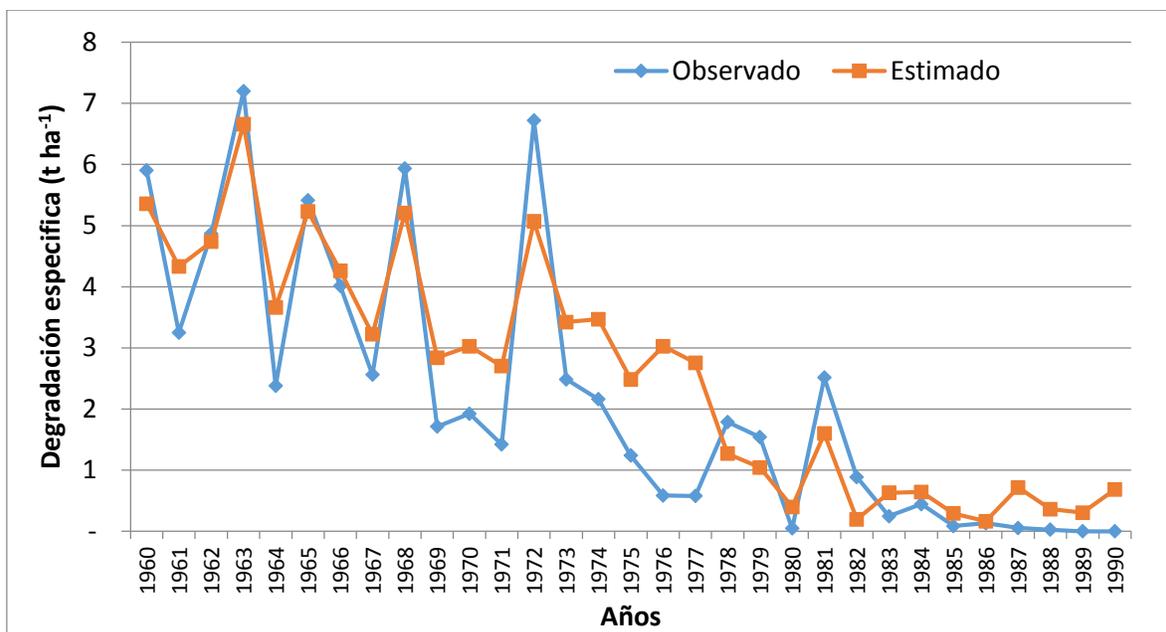


Figura 55. Degradación específica estimadas y observada de la cuenca del Río Texcoco.

6.4.5.3 Predicción de la producción de sedimentos en la cuenca

El modelo WATEM/SEDEM se corrió con los parámetros óptimos obtenidos de la segunda etapa y con los datos de erosividad anual (R) del periodo de 1990 al 2000 para estimar la producción de sedimentos para ese periodo. En la Figura 56 se muestra la variación de la producción de sedimentos del periodo de antes y después de las acciones de manejo y conservación, así como la predicción de sedimentos después del año 1990.

Los resultados obtenidos de la calibración del modelo WATEM/SEDEM muestran un gran potencial para estimar la producción de sedimentos y la degradación específica de cuencas en cuencas no aforada, ya que a partir de ecuaciones paramétricas como es la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (EUPS) y adecuaciones al modelo digital de elevaciones se pueden realizar estas estimaciones, sin tomar en cuenta los escurrimientos superficiales que reporta Williams (1975) con el modelo MUSLE que es la EUPS modificada.

Existen gran cantidad de modelos empíricos para estimar la producción de sedimentos, sin embargo el modelo WATEM/SEDEM oferta una tecnología que puede utilizarse para estimar en forma aproximada la producción de sedimentos y la degradación específica de una cuenca.

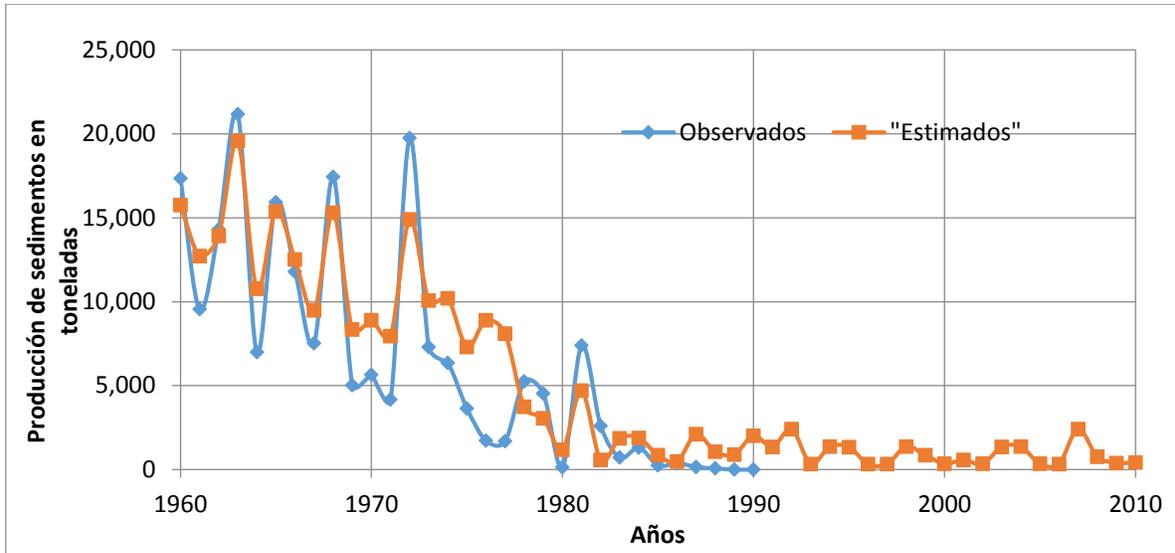


Figura 56. Variación de la producción de sedimentos del periodo de antes y después de las acciones de manejo y conservación en la cuenca del Río Texcoco

El uso del modelo WATEM/SEDEM puede ser estimador de la degradación de los suelos y asociarlo con las estimaciones de erosión de los suelos que se han realizado utilizando la EUPS en las diferentes regiones del país.

7 Conclusiones

Este trabajo de investigación permitió obtener los indicadores de desempeño que tienen las obras y prácticas de recuperación para reducir la producción de sedimentos y la degradación específica de la cuenca del río Texcoco.

La evolución del uso de los suelos en las cuencas son una respuesta de las actividades antropogénicas y de las acciones de conservación de los suelos que se han realizado, demostrando que existen diferencias estadísticamente significativas en la reducción de los escurrimientos medios anuales, los escurrimientos máximos instantáneos, los coeficientes de escurrimientos, la producción de sedimentos y la degradación específica de los suelos para los periodos de antes y después de las acciones de manejo y conservación de los suelos y que la precipitación media de cada periodo no tuvo diferencias estadísticamente significativas.

El uso de imágenes de satélite de diferentes épocas permitió estimar índices de vegetación como el NVDI (Normalized Difference Vegetation Index por sus siglas en Inglés) para los polígonos de uso del suelo de antes y después de las obras encontrando que existen diferencias significativas en los valores del NVDI obtenidos, mismos que variaron de acuerdo con las épocas de lluvia y de secas.

Con la información disponible fue posible obtener los parámetros que requiere el modelo WATEM/SEDEM para antes y después de las acciones de conservación para estimar la producción de sedimentos.

La calibración interactiva del modelo WATEM/SEDEM permitió obtener los valores óptimos de los parámetros (KTC y los valores del factor para C para zonas de bosque, Pastizal y agrícola), para antes y después de las acciones y se logró predecir la producción de sedimentos para ambos periodos con coeficientes de eficiencia ME de 0.4752 para antes y de 0.7 para después de las acciones.

El uso de modelos sencillos distribuidos como el WATEM/SEDEM abre las posibilidades de estimar la producción de sedimentos y degradación específica de los suelos en una cuenca cuando se pueden utilizar datos de precipitación anual, tipos de suelos, usos de suelo, prácticas y obras de conservación, así como los modelos digitales de elevaciones en cuencas que no cuentan con información hidrométrica.

8 Bibliografía

- Adame, M. S. y Martínez M. M. 1999. Efecto del manejo integral de la cuenca del río Texcoco sobre los escurrimientos y producción de sedimentos. *Investigaciones Geográficas. Boletín* 39: 53-67.
- Alatorre S. B., 2010. Modelización espacialmente distribuida de la erosión y el transporte de sedimento en cuencas de montaña del pirineo Aragonés, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Chihuahua, México.
- Boix-Fayos, C., de Vente, J., Albaladejo, J., Martínez-Mena, M. Soil carbon erosion and stock at the catchment scale as affected by land use changes in Mediterranean ecosystems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- Bosch, J.M. and Hewlett, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *J. Hydrol.*, 55: 3-23.
- Cadenas de Llano, L.F., y M.C. Blanco, 1968. Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales. Dir. Gral. del Montes, Caza y Pesca Pluvial. Madrid, España.
- Chow, V.T., 1959. Open channel hydraulics. McGraw Hill Civil Engineering Series. New York.
- Cortés, T., H. G. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México. 168 p.
- de Vente, J. Poesen, J. Verstraten, G., Van Rompaey, A., Govers, G., 2008 Spatially distributed modelling of soil erosion and sediment yield at regional scales in Spain, *Global and planetary change* 60 (3-4), 393-415.
- Desmet, P. J. J. And Govers, G. 1996. A GIS Procedure for Automatically Calculating the USLE LS Factor On Topographically Complex Landscapes Units. *Journal of Soil and Water Conservation* 51 427-433.
- Einstein, H.A., 1950. The Bed-load function for sediment transportation in open channel flow, United States Department of Agriculture, Washington, D.C., Technical Bulletin No. 1026, Sept., 1950, p. 25.
- Feng, X., Wang, Y. Chen, L., Fu, B., Bai, G. 2010. Modeling soil erosion and it's response to land-use change in hilly catchments Chinese Loess Plateau. *Geomorphology* 118, 239-248.

- Fernandez Luque, R., 1974. Erosion and transport of Bed-load sediment, Dissertation, Krips Repro B.V., Meppel, the Netherlands.
- Fetter, C.W.: Applied Hydrogeology. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, 4th Ed. (2001)
- Foster, G. R. 1982. Modeling the erosion process. In Hydrologic Modeling of small watersheds, ed. C.T. Haan, H.P. Johnson, and D.L. Brakensick. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 297-308.
- García-Ruiz, J. M., Regüés, D., Alvera, B., Lana-Renault, N., Serrano-Muela, P., Nadal-Romero, E., Naves, A., Latron, J., Martí-Bono, C., Arnáez, J. 2008. Flood generation and sediment transport in experimental catchments affected by land use changes in the central Pyrenees. *Journal of Hydrology*. Vol. 356, Issues 1-2: 245-260.
- Gunn, R. y G.D. Kinzer. 1949. Terminal velocity of water droplets in stagnant air. *J. Met.* (6): Pp. 243-248.
- Haregeweyn, N. 2011. Assessing the performance of a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model (WATEM/SEDEM) in northern Ethiopia. *Land Degrad Develop*, 24: 188-204.
- Hayashi, T., y Ozaki, S. 1980. On the unit step length of saltation of sediment particles in the bed-load layer, Third International Symposium on Stochastic Hydraulics, Tokyo, Japan.
- Hudson, N.W. 1971. *Soil Conservation*. Cornell University Press. New York.
- Jetten, V., Govers, G., and Hessel, R.: Erosion models: quality of spatial predictions, *Hydrol. Process*, 17, 887–900, 2003.
- K. Van Oost, G. Govers and P. Desmet. In Press. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology*.
- K. Van Oost, G. Govers and P. Desmet. Laboratory for Experimental Geomorphology. *Watem* version 1.0, University of Leuven, Belgica.
- Laws, J.O. 1941. Measurement of fall velocity of water drops and raindrops. *Trans. Amer. Geophys. Union* 22: Pp. 709-721.
- Laws, J.O. y D.A. Parson. 1948. The relation of raindrop size to intensity. *Trans. Amer. Geophys. Union* 24: Pp. 452-459.

- Leopold, L.B., M.G. Wolman, and J.P. Miller., 1964. Fluvial processes in Geomorphology. Ed. Freeman and Company. E.U.
- López Cadenas, F y Blanco, M., 1968. Aspectos cualitativos y cuantitativos de la erosión hídrica y del transporte y depósito de materiales. Ministerio de agricultura, 190 pp. Barcelona.
- Malmaeus, J.M. y Håkanson, L., 2003. A dynamic model to predict suspended particulate matter in lakes. Department of Earth Sciences, Uppsala, Suecia.
- Martínez M., M. R. y J. Fernández V. (1983). Evaluación de la degradación específica a nivel nacional a partir de cuencas hidrológicas. Dir. Gral. de Conservación del Suelo y Agua, México.
- Matos, L., Moore, T. R., Roulet N. T., 1999. Dynamics and chemistry of dissolved organic carbon in Precambrian Shield catchments and an impounded wetland, Ca. J. Fisch, Aquat. Sci., 60, 612-623.
- McGregor, K.C. y C.K. Mutchler. 1977. Status of the R factor in northern Mississippi in "Foster, G.R. Ed. Soil erosion: prediction and control" Pp. 135-142. SCSA. Special Publication No. 21.
- Merritt, W. S., Letcher, R. A., and Jakeman, A. J. 2003. A review of erosion and sediment transport models, Environmental Modelling and Software. 18: 761-799.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part 1: a discussion of principles, J. Hydrol., 10: 282-290.
- Nearing, M.A., L.D. Norton, and X. Zhang. 2001. Soil erosion and sedimentation USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, West Lafayette. Pp. 2-42.
- Notas de Clase, 1975. Mecánica de Suelos, Departamento de Irrigación, E.N.A. Chapingo, Edo. de México.
- Pacheco-Ceballos R. 1989. Transports of Sediments: Analytical Solution. Journal of Hydraulic Research vol. 27 nr. 4.
- Poesen, J., Moeyersons, J., Deckers, J., Haile, M., and Lang, A., 2004. Human impact on the environment in the Ethiopian and Eritrean highlands—a state of the art. Earth sciences reviews, 64: 273-320. Okeyo, A.E., 1992. A two dimensional model of the mesoscale climate over Kenya. Rev. African meteorol. Soc., 1: 20-44.
- Reizes, J. A., 1978. Numerical study of continuous saltation, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, No HY9.

- Renard, K. G., Foster, G. R., Weesies, G. A., and Porter, J. P. 1991. RUSLE-revised universal soil loss equation, *J. Soil Water Conserv.*, 46: 30–33.
- RWCSCB (Rural Water Conservancy and Soil Conservation Bureau, Changjiang River Water Resources Commission). 1998. Technologic manual of soil and water conservation of Changjiang basin. Standards Press of China, Beijing.
- Saavedra, S. 2005. Estimating spatial patterns of soil erosion and deposition in the Adecu region using geo-information techniques. A case study in Cochabamba, Bolivia. PhD thesis, ITC, University of Twente, Enschede, 172 pp.
- SEMARNAT y UACH. 2003. Informe de la situación del medio ambiente en México, Compendio de estadísticas ambientales indicadores clave y de desempeño ambiente. Edición 2012. México, D.F. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/pdf/Cap0_docs_previos.pdf
- Valero-Garcés, BL. 2006. Climate variability in the Spanish Pyrenees during the last 30,000 yr revealed by the El Portalet sequence. *Quaternary research*. 66 (1): 38-52.
- Van Oost K, Govers G, & Desmet PJJ, 2000. Evaluating the effects of changes in landscape structure on soil erosion by water and tillage. *Landscape Ecology* 15 (6), 579-591.
- Van Rijn L. C. 1986. Manual of Sediment Transport Measurements; Delft Hydraulics Laboratory.
- Van Rompaey A, Verstraeten G, Van Oost K, Govers G & Poesen J, 2001. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 26 (11), 1221-1236.
- Van Rompaey A, Verstraeten G, Van Oost K, Govers G & Poesen J, 2001. Modelling mean annual sediment yield using a distributed approach. *Earth Surface Processes and Landforms* 26 (11), 1221-1236.
- Van Rompaey, A., Bazzoffi, P., Jones, R. J. A., and Montanarella, L. 2005. Modelling sediment yields in Italian catchments, *Geomorphology*, 65: 157–169.
- Verstraeten G, Van Oost K, Van Rompaey A, Poesen J & Govers G, 2002. Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use and Management*, 18, 386-39.
- Verstraeten G, Van Oost K, Van Rompaey A, Poesen J & Govers G, 2002. Evaluating an integrated approach to catchment management to reduce soil loss and sediment pollution through modelling. *Soil Use and Management*, 18, 386-39.

- Wischmeier, W.H. 1972. Upslope erosion analysis in "W.H. Shen. Environmental impact on rivers" Chapt 15 Pp 25 CSU, Forth Collins, Col.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook No. 537. USDA-SEA, US. Govt. Printing Office, Washington, DC. 58 p.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith (1958). Rainfall energy and it's relationships to soil loss. Trans. Amer. Geophys. Union 39 (2): 285-291.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1965. Rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains. Agr. Handbook No. 282. USDA Washington, D.C. Pp 47.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1977. Use and misuse of the USLE in: "Foster, G.R. Ed. Soil erosion: prediction and control" Pp. 371-378. SCSA. Special Publication No. 21.
- Wischmeier, W.H. y D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses a guide to conservation planning. Agr. Handbook No. 537. USDA Washington, D.C. Pp 58.
- Zang P., Shi Y. 1994. Establish system dynamics of human and earth and strengthen integrated research in enviromental and ecological problems, Fund of science in China, 3, pp. 158-160.

9 Anexos

Valores del factor K en función de la unidad de suelo y su textura superficial.

Unidades y subunidades de suelo de acuerdo a la clasificación de la FAO		Textura		
Símbolo	Nombre	Gruesa	Media	Fina
A	Acrisol	0.026	0.040	0.013
Af	Acrisol férrico	0.013	0.020	0.007
Ag	Acrisol gléyico	0.026	0.030	0.013
Ah	Acrisol húmico	0.013	0.020	0.007
Ao	Acrisol órtico	0.026	0.040	0.013
Ap	Acrisol plíntico	0.053	0.079	0.026
B	Cambisol	0.026	0.040	0.013
B (c,d,e,k)	Cambisol crómico, dístrico, éutrico, cálcico	0.026	0.040	0.013
Bf	Cambisol férrico	0.013	0.020	0.007
Bg	Cambisol gléyico	0.026	0.040	0.013
Bh	Cambisol húmico	0.013	0.020	0.007
Bk	Cambisol cálcico	0.026	0.040	0.013
B (v,x)	Cambisol vértico, xérico)	0.053	0.079	0.026
C (h,k,l)	Chernozem (háplico, cálcico y lúvico)	0.013	0.020	0.007
D (d,g,e)	Podzoluvisol (dístrico, gléyico, éutrico)	0.053	0.079	0.026
E	Rendzina	0.013	0.020	0.007
F(a,h,p,o)	Ferrasol (ácrico, húmico, plíntico, ócrico)	0.013	0.020	0.007
G	Gleysol	0.026	0.040	0.013
Gc	Gleysol calcárico	0.013	0.020	0.007
G (d,e)	Gleysol dístrico éutrico	0.026	0.040	0.013
G(h,m)	Gleysol húmico, mólico	0.013	0.020	0.007
G(p,x)	Gleysol plíntico, gélico)	0.053	0.079	0.026
Gv	Gleysol vértico	0.053	0.079	0.026
H(c,g,h,l)	Feozem calcárico, gléyico, háplico, lúvico)	0.013	0.020	0.007
I	Litosol	0.013	0.020	0.007
J	Fluvisol	0.026	0.040	0.013
Jc	Fluvisol calcárico	0.013	0.020	0.007

Valores del factor K en función de la unidad de suelo y su textura superficial.

Unidades y subunidades de suelo de acuerdo a la clasificación de la FAO		Textura		
Símbolo	Nombre	Gruesa	Media	Fina
Jd	Fluvisol dístico	0.026	0.040	0.013
Je	Fluvisol eútrico	0.026	0.040	0.013
Jt	Fluvisol tiónico	0.053	0.079	0.026
Jp	Fluvisol plíntico	0.053	0.079	0.026
K (h,k,l)	Kastañosem (húmico, cálcico y lúvico)	0.026	0.040	0.013
L	Luvisol	0.026	0.040	0.013
La	Luvisol álbico	0.053	0.079	0.026
Lc	Luvisol crómico	0.026	0.040	0.013
Lf	Luvisol férrico	0.013	0.020	0.007
Lg	Luvisol gléyico	0.026	0.040	0.013
Lk	Luvisol cálcico	0.026	0.040	0.013
Lo	Luvisol órtico	0.026	0.040	0.013
Lp	Luvisol plíntico	0.053	0.079	0.026
Lv	Luvisol vértico	0.053	0.079	0.026
M (a,g)	Greysem (ácrico, gléyico)	0.026	0.040	0.013
N (d,e,h)	Nitosol (dístico, éutrico, húmico)	0.013	0.020	0.007
O (d,e,x)	Histosol (dístico, éutrico, gélico)	0.013	0.020	0.007
P	Podzol	0.053	0.079	0.026
Pf	Podzol férrico	0.053	0.079	0.026
Pg	Podzol gléyico	0.053	0.079	0.026
Ph	Podzol húmico	0.026	0.040	0.013
Po	Podzol órtico	0.053	0.079	0.026
Pp	Podzol plácico	0.053	0.079	0.026
Q (a,c,f,l)	Arenosol (álbico, cámbico, ferrálico, lúvico)	0.013	0.020	0.007
R	Regosol	0.026	0.040	0.013
Re	Regosol éutrico	0.026	0.040	0.013
Rc	Regosol calcárico	0.013	0.020	0.007
Rd	Regosol dístico	0.026	0.040	0.013
Rx	Regosol gélico	0.053	0.079	0.026
S	Solonetz	0.053	0.079	0.026

Valores del factor K en función de la unidad de suelo y su textura superficial.

Unidades y subunidades de suelo de acuerdo a la clasificación de la FAO		Textura		
Símbolo	Nombre	Gruesa	Media	Fina
Sg	Solonetz gléyico	0.053	0.079	0.026
Sm	Solonetz mólico	0.026	0.040	0.013
So	Solonetz órtico	0.053	0.079	0.026
T	Andosol	0.026	0.040	0.013
Th	Andosol húmico	0.013	0.020	0.007
Tm	Andosol mólico	0.013	0.020	0.007
To	Andosol ócrico	0.026	0.040	0.013
Tv	Andosol vítrico	0.026	0.040	0.013
U	Ranker	0.013	0.020	0.007
V(c,p)	Vertisol (crómico, pélico)	0.053	0.079	0.026
W	Planosol	0.053	0.079	0.026
Wd	Planosol dístrico	0.053	0.079	0.026
We	Planosol éutrico	0.053	0.079	0.026
Wh	Planosol húmico	0.026	0.040	0.013
Wm	Planosol mólico	0.026	0.040	0.013
Wx	Planosol gélico	0.053	0.079	0.026
X(k,h,l,g)	Xerosol (cálcico, háplico, lúvico, gypsico)	0.053	0.079	0.026
Y(h,k,l,g,t)	Yermosol (háplico, cálcico, lúvico, gípsico, takírico)	0.053	0.079	0.026
Z	Solonchak	0.053	0.040	0.013
Zg	Solonchak gléyico	0.026	0.040	0.013
Zm	Solonchak mólico	0.013	0.020	0.007
Zo	Solonchak órtico	0.026	0.040	0.013
Zt	Solonchak takírico	0.053	0.079	0.026