



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**ESTIMACIÓN DE BIOMASA PARA TIERRAS DE USO
AGROPECUARIO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO
VERDE, OAXACA**

JAVIER VÁZQUEZ MANNING

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2018

La presente tesis titulada: "Estimación de Biomasa para Tierras de Uso Agropecuario en la Cuenca Alta del Río Verde, Oaxaca", realizada por el alumno: Javier Vázquez Manning, 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. Demetrio S. Fernández Reynoso

ASESOR



Dr. Mario R. Martínez Menez

ASESOR



Dr. Ignacio Sánchez Cohen

ASESOR



M.C. Erasmo Rubio Granados

Montecillo, Texcoco, Estado de México, octubre de 2018

ESTIMACIÓN DE BIOMASA PARA TIERRAS DE USO AGROPECUARIO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO VERDE, OAXACA

Javier Vázquez Manning, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

Los modelos de simulación aplicados a la producción vegetal, a nivel de territorio y basados en procesos biofísicos, permiten comprender la dinámica del rendimiento de biomasa en relación con las condiciones ambientales y de manejo. La aplicación de este tipo de modelos implica la obtención de una amplia información de suelo, clima, manejo de cultivos, fenología de las cubiertas vegetales y rendimientos de biomasa; información que suele ser difícil de integrar, sobre todo en grandes superficies con una amplia diversidad ambiental. En el presente este estudio se utilizó el modelo APEX (*Agricultural Policy/ Environmental eXtender*) en la cuenca alta del río Verde, a través de censos agropecuarios municipales de rendimiento de maíz (*zea mays L.*) y consumo de forraje del hato ganadero reportado, con el propósito de analizar los alcances y limitaciones de la información ambiental y de manejo disponible, en instancias públicas, para su uso en la modelación.

El modelo APEX simuló de manera aceptable el rendimiento de grano de maíz, con un coeficiente de determinación de 0.64 y 0.80 para los censos de INEGI de 1991 y 1994, respectivamente. Con base en el pasto banderita (*bouteloua curtipendula*) y el tamaño del hato ganadero reportado por INEGI (2007b) APEX simuló el rendimiento de forraje con un $r^2 = 0.62$. El modelo sobrestimó en promedio 16.44% el rendimiento de maíz y 15.15% el forraje. Dado que el modelo simuló satisfactoriamente la producción anual de biomasa se concluye que es factible emplear APEX en otras regiones del país con información ambiental generada por diversas instancias públicas. Estos resultados tienen el potencial de ayudar a los tomadores de decisiones a priorizar áreas de intervención en función del rendimiento de biomasa y acorde a las condiciones de clima, suelo y manejo de la cobertura vegetal en terrenos de uso agropecuario.

Palabras clave: modelo APEX; rendimiento maíz; censo agropecuario; producción de forraje, Mixteca Oaxaqueña

BIOMASS ESTIMATION FOR AGRICULTURAL LANDS IN THE HIGH BASIN OF VERDE RIVER, OAXACA

**Javier Vázquez Manning, M. en C.
Colegio de Postgraduados, 2018**

ABSTRACT

Simulation models applied to crop production, at the territorial level and based on biophysical processes, allow to understand the dynamics of biomass yield in relation to environmental and management conditions. The application of this type of models implies the obtaining of a wide information of soil, climate, crop management, plant cover phenology and biomass yields; information that is usually difficult to manage, especially in large areas and great environmental diversity. In this study was used the APEX model (Agricultural Policy / Environmental eXtender), in the high basin of verde river, through municipal agricultural censuses of corn yield (*zea mays L.*) and forage consumption for the censuses herd, in order to analyze the scope and limitations of environmental and management information available in public instances for biomass modeling.

The APEX model simulated the corn grain yield in an acceptable way, with a coefficient of determination of 0.64 and 0.80 for the INEGI censuses of 1991 and 1994, respectively. Based on the sideoats grama (*bouteloua curtipendula*) and the size of the herd reported by INEGI (2007b) APEX simulated forage yield with $r^2 = 0.62$. The model overestimated on average 16.44% the yield of corn and 15.15% the forage. Given that the model simulated satisfactorily the annual production of biomass, it is concluded that it is feasible to use APEX in other regions of the country with environmental information generated by several public instances. The results obtained help decision makers prioritize areas of intervention based on biomass yield and according to prevailing climate, soil and vegetation cover management conditions.

Key words: APEX model; corn yield; rural census, forage yield, Mixteca region

DEDICATORIA

A mis padres Dulce y Severino por su amor incondicional, atención en todo momento, trabajo arduo y lecciones durante toda mi vida. Gracias por todo el apoyo y motivación para lograr los objetivos que me he propuesto, soy el más feliz de tenerlos como mis papás, siempre serán mi ejemplo a seguir. Los amo por siempre.

A mi hermana Estela por tantas experiencias compartidas, por ser mi compañera incondicional desde pequeños, por el crecimiento y aprendizaje juntos en nuestras diferentes etapas de la vida. Soy un afortunado al tener a la mejor hermana del mundo. Te amo.

A mis compañeros de vida Brissa y Rafita, por motivarme a ser mejor cada día, por la confianza y todo el apoyo, por todos los momentos increíbles que hemos compartido y por llenar mi vida con tanta felicidad, son lo mejor que me ha sucedido en la vida. Los amo infinitamente.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de Postgraduados que me abrió las puertas para lograr esta meta en mi desarrollo personal y profesional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por los recursos otorgados a través de una beca, que permitió desarrollar mis estudios de maestría con suficiencia económica.

Al Dr. Demetrio Salvador Fernández Reynoso, por el aprendizaje y conocimientos compartidos a lo largo de este ciclo, por la orientación, paciencia y por el criterio profesional y revisión oportuna y analítica de los resultados obtenidos.

Al Dr. Mario Roberto Martínez Menez, por la gran oportunidad de aprender directamente de un experto en el manejo de cuencas, por su gran liderazgo y motivación a ser mejor cada día.

Al Dr. Ignacio Sánchez Cohen por aceptar ser parte de mi consejo y por la revisión realizada al presente trabajo.

Al M.C. Erasmo Rubio Granados por el apoyo en el análisis y procesamiento de información de campo.

Al Dr. José Luis Oropeza Mota[†], fuente infinita de superación profesional y formador de profesionistas de excelencia.

Al Ing. Carlos Palacios Espinoza, por compartir el conocimiento y por el apoyo técnico y logístico desinteresado en el desarrollo del presente trabajo.

Al M.B.A. José Antonio García Vigil, por el invaluable apoyo otorgado en mi superación profesional, por la motivación a mejorar continuamente con la invitación a atender nuevos retos con estrategia y disciplina.

Al M.C. Julio Alejandro Sánchez Aldana López, por la motivación para concluir con este proceso formativo, por todo el apoyo y facilidades otorgadas para atender el proceso de titulación.

El presente trabajo de investigación se realizó con el apoyo de la WWF (*World Wildlife Fund*), a través del Proyecto Mixteca.

CONTENIDO

| | |
|--|-----|
| RESUMEN | iv |
| ABSTRACT | v |
| DEDICATORIA | vi |
| AGRADECIMIENTOS | vii |
| LISTA DE FIGURAS..... | x |
| LISTA DE CUADROS | xi |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 2.1. General | 4 |
| 2.2. Específicos..... | 4 |
| 3. HIPÓTESIS..... | 4 |
| 4. SUPUESTOS | 4 |
| 5. REVISIÓN DE LITERATURA | 4 |
| 5.1. Modelos de simulación..... | 5 |
| 5.2. Modelos de base biofísica | 6 |
| 5.3. Modelo APEX | 10 |
| 5.3.1. Usos del modelo APEX..... | 10 |
| 5.3.2. Casos de estudio..... | 11 |
| 5.4. Componentes del modelo APEX..... | 18 |
| 5.3.1. Descripción general..... | 18 |
| 5.3.2. Clima | 19 |
| 5.3.3. Suelos..... | 21 |
| 5.3.4. Balance hídrico | 24 |
| 5.3.5. Crecimiento de las plantas..... | 29 |
| 5.3.6. Manejo de las plantas..... | 30 |
| 5.3.7. Componente de tránsito | 34 |
| 5.3.8. Componente económico | 37 |
| 6. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 39 |
| 5.5. Caracterización del área de estudio | 39 |
| 6.1.1. Localización | 39 |
| 6.1.2. Orografía..... | 44 |
| 6.1.3. Clima | 44 |

| | | |
|----------|---|-----|
| 6.1.4. | Suelos | 48 |
| 6.1.5. | Uso de suelo y vegetación | 54 |
| 6.1.6. | Hidrología..... | 60 |
| 6.1.7. | Erosión..... | 62 |
| 6.1.8. | Producción agrícola | 63 |
| 6.1.9. | Pastoreo de agostaderos | 67 |
| 5.6. | Materiales..... | 76 |
| 5.7. | Metodología..... | 76 |
| 6.1.10. | Delimitación del área de estudio | 78 |
| 6.1.11. | Información climática | 81 |
| 6.1.12. | Información de uso de suelo y vegetación | 82 |
| 6.1.13. | Información de manejo | 85 |
| 6.1.14. | Información de suelos..... | 87 |
| 6.1.15. | Calibración del modelo | 90 |
| 7. | RESULTADOS | 92 |
| 5.8. | La producción de maíz en laderas | 92 |
| 5.9. | Producción de forraje en los agostaderos..... | 99 |
| 8. | CONCLUSIONES | 106 |
| 9. | RECOMENDACIONES | 107 |
| 10. | BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA | 108 |
| 11. | ANEXOS | 118 |
| Anexo 1. | Generadores climáticos | 119 |
| Anexo 2. | Datos de temperatura y lluvia para 1991, 1994 y 2007..... | 132 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----|
| Figura 1. Localización de la cuenca alta del río Verde, Mixteca Oaxaqueña. | 40 |
| Figura 2. Municipios y localidades que conforman la cuenca alta del río Verde. | 41 |
| Figura 3. Climas presentes en la cuenca alta del río Verde. | 46 |
| Figura 4. Unidades de suelos presentes en la cuenca alta del río Verde (Sánchez <i>et al.</i> , 2017). | 49 |
| Figura 5. Usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca alta del río Verde (WWF, 2014). | 56 |
| Figura 6. Volúmenes de escurrimiento anual de la estación hidrométrica Ixtayutla (Clave CONAGUA 20021), cuenca alta del río Verde. | 61 |
| Figura 7. Volúmenes de escurrimiento y sedimentos medios anuales de la estación hidrométrica Ixtayutla (Clave CONAGUA 20021), cuenca alta del río Verde. | 61 |
| Figura 8. Diagrama de flujo metodológico. | 78 |
| Figura 9. Delimitación de la cuenca con APEX. | 79 |
| Figura 10. Ventana de edición de subáreas del modelo APEX. | 80 |
| Figura 11. Ventana de edición para datos climáticos para el modelo APEX. | 81 |
| Figura 12. Ventana de parámetros fisiotécnicos requeridos por el modelo APEX. | 83 |
| Figura 13. Ventana de edición de las variables de manejo para el modelo APEX. | 86 |
| Figura 14. Ventana de edición de las variables de suelo para el modelo APEX. | 87 |
| Figura 15. Rendimientos medios municipales de grano de maíz reportado y simulado APEX. | 96 |
| Figura 16. Rendimientos de maíz simulados por APEX para la cuenca alta del río Verde. | 98 |
| Figura 17. Rendimientos medios de maíz simulados por APEX dentro de la cuenca alta del río Verde. | 99 |
| Figura 18. Correlación entre la superficie de agostadero y unidades animal censadas. | 100 |
| Figura 19. Rendimiento de forraje en agostaderos simulados con APEX, cuenca alta del río Verde. | 105 |
| Figura 20. Distribución de la producción de biomasa en agostaderos simulada por APEX, cuenca alta del río Verde. | 106 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|---|-----|
| Cuadro 1. Relación de municipios que cubren la cuenca alta del río Verde, Oaxaca. | 41 |
| Cuadro 2. Tipos de clima en la cuenca alta del río Verde..... | 45 |
| Cuadro 3. Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca alta del río Verde. | 47 |
| Cuadro 4. Tipos de suelos presentes en las áreas agrícolas y de agostadero en la cuenca alta del río Verde..... | 48 |
| Cuadro 5. Usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca alta del río Verde..... | 54 |
| Cuadro 6. Paquete tecnológico del cultivo de maíz para la Mixteca Oaxaqueña (Salas, 2013). | 64 |
| Cuadro 7. Rendimientos de maíz, medios municipales, reportados por SIAP (2016). | 66 |
| Cuadro 8. Factores de conversión a Unidad Animal (UA)..... | 68 |
| Cuadro 9. Clase de condición de pastizal..... | 69 |
| Cuadro 10. Coeficientes de agostadero (CA) por tipo de vegetación (2009)..... | 72 |
| Cuadro 11. Existencias totales de cabezas de ganado por municipio (INEGI, 2007). | 73 |
| Cuadro 12. Descripción de los campos de la ventana de edición de subáreas | 80 |
| Cuadro 13. Variables climáticas mensuales para el generador climático APEX..... | 82 |
| Cuadro 14. Parámetros fisiotécnicos requeridos por el modelo APEX..... | 84 |
| Cuadro 15. Descripción de las variables de manejo requeridas por el modelo APEX . | 86 |
| Cuadro 16. Propiedades físicas y químicas, por tipo de suelo, para el modelo APEX. | 88 |
| Cuadro 19. Rendimientos medios municipales de maíz: reportados por el INEGI y simulados por APEX..... | 93 |
| Cuadro 20. Producción de forraje, a nivel municipal, estimada según censo ganadero del INEGI (2007) y simulado con APEX. | 101 |
| Cuadro 21. Generadores climáticos para las estaciones climatológicas del SMN en la cuenca alta del río Verde, Oax..... | 119 |

1. INTRODUCCIÓN

El deterioro de los recursos naturales es cada vez más grave, entre otras razones a causa de la explotación demográfica y a la cierta falta de "ética de la tierra"; a este deterioro generalizado se le ha denominado desertificación, y uno de los principales procesos es la erosión de suelos. Por lo tanto, todas las acciones tendientes a prevenir y/o controlar ese problema adquieren gran importancia, toda vez que el suelo es base para la producción de alimentos, es reserva genética, y es filtro regulador y transformador de diversas sustancias.

De Groot *et al.* (2002) afirman que la función de retención del suelo depende principalmente de los aspectos estructurales de los ecosistemas, especialmente de la cubierta vegetal y su sistema radical. Las raíces de los árboles estabilizan el suelo y el follaje intercepta la precipitación, evitando así la compactación y erosión del suelo desnudo. Las plantas que crecen a lo largo de las costas y la vegetación sumergida en las zonas costeras contribuyen en gran medida al control de la erosión y facilitan la sedimentación.

La erosión puede ser definida, de forma amplia, como un proceso de arrastre del suelo por acción del agua o del viento; o como un proceso de desprendimiento y arrastre acelerado de las partículas de suelo causado por el agua y el viento (Suárez, 1980). La erosión del suelo es un importante problema ambiental y agrícola en todo el mundo. A pesar de que la erosión ha ocurrido a lo largo de la historia de la agricultura, se ha intensificado en los últimos años (Lal y Stewart, 1990).

Gaia (1993) afirma que cada año, 75 millones de toneladas métricas de suelo se eliminan de la tierra por el viento y la erosión hídrica, proviniendo la mayor parte de tierras agrícolas. La pérdida de suelo se degrada de la tierra cultivable y, finalmente, la hace improductiva. A nivel mundial aproximadamente 12×10^6 hectáreas de tierras cultivables son destruidas y abandonadas cada año debido a las prácticas agrícolas no

sostenibles (Lal y Stewart, 1990), y sólo alrededor de 1.5×10^9 hectáreas de tierra están siendo cultivadas (Buringh, 1989; World Resources Institute, 1993).

El suelo se forma a través de la desintegración de la roca y gradualmente se vuelve fértil a través de la adición de materia orgánica por parte de plantas y animales y la liberación de minerales. La formación de suelo por lo general es un proceso muy lento, los suelos naturales se generan a una velocidad de sólo unos pocos centímetros por siglo y después de la erosión, la formación de suelo (o regeneración) a partir de la roca madre toma de 100 a 400 años por centímetro de capa superficial de suelo (Pimentel y Wilson, 1997).

Con la evolución de las computadoras se hizo posible el desarrollo de modelos a través de la solución de ecuaciones por métodos numéricos o la simulación estadística de los procesos. Durante las décadas de los años setenta y ochenta, el desarrollo se orientó hacia otras áreas del conocimiento como la agricultura, el medio ambiente y la gestión de los ecosistemas (Singh, 2002). El desarrollo de estos modelos los ha convertido en una poderosa herramienta para el manejo de los recursos naturales y para establecer esquemas de ordenamiento con fines de conservación del suelo y agua a diversas escalas (parcelaria, comunitaria o micro-cuencas) con base en indicadores ambientales (producción de biomasa, pérdida de suelo, producción de agua, etc.).

La estimación de relaciones entre biomasa/erosión/escorrimento/humedad/manejo/clima en terrenos agrícolas, en áreas de agostaderos y en superficies forestales se ha realizado a través de parcelas experimentales, bajo diferentes condiciones biofísicas y métodos de manejo. Este tipo de aproximación es una técnica costosa, laboriosa y con resultados a mediano y largo plazo además de que su aplicación a nivel de parcelas se ve limitada. Ante esta situación se han desarrollado modelos de simulación para estimar los rendimientos en forma confiable y bajo diversas estrategias de manejo sin necesidad de establecer parcelas experimentales para su monitoreo. Así, los modelos de simulación han probado su eficiencia como herramientas en la planeación del manejo de recursos naturales, así como establecer esquemas de

ordenamiento espacial a diferentes escalas (Hartkamp *et al.*, 1999). En este sentido, los modelos de cuenca permiten simular los procesos naturales del flujo de agua, sedimentos, sustancias químicas, nutrientes y organismos microbiológicos dentro de las cuencas y cuantifican el impacto humano en estos procesos (Singh y Frevert, 2005).

Los modelos hidrológicos-productivos como APEX (*The Agricultural Policy/ Environmental eXtender*), permiten la predicción de escenarios de cambio, que pudieran ocurrir en una cuenca o parcela, con relación a la erosión/producción de biomasa/ y la rentabilidad. Para su operación necesitan alimentarse de variables climáticas, topográficas, tipos de suelo, uso de suelo, fisiotecnia de las coberturas vegetales, tipo de manejo cultural (labranza, rotación de cultivos, fertilización), y prácticas de manejo de suelo y agua (riego, drenaje, borderías, presas).

El modelo APEX fue desarrollado para usarse en el manejo de pequeñas cuencas agrícolas (Williams *et al.*, 1998). Específicamente se elaboró para evaluar varias estrategias de manejo agrícola, considerando la sostenibilidad, erosión (eólica, e hídrica laminar y concentrada), calidad de agua, fertilidad, competencia entre plantas, clima y plagas. Este modelo se considera una herramienta útil para simular los impactos de manejo y uso de la tierra para granjas integrales y cuencas pequeñas (Williams *et al.*, 2006). Su implementación en una cuenca ayuda a entender la dinámica de los rendimientos de biomasa y lograr adoptar la tecnología adecuada para alcanzar el potencial productivo de los terrenos.

Se debe tomar en cuenta los resultados obtenidos por cualquier modelo solo son aproximaciones de la realidad que sirven para entender el comportamiento de un sistema real y priorizar áreas de manejo. Aprovechando la alta densidad de municipios del estado de Oaxaca a continuación se presentan los objetivos del presente trabajo.

2. OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo de investigación se mencionan a continuación:

2.1. General

Evaluar a nivel municipal la eficiencia del modelo APEX para estimar la biomasa relacionada con las actividades agropecuarias de la cuenca alta del río Verde, Oaxaca.

2.2. Específicos

- Estimar con APEX la producción de biomasa para maíz de temporal.
- Estimar con APEX la producción de biomasa en pasto de los agostaderos.
- Comparar la producción de biomasa simulada con APEX con los registros estadísticos a nivel municipal de la producción de grano y el consumo de forraje del hato ganadero.

3. HIPÓTESIS

Es factible calibrar el modelo APEX, para estimar satisfactoriamente la producción de biomasa asociada a las actividades agropecuarias, utilizando información estadística a nivel municipal.

4. SUPUESTOS

- La información climatológica de las estaciones metrológicas es confiable.
- La información estadística de rendimientos de maíz a nivel municipal es útil.
- En la cuenca el ganado satisface sus necesidades alimenticias con rastrojo de maíz y pasto de los agostaderos.

5. REVISIÓN DE LITERATURA

Las variaciones de las tasas de erosión, dentro de una cuenca de drenaje, son producto de varios factores ambientales, entre los más importantes están los tectónicos, climáticos y antropogénicos. Los primeros con influencia en periodos largos, los climáticos en periodos cortos y largos y los antropogénico, el factor más dinámico, con efectos de corto plazo (meses o años). Para evaluar el impacto del manejo antropológico en las cuencas se recurre al uso de modelos de simulación.

5.1. Modelos de simulación

Un modelo es un bosquejo que representa un conjunto real, con cierto grado de precisión y en la forma más compleja posible, sin pretender una réplica de la realidad. Según Benavides (1998) la importancia de los modelos reside, entre otros aspectos, en la predicción de fenómenos a largo plazo en un tiempo relativamente corto y en derivar relaciones de causa- efecto sin realizar cambios en los sistemas reales.

Los modelos empleados en simulación hidrológica pueden ser: físicos, analógicos y digitales (Junes, 1985). Los modelos físicos utilizan iconos para la simulación, es decir, son modelos de la misma naturaleza que el ente modelado. Los modelos analógicos utilizan materiales que cumplan leyes similares a las del sistema que estudia, por ejemplo, el flujo eléctrico tiene comportamiento análogo, aunque de diferente naturaleza, al hídrico. Los modelos físicos y analógicos son usados en la hidráulica y la hidrología, pero con el desarrollo de la computación, desde finales de la década de los 60's, los modelos digitales se han convertido en una herramienta de simulación poderosa ya que permiten analizar rápidamente sistemas grandes y complejos, además los modelos digitales no requieren de equipamiento extenso como sucede con los modelos físicos y analógicos.

La modelación hidrológica, acorde con Yeomans (2004), comenzó a principios del siglo XIX con el diseño de canales, redes de drenaje, presas, puentes, diques y sistemas de distribución de agua. Hasta mediados de la década de los sesenta, la modelación hidrológica se limitó a tratar de explicar los mecanismos individuales involucrados en el ciclo hidrológico. Así, encontramos el Método Racional (1850), la teoría de infiltración de Horton (1933), los trabajos de Thornthwaite y Penman para la estimación de la evapotranspiración (1948), la teoría de la onda cinemática de Lighthill y Whitham (1955) y la del hidrograma unitario instantáneo de Nash en 1957.

Posterior a 1960, con el desarrollo de la computación aparece el primer intento por representar casi en su totalidad el ciclo hidrológico en una cuenca y surge el *Standford Watershed Model-SWM* de Crawford y Linsley (1966). Este esfuerzo sirvió como base

para desarrollar el modelo *Hydrocomp Simulation Program* (HSP), que incluía la modelación de transporte de sedimentos y la calidad del agua. Posteriormente, en el año 1976, éste modelo dio paso al *Hydrological Simulation Program-Fortran* HSP-F. A partir de este modelo surgió una gran cantidad de desarrollos a lo largo de las últimas cinco décadas como el HEC-HMS del Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, el TETIS de la Universidad Politécnica de Valencia y el modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tolls*), de bases biofísicas, desarrollado por el Servicio de Investigación de Agricultura en los Estados Unidos, entre otros (Eterovic, 2008).

5.2. Modelos de base biofísica

Cuando es no posible trabajar directamente en entornos amplios, los modelos de base biofísica resultan útiles para describir, explicar y comprender de mejor forma la realidad y establecer esquemas de ordenamiento espacial para mejorar los índices de sostenibilidad a largo plazo (Hartkamp, *et al.*, 1999). Los modelos de simulación hidrológica con bases biofísicas, según Silva (1995), se componen de una serie de ecuaciones que calculan e interrelacionan, de manera computarizada, los diversos procesos relacionados con el escurrimiento. Determinan el balance hídrico del área mediante ecuaciones que resuelven los componentes del ciclo hidrológico, a través de funciones matemáticas que involucran la precipitación, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración, percolación, almacenamiento y flujo base. Los modelos de simulación de erosión, según los componentes de escurrimiento y crecimiento vegetal, calculan la producción de sedimentos de una cuenca y varios de ellos generan información adicional como la productividad de cultivos, concentraciones de plaguicidas y nutrientes en suelo, agua y sedimentos.

Los avances de la informática han permitido desarrollar modelos para predecir la producción de sedimentos combinando modelos de erosión, de crecimiento de plantas, de humedad de suelo y cobertura de residuos (Lane *et al.*, 1992). Villar (1996) menciona que de estos modelos los más conocidos son el CREAMS (*Chemicals, Runoff*

and Erosión from Agricultural Management Systems), el SWRRB (*Simulator of Water Resources in Rural Basins*), el EPIC (*Environmental Policy Integrated Climate*), el WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) y el DSSAT (*Decision Support System for Agrotechnology Transfer*); los cuales se describe brevemente a continuación.

Entre los componentes que integran el modelo CREAMS están el hidrológico, erosión, producción de sedimentos, nutrimentos y plaguicidas (Frere *et al.*, 1980). Este modelo fue diseñado para evaluar la contaminación de origen no puntual en unidades hidrológicas del tamaño de parcelas de cultivo y se aplica para simular la calidad del agua en superficies de 1 a 100 ha (Bringner, 1996).

EL modelo SWRRB (Arnold *et al.*, 1989) fue desarrollado con base a procesos biofísicos para predecir el efecto del manejo del suelo y cultivo sobre la producción de agua y sedimentos en cuencas sin registros hidrométricos, es decir, en simulaciones que no requieren calibración (Arnold y Williams, 1985). Los componentes principales de SWRRB son clima, hidrología y sedimentación. Los procesos considerados son escorrentía, flujo de retorno, percolación, evapotranspiración, pérdidas de transmisión, almacenamiento en lagunas de oxidación y presas, sedimentación y crecimiento del cultivo (Arnold y Williams, 1985). Este modelo se obtuvo a partir del sub-modelo hidrológico de lluvia diaria de CREAMS para aplicarlo en cuencas rurales grandes y complejas. Los cambios principales incluidos fueron: a) se expandió el modelo para permitir cálculos simultáneos en varias sub-cuencas, b) se añadieron componentes para simular el clima, flujo de retorno, almacenamiento en lagunas de oxidación y presas, crecimiento del cultivo, pérdidas de transmisión y movimiento de sedimento a través de cuerpos de agua y valles fluviales (Arnold y Williams, 1985).

El modelo EPIC fue desarrollado en la década de 1980 para determinar la relación entre erosión (hídrica y eólica) y productividad agrícola (Williams *et al.*, 1984). Varios componentes de CREAMS (Knisel, 1980), SWRRB y GLEAMS fueron utilizados en el desarrollo de EPIC (Leonard *et al.* 1987; Putman *et al.*, 1988; Sharpley y Williams 1990). Este modelo permite a los planificadores establecer metas de control de la erosión, en

función de las técnicas de conservación de suelo y la productividad de los cultivos. La relación entre costos de producción y productividad permiten orientar la selección de prácticas de conservación de suelo (*Benson et al., 1989*). Los principales componentes del modelo EPIC son hidrología, clima, erosión, movilidad de nutrientes, crecimiento vegetal, temperatura del suelo, sistema de labranza, factores económicos y manejo de cultivo. El modelo fue diseñado para evaluar las características hidrológicas en parcelas de una a cien hectáreas, asumiendo homogeneidad de manejo y tipo de suelos. Verticalmente, el modelo permite trabajar con las variaciones de las propiedades del suelo, ya que el perfil del mismo puede dividirse hasta en diez horizontes.

El modelo WEPP, a diferencia de los modelos anteriores, se basa en procesos físicos para predecir escurrimientos superficiales y erosión hídrica en laderas y cuencas (Lane y Nearing, 1989; Eliot *et al.*, 1989) Para estimar la escorrentía superficial considera la infiltración, el encostramiento superficial, hidráulica del surco, crecimiento de la planta, descomposición de residuos, percolación, transpiración, deshielo y el efecto de las heladas sobre la infiltración. Para simular la distribución espacial y temporal de la pérdida de suelo, en una ladera completa o en cada punto de ella, considera la erosión del surco y entresurcos, el depósito y transporte de sedimentos, la erodabilidad del suelo, el tipo de labranza y el desborde de camellones.

El modelo DSSAT consta, a su vez de seis modelos para simular el crecimiento de los principales cultivos de importancia económica y ha demostrado alta confiabilidad bajo distintas condiciones de clima, suelo y manejo (Jones, 1993). Con este modelo es posible (1) organizar y archivar bases de datos sobre el clima, suelo, cultivos, experimentos y precios; (2) simular producción de cultivos en una o varias épocas y en secuencias; (3) analizar resultados y representar gráficamente las simulaciones; y (4) evaluar diferentes prácticas de manejo específicas a una explotación o parte de ella.

Los modelos de simulación más conocidos como EPIC, SWRRB y CREAMS utilizan modificaciones de la USLE (*Universal Soil Loss Equation*) como componente de sedimentación y el método de curva numérica (CN) para calcular escorrentía. Por el

contrario, WEPP y su derivación para cuencas Kineros (*Kinematic runoff and erosion model*), se desarrollaron sobre una formulación física de procesos, es decir, formulaciones diferentes a USLE y Curva Numérica. No obstante, parte importante de sus algoritmos se obtuvieron a través de modificaciones de componentes de otros modelos o de regresiones. De estas herramientas, EPIC es el modelo hidrológico de erosión más avanzado para la simulación de procesos del cultivo (nutrimentos, crecimiento y productividad), ya que la mayoría de los modelos se basan en dicho componente. En cuanto a la erosión eólica EPIC es el único modelo de simulación hidrológica que la toma esta como un proceso en el rendimiento de cultivo (Silva, 1995).

El componente de crecimiento vegetal de APEX se tomó del modelo EPIC. Ambos modelos son continuos, se ejecutan normalmente en un paso de tiempo diario. EPIC, como modelo a escala de campo, está diseñado para simular áreas de drenaje que se caracterizan por parámetros homogéneos del clima, suelo, paisaje, rotación de cultivos y sistemas de gestión. La adaptación de APEX con los Sistema de información Geográfica (SIG) le permite, además de su ejecución a una versión multi-parcela o en parcelas individuales similares a las de EPIC, extenderse a toda una granja o cuenca considerando subdivisiones con base en tipos de suelo, posiciones del paisaje, o sub-cuencas (Williams *et al.*, 2006).

Las operaciones en APEX se realizan también a nivel diario y para simulaciones continuas de largo plazo, que pueden utilizarse para simular los efectos de diferentes nutrientes, prácticas de manejo, operaciones de cultivo, prácticas de conservación, sistemas de cultivos alternativos, y otras prácticas de manejo de la escorrentía superficial y las pérdidas de sedimentos, nutrientes, y otros indicadores de contaminantes (Williams *et al.*, 2006). APEX extiende las capacidades del modelo EPIC para simular procesos claves del paisaje en segmentos o unidades de paisaje, a través de los Sistemas de Información Geográfica, y conectadas hidrológicamente en subáreas, similar a SWAT, según el uso de la tierra, el suelo y la variabilidad de la gestión. En la cuenca se utilizó el modelo APEX y a continuación se incluyen algunas investigaciones que se han realizado con el modelo APEX.

Tripathi y Gosain (2013) realizaron un estudio en la microcuenca Dudhi (Adhya Pradesh, India) donde compararon el desempeño de los modelos SWAT y APEX. La modelación con SWAT y APEX se llevó a cabo de manera independiente, configurando los datos de entrada en forma individual. Los resultados indican que SWAT y APEX fueron capaces de replicar la variación de los escurrimientos observados para el periodo de estudio. SWAT subestimó el escurrimiento observado durante el periodo de flujo bajo. En contraste APEX sobreestimó el escurrimiento observado durante el periodo de flujo máximo y subestimó el escurrimiento observado durante los periodos de flujo bajo. En general el modelo APEX fue capaz de simular el escurrimiento con mayor grado de confianza que SWAT. Aunque ambos modelos pueden aplicarse para el manejo de cuencas hidrográficas, en el área de estudio, APEX tiene la ventaja de simular el balance hídrico con una mayor resolución espacial, es decir, a nivel parcela. Esta mayor resolución lo hace una herramienta más apropiada para analizar acciones de manejo de cuencas hidrográficas.

5.3. Modelo APEX

Con base en las opciones que ofrece el modelo APEX, para evaluar acciones de manejo a una mayor resolución, se optó por utilizar en la presente investigación con este modelo para simular la producción de biomasa en los terrenos de uso agrícola, pecuario y forestal de la cuenca de estudio. A continuación, se mencionan, en orden de aparición, diversas aplicaciones del modelo APEX reportadas en diversas partes de mundo.

5.3.1. Usos del modelo APEX

El modelo APEX fue diseñado para evaluar diferentes estrategias de manejo del suelo teniendo en cuenta la sostenibilidad, la erosión, aspectos financieros, el suministro y calidad del agua y calidad del suelo, la competencia entre plantas, el clima y el ataque de las plagas y enfermedades. El modelo fue desarrollado para predecir el impacto que causan las prácticas de manejo (para la conservación de suelo y agua, fertilidad), el clima, el tipo de suelo en la producción de biomasa (granos, fibras, frutos, forrajes, madera, leña, etc.) de una cuenca, subárea o parcela. Su uso se enfoca al campo de pequeñas cuencas para la evaluación de estrategias de manejo para diferentes usos

de tierra, considerando factores de sustentabilidad (erosión, calidad y abastecimiento de agua, calidad del terreno, competencia entre plantas, climas, uso de plaguicidas, etc.) y económicos (Gassman *et al.*, 2005).

El modelo de APEX es un modelo hidrológico capaz de desarrollar políticas agrícolas debido a que simula el manejo del impacto de uso de suelo a nivel parcelario y en pequeñas cuencas (Williams e Izaurralde, 2006). APEX además de identificar los componentes del balance hidrológico, permite evaluar el efecto del cambio climático y de carbono atmosférico, sobre el rendimiento de los cultivos (Williams *et al.*, 2006). También permite evaluar la aplicación de estiércoles y el seguimiento de otros contaminantes no puntuales en cuerpos de agua y para evaluar niveles de protección de franjas de amortiguamiento contra la contaminación (Saleh *et al.*, 2004).

Harman *et al.* (2004) informó que el modelo APEX simula varias combinaciones de prácticas de cultivo y manejo y sus efectos ambientales en una base de granja completa, que es una escala más grande de simulación, en comparación con el modelo EPIC que trabaja a nivel parcela. El modelo APEX se ha utilizado para evaluar los efectos de las políticas gubernamentales sobre el suelo (Farrand *et al.*, 2002, Harman *et al.*, 2004).

Otras aplicaciones, que APEX permite simular, están relacionadas con generación de escenarios de manejo para el movimiento de animales entre potreros (Kumar *et al.*, 2011), tratamientos dasonómicos en cuencas forestales y prácticas de conservación en los sistemas lacustres (Wang *et al.*, 2007).

5.3.2. Casos de estudio

APEX es una herramienta versátil para analizar diferentes alternativas tecnológicas para las áreas agrícolas, potreros con praderas, reforestaciones comerciales, y establecimiento de franjas de amortiguamiento en las riberas de los cauces; aplicaciones importantes para evaluar escenarios a nivel de comunidad en la toma de decisiones.

Wang *et al.* (2006a) utilizaron APEX para evaluar la producción de escurrimiento y sedimentos diarios en tres parcelas ubicadas en la cuenca del río Huaihe, China. El objetivo del estudio fue analizar el desempeño de APEX para simular la escorrentía diaria y el rendimiento de sedimentos en parcelas con tratamientos de 1) barbecho (parcela de control), 2) pastos mixtos con terrazas horizontales, y 3) bosques con zanjas horizontales. Los pinos, pastizales y álamos se simularon utilizando los parámetros fisiotécnicos preexistentes en el archivo de parámetros de cultivo de APEX. Se simuló la siembra de los árboles y pastizales y se asumió un crecimiento continuo para el resto del período de simulación. Se utilizó la rutina de evapotranspiración de Hargreaves para la simulación de las tres parcelas. Los efectos de las prácticas de conservación (terrazas y zanjas a nivel) se evaluaron mediante la calibración del factor de prácticas de control de la erosión de USLE. Los resultados mostraron que las variaciones individuales en los valores observados fueron razonablemente explicadas por APEX. Los resultados de la calibración y la validación sugieren que APEX es una herramienta útil para evaluar el manejo de escurrimiento superficial y la pérdida de suelo para diferentes prácticas de manejo. Los resultados indican que las terrazas individuales, las zanjas a nivel, la reforestación, y la revegetación pueden ser muy eficaces en el control de la escorrentía superficial y la producción de sedimentos en la región. El bosque con zanjas a nivel redujo en 37% la escorrentía superficial y en 89% la producción sedimentos, respecto a la condición de base. Las terrazas a nivel con vegetación mixta de pasto y madera redujeron 35% la escorrentía superficial y 84% la producción sedimentos.

Wang *et al.* (2006b) calibraron el modelo APEX para investigar los efectos de la erosión del suelo asociados con los usos alternativos del suelo en la cuenca Zi-Fang Gully en el noroeste de China. El modelo fue calibrado razonablemente bien ($\pm 15\%$ de errores) para ajustarse en pendientes, dentro de la cuenca, superiores al 50%. Los resultados sugieren que la reforestación es la mejor práctica, entre los ocho usos alternativos de la tierra, para el control del escurrimiento del agua y erosión del suelo. Sin embargo, en pendientes pronunciadas los pastos son menos eficaces que los árboles para el

control de la escorrentía y la erosión ya que estos últimos tienen generalmente sistemas de radicales más profundos y estables. La construcción de un embalse fue la estrategia más eficaz para el control de la producción de sedimentos sin embargo no impacta en nada el control de la erosión en las tierras altas. Es este estudio encontraron que las especies herbáceas son menos efectivas que los árboles para el control de la erosión en pendientes pronunciadas, ya que los árboles generalmente tienen sistemas radiculares más estables. Se observó que los rendimientos para los cultivos simulados y para los de biomasa en arbustos y árboles tuvieron una diferencia, respecto a los valores observados, cercana al 5%.

En el año 2007, Saleh y Gallego simularon flujo y carga de sedimentos en Texas para la cuenca del río Bosque, utilizando SWAT, APEX y SWAPP, siendo este último un proceso que inicia con los archivos creados por el programa AVSWAT y termina con la obtención de un archivo *rch*. A lo largo de este proceso intervienen 4 etapas para la obtener este archivo final, que contiene los resultados de simulación combinados entre SWAT y APEX. Los resultados obtenidos indican que el programa SWAPP no solamente mejoró los resultados de la modelación, sino que brindó una oportunidad para utilizar APEX sin el programa SWAPP para simular obras de manejo como policultivos o filtros en bandas a nivel de campo, ya que SWAT tiene una capacidad limitada para simular estas prácticas. Asimismo, Saleh y Gallego (2007) observaron que el modelo APEX fue capaz de simular escenarios de manejo tales como cultivos alternos o fajas filtrantes a nivel parcelario mientras que SWAT tuvo una capacidad limitada para simular estas mismas prácticas.

Wang *et al.* (2008) utilizaron el modelo APEX dos cuencas cultivadas con maíz (*Zea mays* L.) y manejada con - labranza convencional y labranza de surcos. El modelo fue capaz de replicar, con un 6% de error, los escurrimientos y la producción de sedimentos. El porcentaje de error entre los rendimientos de grano de maíz, simulado y observado, varió entre -5.3 % y -2.7 % para un período de simulación de 20 años. El beneficio de largo plazo, de la labranza en surcos, respecto a la labranza convencional, en la reducción de la escorrentía superficial fue de entre 36 y 39%, en

la reducción de la producción de sedimentos entre 82 y 86 % y en maíz hubo un aumento en el rendimiento de grano del 3.8 %. Los resultados de este estudio indican que APEX tuvo la capacidad de predecir las diferencias entre los dos sistemas de labranza. Con base en los resultados de escurrimiento superficial, producción de sedimentos, rendimiento de cultivos de grano y carbono orgánico del suelo, Wang *et al.* (2008) observaron que el modelo APEX fue bueno para estimar la respuesta a largo plazo de los diferentes sistemas de labranza. Por lo que, concluyeron que APEX puede aplicarse con éxito para evaluar los impactos de los diferentes sistemas de labranza analizados.

Kumar *et al.* (2008) realizaron una simulación de pérdidas por escorrentía en sedimentos en cuencas hidrográficas con pastos utilizando zonas de amortiguamiento agroforestales. El objetivo principal de la investigación se centró en calibrar, validar y simular pérdidas por escorrentía y sedimentos y comparar los efectos de amortiguamiento en las zonas no puntuales de contaminación, de las pérdidas en relación con el control de las cuencas hidrográficas (sin buffer) durante siete años. El diseño experimental consistió de cuatro cuencas con manejo de pasturas, monitoreadas entre 2002 y 2008, dos con buffers agroforestales y dos cuencas de control. El modelo fue calibrado con APEX entre 2002 y 2005 y validado entre 2006 y 2008. El estudio analiza Buffers agroforestales en las cuencas a través de pastos pastoreados con el fin de reducir la escorrentía y la pérdida por sedimentos, en comparación con las cuencas hidrográficas el control. El modelo no predijo la pérdida de sedimentos muy bien, probablemente a la insuficiencia de eventos medidos y baja pérdida de sedimentos aforados.

Tuppad *et al.* (2010) aplicaron el modelo APEX en una cuenca de 28,000 ha, en Texas, para evaluar distintas BMPs incluyendo la siembra de pastos, manejo de fertilización, manejo de arbustos, aclareo y resiembra, pastoreo prescrito, plantación en áreas críticas, labranza de conservación, siembra al contorno, terraza, jagüeyes, estructuras de estabilización, y cauces empastados. El objetivo principal fue evaluar los efectos a largo plazo de las BMP, tanto en parcelas como en las subcuencas, sobre el

escurrimiento superficial, los sedimentos y la pérdida de nutrientes. Los impactos de las BMP en la calidad del agua variaron dependiendo del tipo de práctica y su ubicación en el paisaje. Este estudio también mostró que la reducción en el sedimento, a la salida de la cuenca, era proporcional a la zona tratada con BMPs.

Bosch *et al.* (2011) calibraron y validaron con APEX la escorrentía de agua y de herbicidas en una llanura costera del Atlántico Sur de EUA. Específicamente, el modelo se utilizó para simular nutrientes, pesticidas y sedimentos para prácticas agrícolas basadas en encuestas nacionales del periodo 2003-2006, para algunos puntos, del Inventario Nacional de Recursos (NRI). Un segundo conjunto de simulaciones evaluó las pérdidas de contaminantes después de eliminar las prácticas de conservación existentes. Al comparar estos dos escenarios se evaluó el impacto de las prácticas en los niveles de carbono orgánico del suelo, los nutrientes, los sedimentos, y las pérdidas de pesticidas de los campos agrícolas, así como el impacto de las descargas a las cuencas fluviales. Al igual que todos los modelos, la calibración de APEX fue necesaria para mejorar la precisión de la simulación. Con este fin, las simulaciones hidrológicas y las pérdidas de pesticidas se compararon con los valores medidos en parcelas de investigación del Servicio de Investigación Agrícola del USDA. El desempeño de APEX para la escorrentía mensual fue satisfactoria y esta siguió las tendencias observadas; aunque APEX sobreestimó significativamente la escorrentía, en general el escurrimiento anual simulado coincidió con la tendencia y valores observados. Las estadísticas indican que APEX fue capaz de simular satisfactoriamente los escurrimientos asociados a la labranza en las parcelas analizadas. El estudio concluye que la labranza de conservación tiende a disminuir significadamente el escurrimiento del agua y las pérdidas de pesticidas.

Kumar *et al.* (2011) calibró, validó el modelo APEX para simular los escurrimientos y la producción de sedimentos, en cuencas con manejo de densidad de pastoreo, y comparar los efectos de las fajas de amortiguamiento (*buffers*) en la reducción de sedimentos. El tratamiento consistió de dos cuencas con buffers agroforestales y dos cuencas de control. Las áreas de pastos incluían trébol rojo (*Trifolium pretensión* L.) y

lespedeza (*Kummerowia stipulacea Maxim.*) con festuca (*Festuca arundinacea Schreb.*), mientras que el búfer agroforestal incluyó álamos Oriental (*Populus deltoideo Bortr. ex Marsh.*) con festuca. Los valores de r y NSE para los periodos de calibración y validación para el escurrimiento variaron de 0.52 a 0.78 y de 0.50 a 0.74, respectivamente. El escurrimiento y los sedimentos fueron 57% y 95%, respectivamente, más altos para las cuencas de control en comparación con las cuencas con agroforestería. Para un escenario de 10 años y doble de ancho del búfer el escurrimiento simulado disminuyó un 24%. El escurrimiento simulado de las cuencas de control fue 11% más alto, con el doble de densidad de carga animal (relativo a la densidad de los aforos), comparado con las cuencas agroforestales, también con el doble de carga animal. Con la mitad de densidad animal (relativo a la densidad de los aforos), las cuencas con agroforestería tuvieron 18% menos escurrimiento comparado con las cuencas de control. Los resultados de este estudio indican que los buffers agroforestales y la disminución de la carga animal en los pastizales reducen los escurrimientos y sedimentos.

Tripathi y Gosain (2013) aplicó los modelos SWAT a APEX en la India para evaluar planes de manejo. Observaron buenas correlaciones entre los aforos observados y simulados con ambos modelos. Sin embargo, APEX simuló de mejor forma los escurrimientos que SWAT a nivel de microcuenca. Aunque ambos modelos pueden ser aplicados en el manejo de cuencas, APEX tiene la ventaja de modelar el balance hídrico con mayor resolución espacial (nivel parcelario); lo que lo hace una herramienta más apropiada para su uso a nivel de microcuenca.

En el año 2014, Golmohammadi *et al.* evaluaron el desempeño de APEX, SWAT y MIKE-SHE para simular la hidrología de la cuenca Canagagigue localizada en la cuenca del Río Grande en el sur de Ontario, Canadá. Los tres modelos se calibraron por un periodo de 4 años y se validaron comparando los valores simulados y los valores con registros diarios, mensuales y anuales de flujo. Los tres modelos tuvieron un buen ajuste de calibración; ya que, acorde con Moriasi *et al.* (2014), un modelo se considera calibrado si el flujo presenta una eficiencia de Nash-Sutcliffe mensual mayor o igual a 0.65, un

porcentaje de sesgo menor o igual a 10% y una relación de desviación estándar menor a 0.6.

Cavero *et al.* (2012) reportan que el modelo APEX fue calibrado y validado en tres cuencas, cuya superficie oscila entre 4,013 a 10,971 hectáreas, esta calibración se realizó con 2 años de observaciones y se validó con el tercer año, simulando adecuadamente la evapotranspiración de los cultivos.

En 2015, el modelo APEX fue aplicado en Matson Ditch, subcuenca del río St Joseph, en el estado de Indiana, para identificar el impacto en calidad del agua y la producción de biomasa en terrenos marginales. En el trabajo se reporta, en dos de los escenarios simulados, que la producción de biomasa reduce la producción de agua en la cuenca de 13.4% a 36.3% (Feng *et al.*, 2015). En esta misma cuenca, Francesconi *et al.* (2015) reportan que el modelo APEX, previamente calibrado y validado se aplicó para simular el efecto de las prácticas de conservación solas y combinadas. Para las prácticas solas se observaron reducciones de hasta 39% para la producción de sedimentos y de 68 y 91% para dos y tres prácticas combinadas, respectivamente.

De acuerdo con Moriasi *et al.* (2016) al aplicar el modelo APEX, en una subcuenca de la cuenca Upper Big Walnut Creek en Ohio, los parámetros más sensibles que afectaron la producción de agua en la simulación fueron, en orden de importancia: 1) Coeficiente de evapotranspiración potencial de Hargreaves, 2) Factor de cobertura vegetal, 3) Exponente de la ecuación de evapotranspiración potencial de Hargreaves, 4) Conductividad hidráulica del sistema de drenaje lateral, 5) Parámetro de ajuste de residuos de escurrimiento de curva numérica, 6) Coeficiente de intercepción de la precipitación, 7) Abstracción inicial del número de curva, 8) Coeficiente del número de curva, 9) Coeficiente exponencial en las intensidad de la precipitación en la curva numérica y 10) Resistencia del suelo al crecimiento de la raíz.

De la revisión bibliográfica podemos concluir que el modelo APEX ha mostrado buenos resultados para simular diferentes prácticas de manejo y para identificar el impacto de estas en la producción de biomasa, escurrimientos y erosión del suelo. En general los

trabajos no mencionan problemas para la entrada de los datos debidos que estos generalmente se encuentran disponibles.

5.4. Componentes del modelo APEX

El modelo consta de 12 componentes principales: clima, hidrología, crecimiento de cultivo, destino de los plaguicidas, ciclo de nutrientes, erosión-sedimentación, ciclo del carbono, prácticas de manejo, temperatura del suelo, control del entorno de la planta, valoración económica y subáreas/ tránsito. La parte de manejo incluye riego por goteo, por aspersión, por surcos, drenaje, diques en surcos, franjas de protección, terrazas, canales, fertilización, manejo del estiércol, lagunas, embalses, rotación de cultivos, cultivos de cobertura, remoción de biomasa, aplicación de agroquímicos, pastoreo y sistemas de labranza (Gassman *et al.*, 2010). APEX tienen componentes para transitar, a través de los cauces, los escurrimientos, los sedimentos, los nutrientes y plaguicidas hasta la salida de una cuenca, estación de aforo, acuífero y/o embalse. Está diseñado para dividir una cuenca hidrográfica y asegurar que cada sub-cuenca sea relativamente homogénea en términos de suelos, uso del suelo, manejo y clima.

Para simular con APEX una explotación agrícola o una cuenca, primero el área de trabajo ha de ser subdividida en varias subáreas, relativamente homogéneas en términos de suelo, pendiente, uso del suelo, manejo y clima. La interfaz SIG ArcGIS APEX (ArcAPEX) (Tuppad *et al.*, 2010) se puede utilizar para definir los límites de las subáreas. El usuario también puede definir manualmente las subáreas utilizando el procedimiento descrito por Steglich y Williams (2008).

5.3.1. Descripción general

Conceptualmente APEX es un modelo hidrológico-productivo que representa un sistema real, bajo parámetros físicos o matemáticos que conforman el ciclo hidrológico y el crecimiento de las coberturas vegetales. Este modelo permite simular los fenómenos físicos que condicionan el desarrollo vegetal a corto, mediano y largo plazo, de tal forma que se puede entender de mejor forma las relaciones e interacciones que realizan las plantas con el ciclo hidrológico y la degradación de los suelos.

Los modelos hidrológico-productivos, como APEX, permiten la predicción de escenarios de cambio que pudieran ocurrir en una cuenca. Para su operación necesitan alimentarse de variables climáticas, topográficas, tipos de suelo, uso del suelo, fisiotecnia de las coberturas vegetales, tipo de manejo cultural (labranza, rotación de cultivos, fertilización), y prácticas de manejo del suelo. (Gassman *et al.*, 2010.)

Williams *et al.* (1995) proporcionan la primera descripción cualitativa de APEX, que incluye una descripción de los principales componentes del modelo, incluido el componente de manejo de estiércoles. Una descripción más amplia del modelo es presentada por Williams (2002) y Williams *et al.* (2006), en este último proporciona una visión general de la erosión del estiércol y de los componentes de tránsito y su descripción matemática. Williams y Izaurre (2006) proporcionan una exhaustiva descripción cualitativa del modelo acoplado con la teoría matemática para varios de sus componentes.

APEX ha sido desarrollando, desde 1992, por la USEPA (*U.S. Environmental Protection Agency*) a través del rediseño de los modelos SWAT y EPIC (Gassman *et al.*, 2005). Específicamente Arc-APEX es una versión, ambiente SIG, del modelo EPIC. APEX, en su versión Arc-GIS, permite simular el manejo agrícola a nivel parcelario, comunidad, comunidades o pequeñas cuencas que se pueden subdividir en base a parcelas, tipos de suelo, posiciones del paisaje, o sub-cuencas. El modelo permite simulaciones a nivel diario o llevar a cabo simulaciones continuas a largo plazo (Gassman *et al.*, 2010).

El código APEX está escrito en FORTRAN y puede ser ejecutado tanto en ordenadores personales y plataformas UNIX. El principio básico de funcionamiento interno de APEX, desde el punto de vista de las bases teóricas, es el balance hidrológico diario y aunque su intervalo de tiempo de cálculo es diario, el software también genera reportes mensuales y anuales.

5.3.2. Clima

Los datos climáticos se pueden introducir a partir de mediciones registradas o generados internamente por el mismo modelo. Para la generación de datos climáticos

y para otros procesos estocásticos se requieren estadísticas mensuales de clima para simular la biomasa en APEX.

Datos climáticos

El clima proporciona las entradas de humedad y energía al sistema, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Este componente requiere datos precipitación, temperatura tanto máxima como mínima, y radiación solar para el cálculo de la producción de biomasa. También requiere la velocidad del viento y humedad relativa para el cálculo de evapotranspiración y erosión eólica. La precipitación puede esquematizarse espacialmente en aplicaciones de cuencas que cubren áreas grandes y/o regiones con fuertes gradientes de precipitación.

Generador climático

Para la generación de escenarios de manejo y climáticos, los valores diarios del clima pueden sintetizarse un conjunto de datos del tiempo, través de valores promedios mensuales, para cada sub-cuenca. Los valores para cualquiera de las sub-áreas o sub-cuencas son generados independientemente, es decir, no habrá correlación espacial de valores entre las diferentes subdivisiones. El generador climático de APEX también puede ser utilizado para complementar los datos faltantes en los registros medidos.

Dado que no siempre se cuenta con datos suficiente para alimentar el modelo, APEX proporciona opciones para simular diversas combinaciones de las cinco variables meteorológicas (precipitación, temperatura, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa):

- A. Las cinco variables pueden ser generadas: específicamente, la precipitación puede ser simulada de manera uniforme sobre la cuenca o distribuida espacialmente.
- B. Todas las variables son introducidas. Las entradas pueden provenir de una estación meteorológica que represente toda la cuenca o de varias estaciones, cada una representando diferentes subáreas.

C. En algunas variables pueden ser generadas y otras introducidas. En este caso la precipitación debe ser siempre proporcionada.

A nivel diario, la precipitación se sintetiza con base en el modelo basado en un modelo de la cadena de Markov de primer orden desarrollado por Nicks (1974), mismo que utiliza en el generador de tiempo CLIGEN (Nicks *et al.*, 1995; Meyer *et al.*, 2008). Para definir un día como húmedo o seco, el modelo de cadena inicia comparando el número ingresado por el usuario, con un valor aleatorio entre 0.0 y 1.0; proceso que continua todos los días del mes, pero ajustándose al valor de probabilidad húmedo-secas mensuales previamente definido para ese mes. En caso de que un día específico se clasifique como húmedo, entonces la cantidad de precipitación se ajusta a una distribución sesgada o una distribución exponencial modificada, pero su vez procurando que la serie diaria se ajuste a la lluvia media mensual.

La temperatura del aire y la radiación solar se extraen utilizando una aproximación multivariada con base en una distribución normal (Richardson, 1981). La generación de los datos de viento en APEX se basa en el modelo conocido como *Wind Erosion Continuous Simulation* (WECS) (Potter *et al.*, 1998), el cual requiere de la velocidad media diaria del viento y su dirección dominante. La humedad relativa media diaria se estima a partir del valor mensual promedio tabulado utilizando una distribución triangular. A través de una ecuación de continuidad el generador ajusta las variaciones de temperatura y radiación causadas por condiciones secas y lluviosas. La temperatura aérea máxima y la radiación solar se ajustan hacia abajo al simular condiciones lluviosas y hacia arriba para condiciones secas. Los ajustes permiten que los valores generados a largo plazo, para un promedio de temperatura máxima mensual y radiación solar mensual, concuerden con los promedios de entrada.

5.3.3. Suelos

Con el propósito de conocer las propiedades físicas y químicas de los suelos en las áreas agrícolas de ladera y en los agostaderos, para su uso en APEX, es necesario

realizar un muestreo en los principales tipos de suelo presente en las parcelas y a diferentes profundidades del perfil.

Temperatura del suelo

La temperatura del suelo se simula para servir como entrada a los componentes del ciclo de nutrientes, crecimiento de raíces, el movimiento del agua en el suelo y la tasa de decrecimiento de los residuos de cosecha. La temperatura diaria promedio del suelo se calcula en la superficie del suelo y en el centro de cada capa de suelo. La temperatura de la superficie del suelo es una función de la cobertura de nieve, la cobertura de planta y residuos, la temperatura en la superficie descubierta de suelo, y la temperatura en la superficie del suelo del día anterior. La temperatura de una capa de suelo es una función de la temperatura en la superficie, de la temperatura aérea media anual y la profundidad en el suelo donde se da una variación en la temperatura debido a los cambios en las condiciones climáticas que ya no ocurren. Esta profundidad, referida como la profundidad húmeda, es dependiente de la densidad bruta y el contenido de agua del suelo.

Ciclo del carbono

Estas rutinas estiman el carbono en el suelo como una función de las condiciones climáticas, las propiedades del suelo y las prácticas de manejo. El modelo simula el almacenamiento de carbono y nitrógeno en los residuos de cosecha, en la biomasa metabólica y en las acumulaciones de humus del suelo. La interacción entre acumulaciones se simula tomando como en cuenta la humedad del suelo, la temperatura, la erosión, la labranza, la densidad del suelo, la lixiviación y las funciones de translocación.

Erosión hídrica

APEX calcula la erosión hídrica en respuesta a las precipitaciones, eventos de deshielo y/o escurrimiento de los excesos de riego. El modelo dispone de ocho ecuaciones diferentes para calcular la erosión hídrica (Williams *et al*, 2008): el método Universal

de Pérdida de Suelos Ecuación (USLE) (Wischmeier y Smith, 1978); el método de Onstad y Foster (AOF), el cual en una modificación de la USLE (Onstad y Foster, 1975); el método de la USLE modificada (MUSLE) (Williams, 1975); tres variantes de MUSLE descritos por Williams (1995), que se conocen como MUST (versión teórica), MUSS (versión pequeña cuenca), y MUSI (enfoque que utiliza coeficientes de entrada); el método de la USLE revisado (RUSLE) (Renard *et al.*, 1997); y RUSLE2 (USDA-ARS, 2005). Múltiples ecuaciones se pueden activar durante una simulación, pero sólo una interactúa con otros componentes de APEX, según especifique el usuario. Las ocho ecuaciones son similares a excepción de sus componentes de energía. La USLE y RUSLE depende estrictamente de la precipitación como un indicador de energía erosiva. Mientras que MUSLE y sus variantes usan variables de la esorrentía para simular la erosión y la producción de sedimentos. Las variables de esorrentía aumentan la precisión de la predicción, eliminan la necesidad de una relación de distribución (utilizado en la USLE para estimar producción de sedimentos), y permite a la ecuación, para una sola tormenta, dar las estimaciones de producción de sedimentos. La USLE sólo da estimaciones de manera anual. La ecuación Onstad-Foster contiene una combinación de los factores energéticos USLE y MUSLE. La RUSLE proporciona métodos mejorados para el cálculo del factor de cobertura del cultivo y el factor de longitud de la pendiente; especialmente para pendientes pronunciadas. Mientras USLE toma la lluvia como indicador de energía erosiva, MUSLE utiliza el escurrimiento (lámina y caudal) para simular la producción de sedimentos, como se muestra a continuación.

$$sed = 11.8(Q_{sup}q_{pico}A_{HRU})^{0.56}K_{USLE}C_{USLE}P_{USLE}LS_{USLE}CFRG$$

Donde, Q_{sup} es el escurrimiento superficial (mm); q_{pico} es el caudal promedio del escurrimiento máximo (m^3s^{-1}); A_{HRU} es el área de la subarea (km^2); K_{USLE} es el factor de erodabilidad del suelo USLE; C_{USLE} es el factor de cobertura y manejo USLE; P_{USLE} es el factor de prácticas de conservación USLE; LS_{USLE} es el factor de topografía; y $CFRG$ es el porcentaje de pedregosidad.

Erosión eólica

La erosión eólica real se calcula en base a ajustes a la erosión potencial a través de factores que consideran los efectos de las propiedades del suelo, rugosidad de la superficie, cubierta vegetal, y distancia a través del campo en la dirección del viento. El modelo de erosión eólica originalmente utilizado en EPIC fue la Ecuación de Erosión Eólica (WEQ) (Williams, 1995) y en APEX ha sido sustituido por el enfoque WECS (Potter *et al.*, 1998). La WECS estima a nivel diario la erosión del viento, para un suelo liso desnudo, mediante la integración sobre el día de la función de distribución de la velocidad del viento introducida.

5.3.4. Balance hídrico

El componente hidrológico de APEX analiza el movimiento del agua en una cuenca a través de variables como precipitación, volumen de escurrimiento superficial, flujo sub-superficial, percolación y evapotranspiración (Williams e Izaurre, 2006). Este componente abarca los procesos clave del ciclo hidrológico y simula volúmenes de escurrimiento superficial y tasas de esorrentía pico, dadas las cantidades de lluvia diaria. Inicialmente, la precipitación entrante puede ser interceptada por el dosel de las plantas, luego la precipitación, el agua del deshielo, y/o el agua de riego se reparten entre la esorrentía superficial y la infiltración. El agua infiltrada se puede almacenar en el perfil del suelo, parte percolarse verticalmente hasta alcanzar las aguas subterráneas, y parte perderse a través de la evapotranspiración, o desplazarse lateralmente en el subsuelo o en el flujo del drenaje. Las fluctuaciones en la profundidad del nivel freático son simuladas para notar los efectos del flujo de retorno en los drenes o cauces.

Escurrimiento superficial

La lámina de escurrimiento superficial se puede estimar en APEX con dos métodos diferentes: una, la modificación de la técnica del número de curva de escurrimiento

(CN) de USDA, Natural Resources Conservation Service (NRCS), descrita por Williams (1995), y otra, la ecuación de infiltración de Green & Ampt 1911 (Williams *et al.*, 2012).

Pese a sus asunciones empíricas, la técnica de curvas numéricas se considera como una técnica confiable, es computacionalmente eficiente, ya que los datos de precipitación diaria (cada 24 horas) que utiliza son fácilmente disponibles en las estaciones climáticas del país y los cálculos con datos diarios son más eficientes que aquellos provenientes de intervalos más cortos. Así, modelos de simulación como el WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) o Kineros (*Kinematic Runoff and Erosion*), usados en el manejo de cuencas con formulaciones teóricas más robustas, requieren de datos de intensidad de lluvia que generalmente no están disponibles en la mayoría de las cuencas.

Dada la incapacidad de la técnica de la curva numérica para dar cuenta de la intensidad de las precipitaciones y la infiltración, APEX incluye una opción para distribuir exponencialmente la precipitación diaria, con parámetros generados estocásticamente, y proporcionar intensidades necesarias para la ecuación de Green & Ampt 1911 (derivado de la ecuación de Darcy)

El cálculo del escurrimiento, según la técnica de las curvas numéricas propuesto por el *U.S. Soil Conservation Service, SCS* (1972), emplea la ecuación siguiente:

$$Q_t = \frac{(P_t - I_a)^2}{P_t - I_a + S_t}$$

Donde: Q_t es el escurrimiento del día t (mm); P_t es la precipitación total del día t (mm); I_a es la abstracción inicial antes de que el suelo se sature (mm); S_t es la retención potencial máxima del día t (mm).

Después de diversos estudios realizados, el SCS determinó una relación empírica en la que I_a es equivalente a $0.2 S$, situación que transforma la ecuación a la siguiente expresión:

$$Q_t = \frac{(P_t - 0.2S)^2}{P_t + 0.8S_t}$$

Donde: Q_t es el escurrimiento del día t (mm); P_t es la precipitación total del día t (mm); S_t es un parámetro de retención del día t (mm).

La ecuación utiliza un solo parámetro (S_t), que es función de la humedad antecedente y del tipo, uso y manejo del suelo en consideración. El valor de S_t varía entre cero y un valor indeterminado, que en principio puede ser muy grande, y suele cambiarse por otro parámetro adimensional y estandarizado, CN, que varía entre cero y 100 cuando S_t es muy grande y cero, respectivamente, de acuerdo con la relación:

$$CN = \frac{25400}{S_t + 254}$$

Donde CN es igual al valor del nuevo parámetro.

Para la estimación del parámetro de retención de CN se proporcionan dos opciones adicionales. La primera basada en la humedad del suelo y la segunda en función de la evapotranspiración. La opción de parámetro de retención alternativo, en función de la evapotranspiración, fue descrito por Kannan *et al.* (2007) y Wang *et al.* (2009) y puede dar lugar a estimaciones más precisas de escorrentía para algunas condiciones y coberturas del suelo.

Caudal pico

Para cada tormenta APEX estima el caudal pico para el cálculo de la erosión. Este caudal puede estimarse utilizando el método modificado de la fórmula racional del USDA-NRCS (Williams, 1995) en función de la intensidad de la precipitación y otros factores. El método racional supone que si una lluvia de intensidad i comienza en el tiempo $t=0$ y continúa indefinidamente, el escurrimiento se incrementará hasta alcanzar el tiempo de concentración de la cuenca, $t=t_{conc}$, cuando el área total de la cuenca contribuye al flujo de salida. Para simular el escurrimiento máximo, el modelo aplica el método racional modificado:

$$q_{pico} = \frac{\alpha_{tc} Q_{sup} A}{3.6 t_{conc}}$$

Donde: q_{pico} es la tasa promedio de escurrimiento máximo (m^3s^{-1}); α_{tc} la fracción de lluvia que ocurre durante el tiempo de concentración; Q_{sup} el escurrimiento superficial (mm); t_{conc} el tiempo de concentración del escurrimiento (h); 3.6 es un factor de conversión de unidades; y A es el área de la cuneca (km^2).

Flujo subsuperficial

El flujo subsuperficial se calcula como una función tanto de los flujos subsuperficiales verticales y horizontales. Simultáneamente, el cálculo de los flujos subsuperficiales verticales y horizontales se lleva a cabo en el modelo, usando ecuaciones de flujo en tubificaciones.

Percolación

La percolación, identificada como la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona de raíces, en APEX esta zona la considera desde cero a dos metros de profundidad. El cálculo de la percolación se realiza a través de capas sucesivas de suelo utilizando un enfoque de tránsito de almacenamiento en función de parámetros físicos del suelo, incluyendo la capacidad de campo (máxima capacidad de retención de agua del suelo), la conductividad hidráulica saturada, y su porosidad. El flujo de agua de una capa de suelo superior a la siguiente se produce cuando el contenido de agua de la primera capa supera su capacidad de campo y continúa desde esa capa hasta que su contenido de agua alcanza nuevamente la capacidad de campo. El agua de percolación puede llegar hasta los canales de drenaje (flujo de retorno) o llegar a los acuíferos profundos a más de 25 metros, donde no alimenta el escurrimiento, pero si alimenta la recarga del acuífero. El componente de percolación usa una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa de suelo.

Este proceso continúa hasta que el flujo alcanza el almacenamiento de agua en el subsuelo, que puede perder agua debido a la percolación profunda del sistema general y también volver al canal de flujo de corriente. El movimiento del agua hacia arriba desde una capa de suelo también puede ocurrir cuando el contenido de agua en el suelo de la capa inferior es superior a la capacidad de campo mientras que el contenido de agua del suelo de la capa superior es menor que la capacidad de campo. En suelos congelados, el agua puede filtrarse en una capa congelada, pero no puede filtrarse a una capa inferior.

Flujo lateral

El flujo horizontal se divide en flujo de retorno lateral y flujo de retorno rápido. El flujo subsuperficial lateral entra en la subárea, inmediatamente aguas abajo, y se añade al almacenamiento de agua en el suelo de esa subárea. El flujo de retorno rápido se añade al flujo de cauce de la subárea. El flujo de agua en los sistemas de drenaje artificiales se simula como una modificación del flujo lateral subsuperficial. Los cálculos de los sistemas de drenaje se efectúan en función de su profundidad y el tiempo requerido por el sistema de drenaje para reducir el estrés de los cultivos debido a los excesos de agua en el perfil del suelo.

Evapotranspiración

APEX proporciona cinco opciones para la estimación de la evaporación potencial: Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), Penman (1948), Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972), Penman-Monteith (Monteith, 1965), y Baier-Robertson (Baier y Robertson, 1965). La evaporación Potencial del agua del suelo se estima como una función de la evaporación y el Índice de Área Foliar potencial (LAI), el cual relaciona el área de hojas de la planta con el área de la superficie del suelo. La evaporación real del agua en el suelo se estima mediante el uso de las funciones exponenciales de profundidad del suelo y contenido de humedad (Williams *et al.*, 1989). La evapotranspiración de la planta se estima como una función lineal de la evaporación potencial y el índice de área foliar.

Los métodos de Penman-Monteith y Penman son los que requieren mayor cantidad de datos como entrada: radiación solar, la temperatura del aire, velocidad del viento y humedad relativa. El método de Priestly-Taylor requiere, como datos de entrada, radiación solar y temperatura del aire, mientras que los métodos de Hargreaves y Baier-Robertson solamente requieren la temperatura del aire. El método Baier- Robertson fue desarrollado en Canadá y puede proporcionar estimaciones más precisas de evapotranspiración potencial en climas fríos. APEX calcula la evaporación de suelos y plantas por separado, como se describe por Ritchie (1972).

5.3.5. Crecimiento de las plantas

APEX utiliza un modelo de crecimiento único, basado en EPIC (Williams *et al.*, 1989), para la simulación de cultivos anuales y perenes. Este modelo de crecimiento de la planta valora el consumo de agua y nutrientes de la zona radicular, la transpiración y la producción de biomasa. El submodelo de crecimiento del cultivo simula el potencial de crecimiento diario de los cultivos anuales y perennes, árboles y otras plantas (hasta diez plantas en un lote mixto). También simula el crecimiento real limitado por estrés por insuficiencia de agua, temperaturas extremas, carencia de nutrientes y problemas de aireación radicular; todo esto basado en el modelo EPIC. Este submodelo calcula el crecimiento potencial, el consumo de agua, la absorción de nutrientes, la competencia entre plantas y la dormancia invernal.

El desarrollo fenológico del cultivo se basa en la acumulación diaria de unidades calor. Los cultivos anuales crecen a partir de la fecha de siembra hasta la fecha de la cosecha, o hasta que las unidades de calor acumuladas igualen las unidades de calor potenciales de un determinado cultivo. Los cultivos perennes mantienen sus sistemas de raíces durante todo el año, aunque pueden llegar a ser inactivos después de las heladas. Ellos comienzan a crecer cuando la temperatura media diaria del aire es superior a su temperatura base. El modelo también es capaz de simular masas mixtas de hasta diez cultivos u otras plantas en un entorno competitivo. Los algoritmos de competencia de la planta fueron desarrollados originalmente para el modelo *Agricultural Land Management Alternatives with Numerical Assessment Criteria* (ALMANAC), (Kiniry *et*

al., 1992) y representan la competencia entre cultivos, malezas y otras plantas por la luz, agua y nutrientes.

APEX incluye una base de datos con los parámetros fisiotécnicos necesarios para definir las curvas de crecimiento de aproximadamente 100 diferentes cultivos y otras especies vegetales.

Índice de cosecha

Este índice se obtiene de muestras de campo y su valor nos indica la relación entre el peso seco del grano y del rastrojo. Para su determinación, se seca la planta en estufa, hasta 14% de humedad, y se pesa por separado el grano y el rastrojo. Un valor bajo de desviación estándar nos indica que no hay mucha variación fisiotécnica de los materiales genéticos.

5.3.6. Manejo de las plantas

El componente de manejo incluye drenaje, riego, fertilización, encalado y uso de plaguicidas; permitiendo al usuario definir las prácticas de manejo que suceden en cada área o parcela. El usuario puede definir el inicio y término de la época de cultivo, especificando tiempo y cantidades de fertilizante, dosis de plaguicida y láminas de riego, así como ciclo de duración del cultivo. Al final de la época de cultivo, la biomasa puede considerarse como extraída como rendimiento o incorporada al terrero como residuo. Adicionalmente a estas operaciones básicas de manejo, APEX permite operaciones automatizadas para fertilizantes y manejo del riego. El modelo también considera operaciones para la conservación de suelo y descargas de sedimentos y nutrimentos provenientes de áreas urbanas.

Labranza

EL componente de laboreo de APEX simula la altura del surco, rugosidad superficial, cambio en densidad aparente, transición de residuos en pie a residuos en pie a residuos tendidos, mezcla de capas de suelo, nutrimentos y residuos por cualquier operación de labranza. Silva (1995) menciona que APEX fue diseñado para mezclar nutrimentos y

restos de cultivo dentro de la profundidad de arado, simulando los cambios en densidad aparente y convirtiendo los residuos en pie en residuos caídos.

Riego

APEX da la opción de simular las zonas agrícolas de secano y riego. Presenta dos opciones de riego (aspersión o inundación), cuyas aplicaciones pueden ser programadas por el usuario (láminas de riego y fechas de aplicación) o definidas en forma automática, es decir, el modelo decide cuándo y la cantidad de agua por aplicar. La versión automática se basa en tres opciones: el nivel de estrés hídrico de las plantas (0-1), la tensión del agua de la capa del suelo (KPa), o el déficit hídrico en la zona radicular (mm). Para esta opción ha de conocerse la lámina máxima de riego para cada cultivo (mm), la fracción de escurrimiento, los volúmenes de aplicación única mínimo y máximo (mm), y el intervalo mínimo entre aplicaciones (días).

Fertilización

La aplicación de fertilizantes es similar al riego, la programación puede ser alimentada en forma automática o definida por el usuario. Los datos necesarios para la versión automática incluyen valores límites de estrés por nitrógeno (N) en la planta (0-1), N máximo anual aplicado a un cultivo (Kg ha^{-1}) y el tiempo mínimo entre aplicaciones (días).

Plagas

Las tres plagas consideradas por APEX son insectos, malezas y enfermedades de las plantas. Los efectos de insectos y enfermedades se expresan a través de un factor de plagas y los problemas de malezas son simuladas como cultivo de competencia. Los rendimientos de los cultivos se estiman al momento de la cosecha como el producto de rendimiento simulado y el factor plagas. El factor plagas varía de 0 a 1, donde 1 significa que no hay daños por plagas y 0 significa la destrucción total por plagas. El factor plagas se simula a nivel diario como una función de la temperatura, la humedad y la cobertura del suelo.

El pastoreo de ganado

Los atributos que identifican cada rebaño son tasa de consumo de forraje por cabeza (kg dia^{-1}), la eficiencia de pastoreo (responsable de los residuos por pisoteo, etc.), la tasa de producción de estiércol por cabeza (kg día^{-1}), la producción de orina por cabeza (l día^{-1}), y las fracciones solubles y orgánicas de N y P en el estiércol. Todas las zonas están identificadas por un número de propiedad, y cada propietario puede tener ganado y aves de corral. El propietario puede tener hasta diez hatos o grupos de animales. Sólo un hato puede ocupar una subárea en cualquier momento.

Todas las rotaciones de ganado, entre las sub-áreas, se realizan automáticamente por APEX dentro de los límites del usuario. Los sistemas complejos de pastoreo se crean mediante la indicación del número de cabezas en cada rebaño, su número de identificación (en orden de prioridad de pastoreo) con derecho a pastar cada sub-área, y un menor límite de pastoreo (biomasa aérea en t ha^{-1}). Los animales pueden ser confinados a un área de alimentación total o a una fracción de esta por día. El pastoreo puede ocurrir durante todo el año o pueden admitirse en determinados periodos. El pastoreo se detiene automáticamente cuando la sub-área alcanza el límite inferior de forraje. Si el propietario no tiene más zonas de pastoreo elegibles, entonces se presenta la opción que los animales permanecen en la zona sobre-pastoreando y se sume alimentación suplementaria. Esta forma de rotación del pastoreo continúa a través de la simulación. Así, el sistema de pastoreo proporciona flexibilidad para las condiciones de áreas de alimentación: confinadas, con confinamiento parcial, pastoreo rotacional intensivo y pastoreo de rastrojos después de la cosecha.

Manejo de estiércoles

APEX tiene la capacidad de simular la cantidad de estiércol presente en la escorrentía y la erosión del suelo. Los mecanismos de transito de APEX simulan el transporte de nutrientes solubles en agua, el transporte de nutrientes orgánicos por el sedimento y el transporte de estiércol por el agua. El modelo de manejo del estiércol es suficientemente flexible para simular una variedad de sistemas de alimentación en

confinamiento, animales en pastoreo, además de estiércol procedente de fuentes externas, teniendo como ventaja la inclusión de una gran variedad de estiércoles como el de ganado vacuno, porcino y aves de corral. Para estas especies son incluidos datos de su producción de estiércol diaria (Kg Cabeza^{-1}) y sus ingredientes (mineral y orgánica N y P).

La interfaz de APEX permite que el usuario pueda definir la aplicación de estiércol especificando un área de aplicación – proporción animal (ha cabeza^{-1}). Para cada subárea se especifica el número de animales dentro de la subárea, la cantidad anual de residuos generados por un animal y un número típico de aplicaciones de estiércol por año. El modelo estima el número de carga de estiércol seco de las aplicaciones de estiércol por año. El modelo estima la carga de estiércol seco basada en $9.3 \text{ Kg Cabeza}^{-1}$ (ASAE, 1998). Dados estos insumos las estimaciones de estiércol seco automáticamente.

El estiércol se puede aplicar en forma sólida o líquida. Los corrales de alimentación confinados pueden contener una laguna de oxidación para captar el agua de lavado de los patios. El modelo asume que la laguna está diseñada para manejar los volúmenes normales y máximos y que el efluente de la laguna es aplicado automáticamente a las parcelas designadas para la aplicación del estiércol líquido. El usuario especifica el intervalo en que el estiércol sólido es retirado de los corrales y almacenado para su aplicación a las parcelas designadas. Cuando se activa una aplicación se asume que la reserva es suficiente para abastecer la dosis de aplicación especificada. El estiércol es aplicado al campo con la concentración más baja de fósforo soluble en primeros 50 mm del suelo. El ganado bovino, porcino y aves de corral, se puede simular ya que la producción de estiércol y su composición mineral y orgánica (N y P) son entradas alimentadas o proporcionadas por APEX.

Componente de embalses

Un depósito puede ser colocado en la salida de cualquier subárea, el flujo de entrada se deriva de la subárea más todas las demás subáreas tributarias. Los embalses están

diseñados con vertedores principales y de emergencia para acomodar una variedad de estructuras.

Típicamente, la elevación del vertedor principal se fija en la parte superior de la laguna de sedimentos. La cantidad de almacenamiento de inundaciones está determinada por el volumen de almacenamiento entre los vertedores principales y de emergencia. Los sedimentos y nutrientes adjuntos y pesticidas se depositan en los embalses, pero los materiales solubles se consideran conservadores.

5.3.7. Componente de tránsito

El modelo APEX ofrece dos opciones para conducir el agua a través de cauces y llanuras de inundación; esto es, a través de un método de flujo medio diario y de inundación completa de corto tiempo respectivamente. Si el propósito principal es simular el movimiento del agua a largo plazo, los sedimentos, los nutrientes, los plaguicidas y los rendimientos de granjas integrales y cuencas pequeñas, entonces el método de flujo medio diario producirá estimaciones realistas por ser computacionalmente eficiente. Sin embargo, el método de inundación completa de corto plazo proporciona estimaciones de flujo de la corriente real y aumenta potencialmente la precisión en la estimación de transporte de contaminantes, especialmente cuando se simulan cuencas grandes.

Escurrecimientos

El método de inundación del Coeficiente de Almacenamiento Variable (VSC por sus siglas en inglés) (Williams, 1975) se utiliza para simular hidrogramas, para un tránsito de avenidas completo, con intervalos de tiempo cortos (típicamente 0.1 a 1.0 h). Los hidrogramas de los escurrecimientos de las subáreas son simulados y dirigidos aguas abajo, hacia de la salida de la cuenca. Este enfoque de inundación completa simula el flujo dinámico de la corriente, mientras que el método de flujo medio diario sólo puede estimar la producción de agua a nivel diario. Esta última característica es importante para cuencas con tiempos de concentración de flujo superiores a 0.5 días. También es importante en la estimación de los periodos, la duración de las inundaciones y la

capacidad de transporte de los contaminantes. Los hidrogramas de esorrentía por evento se simulan con una variación del método VSC llamada técnica de agotamiento del almacenamiento.

Sedimentos

Los sedimentos a través del cauce y la llanura aluvial se manejan por separado. Si se utiliza el método de flujo medio diario, entonces las velocidades y caudales son los promedios para el día y el volumen corresponde al total para ese día. Si se utiliza el método de VSC, entonces la velocidad media, velocidad de flujo, el volumen y el transporte de sedimentos se calculan para cada intervalo de tiempo. Así, el VSC produce distribuciones del tiempo de concentración y transporte de sedimentos (sedimentograma). La ecuación de transporte de sedimentos es una variación a la fórmula de transporte de sedimentos de Bagnold (Bagnold, 1977); esta nueva ecuación estima la cantidad de sedimentos transportados en función de la velocidad del flujo.

Nutrientes

La estimación de nutrientes se realiza en función de los cambios de las condiciones climáticas, propiedades del suelo y prácticas de manejo. En este caso, simula el almacenamiento y transferencia de carbono y nitrógeno entre depósitos, además de la estimación de fósforo soluble (P) en la esorrentía, lixiviación, mineralización e inmovilización del P o la absorción de este por el cultivo.

APEX evalúa la transformación y movimiento de las diversas formas de nitrógeno y fósforo. En el suelo la transformación de nitrógeno de una forma u otra es regida por el ciclo del nitrógeno y en el caso del fósforo es controlado por el ciclo del fósforo. El movimiento de los nutrientes ocurre en los cauces principales río abajo por la esorrentía y por el flujo superficial o subterráneo lateral.

El ciclo del nitrógeno (N) considera las entradas atmosféricas, las aplicaciones de nitrógeno en fertilizante y/o estiércol y su absorción por el cultivo, su mineralización, inmovilización, nitrificación, desnitrificación y su volatilización en forma de amoníaco.

Las cantidades de $\text{NO}_3\text{-N}$ contenidos en la escorrentía, flujo lateral y percolación se estiman como productos del volumen de agua y la concentración media. Las cantidades de $\text{NO}_3\text{-N}$ contenidos en el sedimento están en función de la producción de sedimentos, la concentración de N orgánico adherido en la superficie del suelo y su relación de enriquecimiento; donde la relación de enriquecimiento corresponde es la concentración de N orgánico en el sedimento removido del suelo. La cantidad diaria de inmovilización de N es calculada restando la cantidad de N, asimilado por los microorganismos, al contenido de N en los residuos de cosecha (Williams *et al.*, 1989).

Debido a que el fósforo (P) es mayormente asociado a la adsorción de los sedimentos, la ecuación para la disolución de P, en la escorrentía, es una función lineal de la concentración de P soluble en la capa superior del suelo, el volumen escurrido y una isoterma de adsorción lineal. El transporte de sedimentos de P es simulado con una función del volumen de escurrimiento. El componente de la pérdida de purines mide nutrientes orgánicos y las pérdidas de carbono de los corrales ganaderos y la aplicación de estiércol. Para este componente es necesario conocer aspectos como tipo de plaguicidas usados, volumen de escorrentías, contenido de agua en el suelo, densidad aparente del suelo, tipo de fertilizantes y tipo de fertilizantes usados.

La mineralización del N y P en los cauces no se considera ya que en general el tiempo de traslado es corto. El cálculo de los plaguicidas es similar al descrito para los nutrientes, donde los ingredientes activos adsorbidos al sedimento se estiman usando una relación de enriquecimiento y los solubles en función del flujo de agua.

Las formas orgánicas de N y P, transportados por los sedimentos, se calculan en función de una relación de enriquecimiento, la cual relaciona la distribución del tamaño medio de las partículas de sedimento entre la salida y entrada al segmento de tránsito analizado. Las pérdidas de nutrientes minerales se producen sólo si el flujo se pierde durante la extensión del tramo de tránsito.

Plaguicidas

Aunque APEX no simule el estrés ocasionado en el crecimiento de una planta debido a la presencia de malezas y daños por plagas y enfermedades, los pesticidas aplicados a un área se evalúan en términos del movimiento de la sustancia química en la cuenca. El movimiento de los plaguicidas ocurre a través de la red hidrológica (en solución vía escurrimiento superficial y adsorbido al sedimento transportado), en el perfil de suelo y su posterior infiltración al acuífero (en solución). Las ecuaciones usadas para modelar el movimiento del pesticida, en la fase de suelo del ciclo hidrológico, fueron adoptadas del modelo GLEAMS (Leonard *et al.*, 1987). El movimiento del pesticida es controlado por su solubilidad, degradación y coeficiente de absorción al carbón orgánico del suelo. El plaguicida en el follaje de la planta y el suelo se degrada de manera exponencial según su vida media activa. El transporte del pesticida, por agua y sedimento, se calcula para cada evento de escorrentía y se estima por capa de suelo conforme ocurre la infiltración.

Erosión del estiércol

Las pérdidas de nutrientes de los estiércoles, desde los corrales de engorda hasta las parcelas de aplicación, se estiman en APEX utilizando una ecuación de erosión de estiércol basado en MUST, descrita anteriormente (Williams, 1995). Esta ecuación proporciona estimaciones directas de la pérdida de nutrientes y carbono orgánico en el corral y parcela. La erosión simulada puede consistir esencialmente sólo de estiércol o una combinación de estiércol y suelo, dependiendo de la extensión de la cobertura de estiércol sobre el corral de engorde o campo. Como el estiércol se considera un residuo, una cubierta de estiércol pesada en un corral de engorde puede eliminar por completo la erosión del suelo debido al "efecto residuo" del estiércol. Sin embargo, esta condición potencialmente podría resultar en la erosión extrema del estiércol. Resultados análogos pueden ocurrir en parcelas con hierba bien establecida o una cubierta vegetal similar.

5.3.8. Componente económico

El componente económico de APEX se representa con mayor precisión como un análisis financiero entre los costos del cultivo y pecuarios. Los costos e ingresos se dividen en

dos grupos: aquellos costos que no varían con el rendimiento y los que sí lo hacen. Todos los registros se cortan hasta la cosecha y las operaciones después de esta se cargan al siguiente ciclo de cultivo. Los costos de labranza y de funcionamiento de la maquinaria (antes de la cosecha) se consideran independientes al rendimiento.

Los costos de operación se deben calcular fuera de APEX y se introducen como una variable en el archivo de labranza. Esta célula de costes contiene todos los costos asociados con una sola operación o actividad (por ejemplo, en una actividad de cincelado incluye combustible, mano de obra, depreciación, reparación, intereses, etc., tanto para el tractor y el cincel).

Los costos de rendimiento y de manejo asociados se introducen en APEX en dos apartados de los datos de entradas. Los costos de los insumos incluyen N y P elemental, agua de riego y cal. El costo total por hectárea se basa en la suma de costos para las operaciones de maquinaria, semillas y modificaciones. El valor del mercado por hectárea se base en el producto de la cosecha y el precio neto de los cultivos. El precio neto del cultivo es el precio del mercado, menos los costos de cosecha, acarreo y otros costos de procesamiento. Los costos de semilla se calculan como el producto de la tasa de siembra y el costo por kg de semilla.

Cuando se introducen en APEX los costos validados; el modelo obtendrá costes y rendimientos anuales. La información financiera de APEX es valiosa, no solo para los análisis de beneficios, sino también de análisis de riesgo, ya que las distribuciones anuales de beneficios y costos pueden ser analizados. Esto permite realizar un análisis de riesgo y capacidad de mejora con la finalidad de mejorar la valoración analítica de APEX en estudios económicos.

La mayor utilidad de APEX para los análisis económicos no es su contabilidad económica interna, pero el flujo de las salidas físicas en periodos diarios, mensuales, anuales o plurianuales que pueden ser usados en modelos económicos generadores de presupuesto, y los sistemas de análisis de riesgos. APEX estima el rendimiento de los cultivos, el movimiento de nutrientes y plaguicidas, así como los rendimientos de agua

y sedimentos. Los cambios en los insumos necesarios para responder a los cambios en la gestión, cantidad y calidad del suelo, el clima (calentamiento global), sequías etc., son también estimados.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

5.5. Caracterización del área de estudio

6.1.1. Localización

El río Verde se encuentra ubicado en la denominada Costa Chica del estado de Oaxaca entre las coordenadas geográficas $15^{\circ} 58'$ y los $17^{\circ} 37'$ de latitud norte y de $96^{\circ} 14'$ a $98^{\circ} 06'$ de longitud oeste. El río se localiza dentro de la Región Hidrológica No. 20 (RH20) Costa Chica río Verde y desde el punto de vista hidrográfico, es el más importante de esta región hidrológica No. 20.

El área de estudio corresponde a la cuenca alta del río Verde (Figura 1), específicamente el área de influencia de la estación hidrométrica Ixtayutla (20,021). La subcuenca se ubica al oeste del estado de Oaxaca colindando con el estado de Guerrero entre las coordenadas $17^{\circ} 37' 19.93''$, y $16^{\circ} 29' 43.11''$ de latitud norte, y entre los $98^{\circ} 5' 54.34''$ y $96^{\circ} 53' 17.86''$ de longitud oeste.

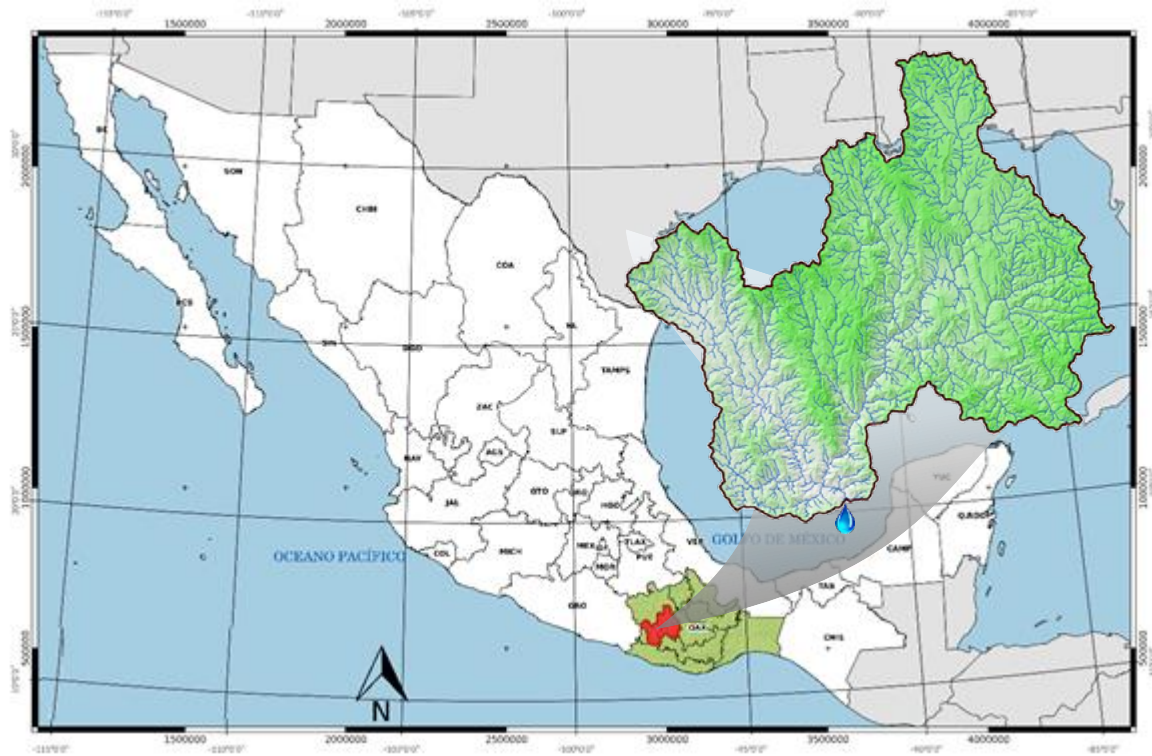


Figura 1. Localización de la cuenca alta del río Verde, Mixteca Oaxaqueña.

Esta subcuenca del río Verde abarca una superficie de 776,110.92 ha, y está conformada por 107 municipios Oaxaqueños y 2 del estado de Guerrero (Figura 2 y Cuadro 1) y 1,285 localidades. El 89.14% de la superficie de la cuenca (691,492 ha) comprende 163 ejidos y la propiedad privada cubre el 10.86% de la superficie (RAN, 2014).

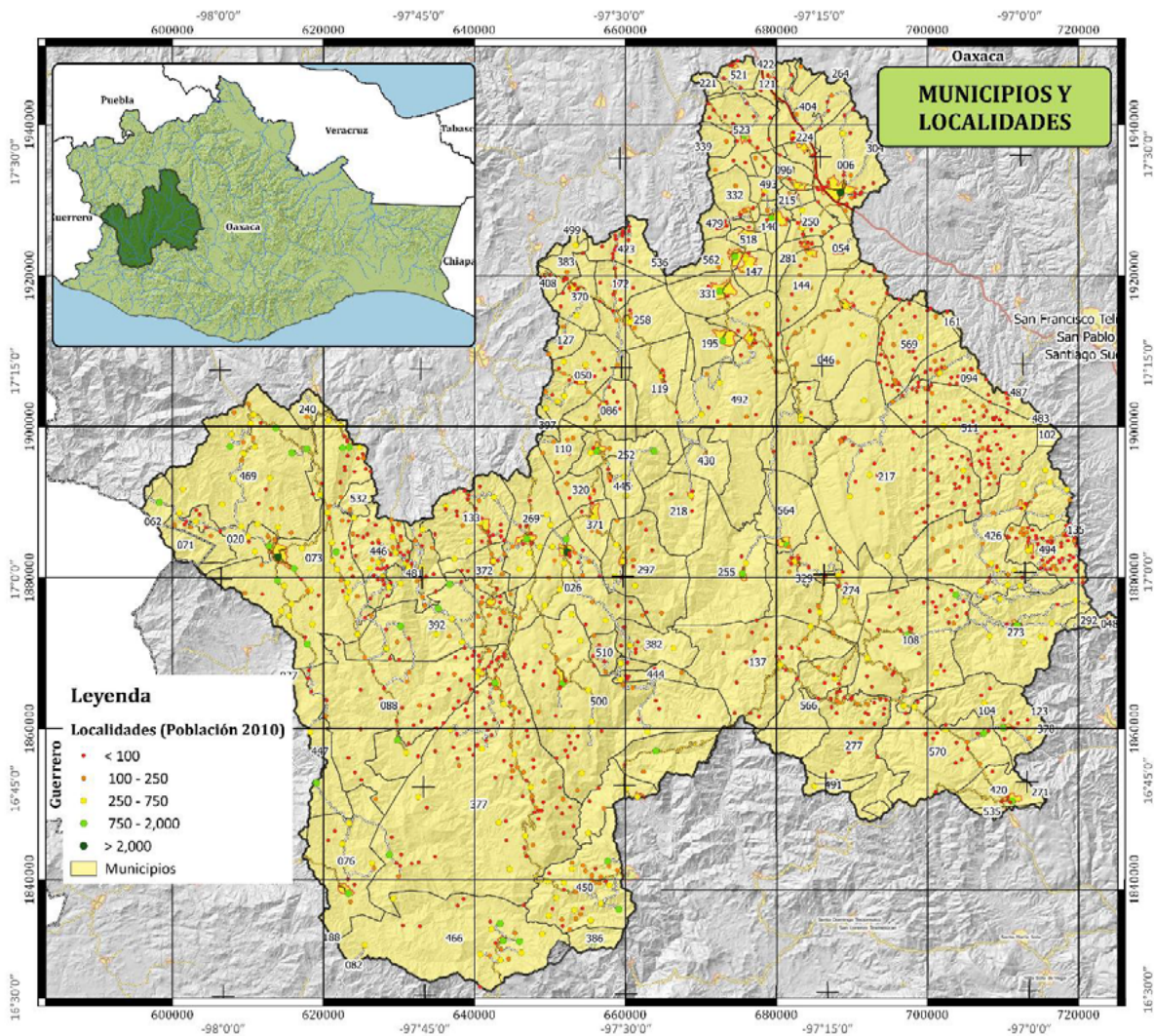


Figura 2. Municipios y localidades que conforman la cuenca alta del río Verde.

Cuadro 1. Relación de municipios que cubren la cuenca alta del río Verde, Oaxaca.

| Clave | Municipio | Superficie (ha) | Clave | Municipio | Superficie (ha) |
|-------|------------------------|-----------------|-------|-----------------------------------|-----------------|
| 6 | Asunción Nochixtlán | 12,595.34 | 329 | San Pedro Teozacoalco | 9,317.55 |
| 20 | Constancia del Rosario | 5,717.40 | 331 | San Pedro Tidaá | 4,597.22 |
| 26 | Chalcatongo de Hidalgo | 13,360.04 | 332 | San Pedro Topiltepec | 3,238.28 |
| 37 | Mesones Hidalgo | 1.81 | 339 | San Pedro y San Pablo Teposcolula | 0.59 |
| 46 | Magdalena Jaltepec | 22,527.03 | 370 | Santa Catarina Tayata | 3,837.07 |
| 48 | Magdalena Mixtepec | 5.63 | 371 | Santa Catarina Ticuá | 2,982.87 |

| Clave | Municipio | Superficie (ha) | Clave | Municipio | Superficie (ha) |
|--------------|----------------------------|----------------------------|--------------|----------------------------|----------------------------|
| 50 | Magdalena Peñasco | 7,523.91 | 372 | Santa Catarina Yosonotú | 3,834.88 |
| 54 | Magdalena Zahuatlán | 2,456.62 | 377 | Santa Cruz Itundujia | 56,569.18 |
| 73 | Putla Villa de Guerrero | 32,989.54 | 378 | Santa Cruz Mixtepec | 1.69 |
| 76 | La Reforma | 13,132.90 | 382 | Santa Cruz Tacahua | 4,752.35 |
| 82 | San Agustín Chayuco | 1.95 | 383 | Santa Cruz Tayata | 2,172.07 |
| 86 | San Agustín Tlacotepec | 5,145.86 | 386 | Santa Cruz Zenzontepec | 1,933.52 |
| 88 | San Andrés Cabecera Nueva | 26,130.03 | 392 | Santa Lucía Monteverde | 15,669.65 |
| 94 | San Andrés Nuxiño | 5,455.01 | 397 | Heroica Ciudad de Tlaxiaco | 670.60 |
| 96 | San Andrés Sinaxtla | 2,260.89 | 404 | Santa María Cachampa | 5,272.95 |
| 102 | San Andrés Zautla | 772.90 | 408 | Santa María del Rosario | 777.05 |
| 104 | San Antonino el Alto | 9,894.75 | 420 | Santa María Lachixío | 4,365.59 |
| 108 | San Antonio Huitepec | 19,180.47 | 422 | Santa María Nativitas | 44.36 |
| 110 | San Antonio Sinicahua | 2,924.83 | 423 | Santa María Nduayaco | 4,394.89 |
| 119 | San Bartolomé Yucuañe | 8,600.13 | 426 | Santa María Peñoles | 21,937.47 |
| 121 | San Bartolo Soyaltepec | 4,908.40 | 430 | Santa María Tataltepec | 3,710.82 |
| 123 | San Bernardo Mixtepec | 8.64 | 444 | Santa María Yolotepec | 1,796.10 |
| 127 | San Cristóbal Amoltepec | 1,830.34 | 445 | Santa María Yosoyúa | 3,363.46 |
| 133 | San Esteban Atlatlahuca | 9,291.50 | 446 | Santa María Yucuhiti | 6,796.67 |
| 135 | San Felipe Tejalápam | 37.60 | 447 | Santa María Zacatepec | 6,265.49 |
| 137 | San Francisco Cahuacuá | 25,476.64 | 450 | Santiago Amoltepec | 12,962.46 |
| 140 | San Francisco Chindúa | 2,258.52 | 466 | Santiago Ixtayutla | 25,382.57 |
| 144 | San Francisco Jaltepetongo | 4,745.87 | 469 | Santiago Juxtlahuaca | 28,839.45 |
| 147 | San Francisco Nuxaño | 2,261.67 | 479 | Santiago Nejapilla | 1,393.69 |
| 161 | San Jerónimo Sosola | 332.11 | 481 | Santiago Nuyoó | 5,681.47 |
| 172 | San Juan Achiutla | 3,563.34 | 483 | Santiago Suchilquitongo | 169.64 |
| 188 | San Juan Colorado | 38.97 | 487 | Santiago Tenango | 34.62 |
| 195 | San Juan Diuxi | 3,493.19 | 491 | Santiago Textitlán | 1,711.63 |

| Clave | Municipio | Superficie (ha) | Clave | Municipio | Superficie (ha) |
|--------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|
| 215 | San Juan Sayultepec | 1,456.26 | 492 | Santiago Tilantongo | 24,801.39 |
| 217 | San Juan Tamazola | 36,011.33 | 493 | Santiago Tillo | 1,706.97 |
| 218 | San Juan Teita | 7,110.93 | 494 | Santiago Tlazoyaltepec | 6,253.86 |
| 221 | San Juan Teposcolula | 759.69 | 499 | Santiago Yolomécatl | 5.15 |
| 224 | San Juan Yucuita | 2,338.74 | 500 | Santiago Yosondúa | 33,478.65 |
| 239 | San Martín Huamelúlpam | 309.28 | 510 | Santo Domingo Ixcatlán | 1,795.86 |
| 240 | San Martín Itunyoso | 1,530.60 | 511 | Santo Domingo Nuxaá | 14,646.82 |
| 250 | San Mateo Etlatongo | 2,350.89 | 518 | Santo Domingo Tlatayápam | 1,182.35 |
| 252 | San Mateo Peñasco | 5,595.80 | 521 | Santo Domingo Tonaltepec | 1,806.92 |
| 255 | San Mateo Sindihui | 14,181.91 | 523 | Santo Domingo Yanhuitlán | 6,876.45 |
| 258 | San Miguel Achiutla | 6,763.68 | 531 | Santo Tomás Mazaltepec | 0.72 |
| 264 | San Miguel Chicahua | 0.72 | 532 | Santo Tomás Ocotepec | 1,626.59 |
| 269 | San Miguel el Grande | 9,034.17 | 535 | San Vicente Lachixío | 624.77 |
| 271 | San Miguel Mixtepec | 43.40 | 536 | San Vicente Nuñú | 131.60 |
| 273 | San Miguel Peras | 15,524.51 | 562 | Magdalena Yodocono | 2,897.01 |
| 274 | San Miguel Piedras | 6,560.90 | 564 | Yutanduchi de Guerrero | 6,418.43 |
| 277 | Villa Sola de Vega | 12,534.61 | 566 | San Mateo Yucutindoo | 13,125.78 |
| 281 | San Miguel Tecomatlán | 1,968.76 | 569 | Santa Inés de Zaragoza | 8,370.72 |
| 292 | San Pablo Cuatro Venados | 1,147.60 | 570 | Zimatlán de Álvarez | 15,775.86 |
| 297 | San Pablo Tijaltepec | 11,770.99 | 62* | Tlacoachistlahuaca* | 36.86 |
| 304 | San Pedro Coxcaltepec Cántaros | 16.01 | 71* | Xochistlahuaca* | 2,078.25 |
| 320 | San Pedro Molinos | 2,643.64 | | | |

* Estado de Guerrero.

6.1.2. Orografía

El área de estudio se localiza en la confluencia de las Sierra Madre Oriental (en su sector sur conocido como la Sierra Madre de Oaxaca) y la Sierra Madre del Sur, conformando el denominado Nudo Mixteco. La provincia de la Sierra Madre del Sur es una sierra que se produce por el choque de las placas tectónicas de Cocos y la placa Norteamericana.

Este entrecruce, de cadenas montañosas y el choque de placas, ha generado un relieve montañoso con escasos valles, gran diversidad de rocas (basamentos de rocas cristalinas y metamórficas, calizas plegadas y otras sedimentarias), diferentes tipos de suelos y variadas condiciones climáticas. El Programa de Desarrollo Rural Integral de las Mixtecas Oaxaqueñas (PRODRIMO, 1989) calcula que en la región existe un 85% de lomeríos y pendientes mayores con altitudes que oscilan entre los 236 a 3,348 msnm y una pendiente media de 38.79%.

6.1.3. Clima

En base al metadato geográfico de precipitación media anual, CONABIO (2010), en la cuenca alta del río Verde ocurren precipitaciones que van de 500 a 4,000 mm, con una distribución muy irregular, entre junio y octubre. Las partes más secas se ubican al norte de la cuenca mientras que las partes más húmedas se localizan al sur de esta, con precipitaciones medias anuales entre 2,500 y 4,000 mm. A más de 1,900 msnm son frecuentes las heladas entre octubre y marzo.

De acuerdo al INEGI (2014), en la cuenca predominan diez diferentes tipos de unidades climáticas (Cuadro 2), producto de su relieve, que van desde climas cálidos hasta semifríos (Figura 3). Los climas predominantes en la región son los templados subhúmedos, semicálidos (20 - 25°C) subhúmedos y templados semisecos, con una temperatura media anual entre los 12 y 18°C (López, 2009). De acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (1981) (INEGI, 2014), el clima dominante en la cuenca es el templado subhúmedo (41.83%), seguido del semicálido

subhúmedo (34.18%). Dentro y en la periferia externa de la cuenca se localizan 32 estaciones meteorológicas las cuales se describen en el Cuadro 3.

Cuadro 2. Tipos de clima en la cuenca alta del río Verde.

| Tipo de clima | Área (%) | Descripción por temperatura | Descripción por precipitación |
|----------------------|-----------------|--|--|
| A(C)w2(w) | 34% | Semicálido, el más húmedo de los subhúmedos, con una temperatura media anual entre los 18° y 22° C, la temperatura media del mes más frío es mayor a 18°C. | Lluvias de verano, con un % de lluvia invernal menor de 5mm |
| C(w2)(w) | 32.1% | Templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano, donde la temperatura media anual se encuentra entre los 12 y 18° C, tienen una humedad media entre 43.2 y 55%. | El mes de máxima precipitación recibe diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año |
| Aw2(w) | 12.4% | Cálido, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 22° a 26°C, temperatura del mes más frío mayor a 18°C. | Lluvia invernal menor de 5% |
| C(w1)(w) | 6.98% | Templado subhúmedo, el intermedio de los subhúmedos, con lluvias en verano, donde la temperatura media anual se encuentra entre los 12 y 18° C, tienen una humedad media entre 43.2 y 55%. | El mes de máxima precipitación recibe diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año |
| C(m)(w) | 6.54% | Templado, 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. | Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual |
| Aw0(w) | 2.87% | Cálido, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano, con una temperatura media anual de 22° a 26°C, temperatura del mes más frío mayor a 18°C. | Lluvia invernal menor de 5% |
| C(w0)(w) | 2.72% | Templado subhúmedo, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano, donde la temperatura media anual se encuentra entre los 12 y 18° C, tienen una humedad media entre 43.2 y 55%. | El mes de máxima precipitación recibe diez veces mayor cantidad de precipitación que el mes más seco del año |
| BS1kw(w) | 1.12% | Seco, el menos seco de los secos, con invierno fresco, temperatura media anual entre 12°C y 18°C, | Lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal menor de 5% del total anual |

temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C ,
 temperatura del mes más caliente menor de 22°C .

- $C(E)(w2)(w)$ 0.74%. Semifrío subhúmedo con lluvias de verano con Lluvia invernal menor del 5% humedad alta.
- $Aw1(w)$ 0.71%. Cálido, el intermedio de los subhúmedos, con lluvias en Lluvia invernal menor de 5% verano, con una temperatura media anual de 22° a 26°C , temperatura del mes más frío mayor a 18°C .

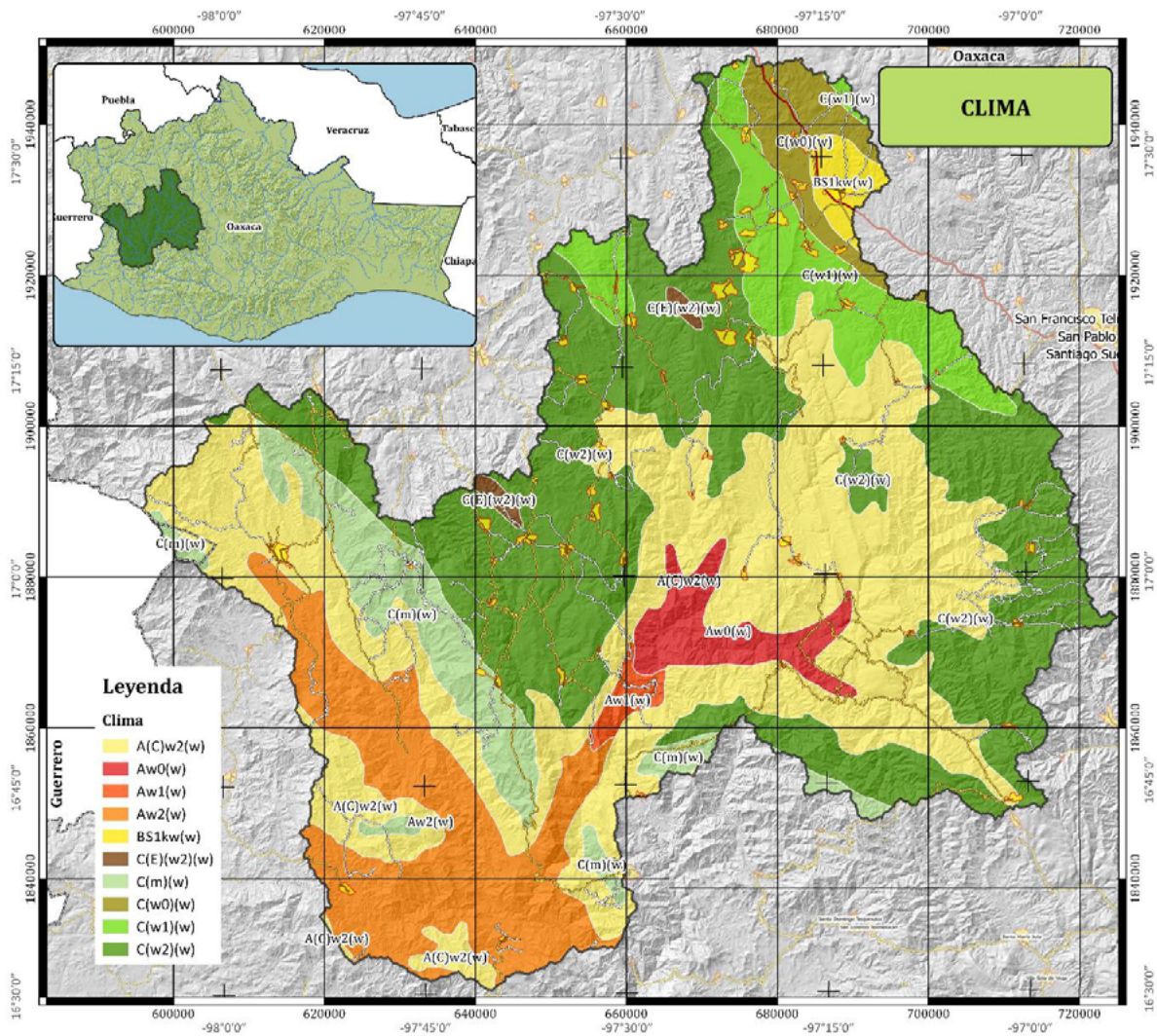


Figura 3. Climas presentes en la cuenca alta del río Verde.

Cuadro 3. Estaciones meteorológicas ubicadas en la cuenca alta del río Verde.

| Clave | Nombre | Periodo | | Comple- to (%) | Coordenadas | | Altitud (m) |
|-------|----------------------------|---------|----------|-------------------|-------------|------------|----------------|
| | | Primer | Último | | X (m) | Y (m) | |
| 20038 | Santiago Ixtayutla, | 03/1961 | 08/2006 | 70.5 | 642221.44 | 1832127.22 | 510 |
| 20187 | Yutacua, Stgo. Ixtayutla | 01/1972 | 12/2000 | 65.8 | 638688.60 | 1833874.45 | 355 |
| 20259 | Zacatepec, Zacatepec SMN | 03/1975 | 11/1986 | 96.9 | 629720.13 | 1852296.21 | 900 |
| 20212 | Yutama, Yosondua (CFE) | 02/1960 | 04/1969 | 100.0 | 645609.45 | 1867116.52 | |
| 20186 | Santiago Yosondua, Stgo.Y | 07/1957 | 02/1991 | 89.8 | 649111.75 | 1869022.25 | 2000 |
| 20251 | E.T.A. 199 Jamiltepec, | 04/1975 | 11/1980 | 66.8 | 631310.62 | 1870784.38 | |
| 20384 | San Antonio Huitepec | 10/1982 | 02/1996 | 76.5 | 697035.09 | 1871299.05 | 2375 |
| 20299 | Paraje Perez, San Juan C. | 01/1980 | 08/1988 | 77.3 | 618903.38 | 1879893.93 | |
| 20315 | Yukukimi, Tezoatlán | 12/1979 | 04/1987 | 81.1 | 618903.38 | 1879893.93 | |
| 20232 | Putla, Villa de Guerrero | 03/1974 | 12/1989 | 93.3 | 613570.17 | 1881745.17 | |
| 20130 | Sta. María Yucuhiti, | 05/1960 | 12/2000 | 74.3 | 633050.85 | 1881860.46 | 1200 |
| 20313 | Tlazolyatepec (DGE) | 02/1980 | 11/2005 | 62.0 | 714713.65 | 1882542.03 | 2400 |
| 20301 | Rio Venado, C. del Rosario | 12/1979 | 05/1985 | 71.2 | 608238.55 | 1883487.07 | |
| 20026 | Chalcatongo de Hidalgo | 07/1957 | 02/2004 | 99.4 | 650816.47 | 1883752.03 | 2250 |
| 20178 | Villa Chalcatongo, (CFE) | 01/1961 | 12/2000 | 75.4 | 650816.47 | 1883752.03 | 2327 |
| 20105 | San Esteban Atlatlahuaca, | 01/1961 | 10/1995 | 75.0 | 641848.99 | 1887451.28 | 2235 |
| 20094 | Putla De Guerrero, (CFE) | 08/1961 | 06/2000 | 93.5 | 613509.69 | 1892809.34 | 740 |
| 20302 | San Andrés Chicahuaxtla | 02/1979 | 04/2000 | 67.4 | 622318.76 | 1896510.91 | |
| 20208 | San Juan Copala, (DGE) | 12/1972 | 06/1985 | 64.2 | 609853.54 | 1900092.17 | |
| 20307 | San Martin Itunyoso (DGE) | 09/1980 | 02/1996 | 84.4 | 650655.20 | 1905882.95 | |
| 20102 | San Agustín Tlacotepec | 07/1958 | 12/1988 | 91.7 | 652356.61 | 1905895.49 | 1990 |
| 20365 | Magdalena Peñasco | 01/1982 | 06/1992 | 81.7 | 655972.14 | 1905922.60 | |
| 20150 | Tejocotes, Stgo. Tenango | 10/1953 | 12. 2CC6 | 76.8 | 705512.38 | 1908239.93 | 2500 |
| 20500 | Tilantongo, Tilantongo | 10/1983 | 12/2005 | 29.2 | 672404.15 | 1912140.82 | 2250 |
| 20245 | Jaltepec, Nochixtlán | 02/1976 | 12/2005 | 43.3 | 686000.73 | 1913587.91 | |
| 20379 | Yodocono de Porfirio | 01/1982 | 11/2005 | 60.0 | 675290.74 | 1922679.42 | |
| 20265 | Etlatongo, San Mateo Etlá | 10/1975 | 12/2005 | 69.6 | 682376.60 | 1926504.73 | |
| 20352 | Sta. María A. Nochixtlán | 01/1981 | 01/1988 | 86.9 | 687637.71 | 1932086.76 | |
| 20076 | Asunción Nochixtlán (SMN) | 01/1926 | 01/2006 | 57.6 | 689337.20 | 1932102.57 | 2111 |
| 20192 | Asunción Nochixtlán (DGE) | 01/2000 | 08/2003 | 0.0 | 687621.31 | 1933857.54 | |
| 20164 | Sta. María Tiltepec, SMN | 01/1961 | 03/1996 | 73.3 | 673373.66 | 1935611.99 | 2500 |
| 20221 | Cam. Agr. Exp. Yanhuitlán | 02/1964 | 03/1983 | 87.7 | 676952.24 | 1939295.35 | 2250 |

Fuente: SMN (2016).

6.1.4. Suelos

El suelo es la parte exterior de la corteza terrestre que está constituido por una capa de material fragmentario no consolidado; es un sistema complejo que se forma por la interacción continua y simultánea entre el material a partir del cual se origina, el clima, el tipo de vegetación, la fauna y las condiciones particulares del relieve.

En la Figura 4 se muestra la distribución espacial de los suelos en la cuenca, que fue generado por Sánchez *et al.* (2017) para esta misma cuenca. En el Cuadro 4 se resumen los distintos tipos de suelos presentes en la cuenca y su distribución en las áreas agrícolas y de agostadero. Los litosoles, rendzinas y regosoles son los suelos con una amplia distribución en la cuenca (31.1%) que son por lo general someros y por tanto no aptos para la agricultura. Los suelos más aptos para la producción agrícola son los phaeozems (lomeríos) y vertisoles (valles), estos suelos que se localizan principalmente al norte y centro de la cuenca ocupan el 17.1% de la superficie. El suelo con mayor proporción es el cambisol (22%) y se ubica básicamente al este de la cuenca. Estos son suelos de colores rojos o amarillentos de fertilidad moderada son de uso forestal y pecuario principalmente. En el sector oeste de la cuenca se encuentra en mayor superficie el acrisol (15.4%), los cuales son ácidos, pobres en nutrientes, impermeables y dedicados principalmente a explotaciones forestales o agropecuarias.

Cuadro 4. Tipos de suelos presentes en las áreas agrícolas y de agostadero en la cuenca alta del río Verde.

| Suelo | Superficie Total | | Superficie de Agostadero | | Superficie Agrícola | |
|----------|------------------|------|--------------------------|------|---------------------|------|
| | ha | % | ha | % | ha | % |
| Acrisol | 119,631.6 | 15.4 | 11,796.3 | 9.9 | 3,397.1 | 2.8 |
| Cambisol | 170,820.4 | 22.0 | 20,513.2 | 12.0 | 8,026.2 | 4.7 |
| Fluvisol | 58,005.8 | 7.5 | 9,915.5 | 17.1 | 7,954.5 | 13.7 |
| Litosol | 59,613.1 | 7.7 | 9,538.8 | 16.0 | 4,250.5 | 7.1 |
| Luvisol | 53,121.2 | 6.9 | 10,036.5 | 18.9 | 4,388.6 | 8.3 |
| Phaeozem | 52,249.5 | 6.7 | 17,426.8 | 33.4 | 4,461.7 | 8.5 |
| Regosol | 23,665.8 | 3.1 | 5,509.7 | 23.3 | 1,750.3 | 7.4 |

| | | | | | | |
|----------|-----------|-------|-----------|------|----------|------|
| Rendzina | 157,185.5 | 20.3 | 38,934.2 | 24.8 | 13,724.3 | 8.7 |
| Vertisol | 80,814.3 | 10.4 | 20,066.0 | 24.8 | 34,959.9 | 43.3 |
| Total | 775,107.1 | 100.0 | 143,737.1 | 18.5 | 82,913.2 | 10.7 |

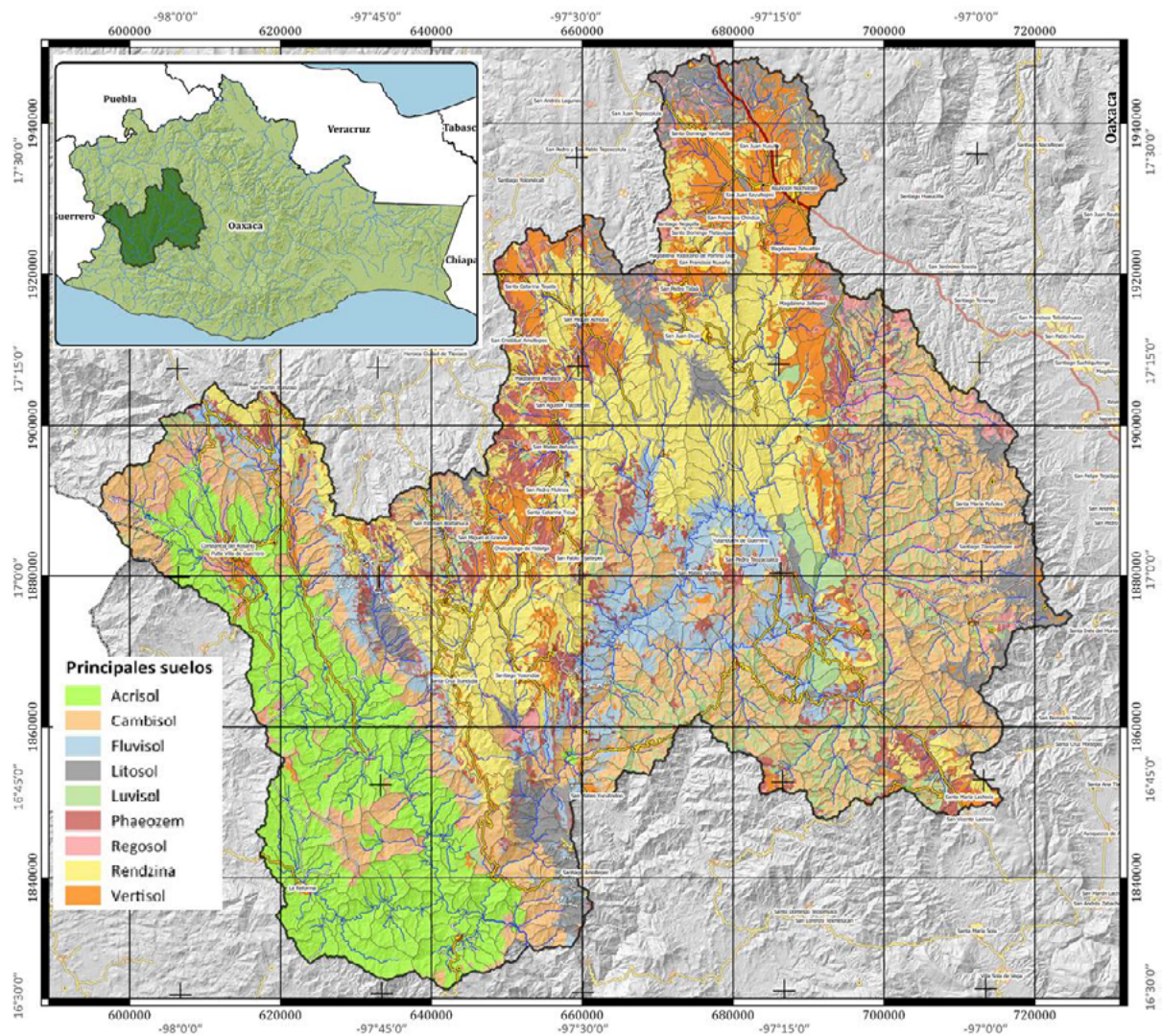


Figura 4. Unidades de suelos presentes en la cuenca alta del río Verde (Sánchez *et al.*, 2017).

A continuación, se proporciona una breve descripción de los principales suelos presentes en la cuenca.

Acrisol

Los Acrisoles son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos eluviales (especialmente migración de arcilla) que llevan a un horizonte árgico en el subsuelo. Los Acrisoles presentan, en determinadas profundidades, una baja saturación con bases y arcillas de baja actividad.

Material parental: Se presenta en una variedad amplia de materiales parentales, muy generalizados a partir de meteorización de rocas ácidas, y notablemente en arcillas fuertemente meteorizadas que están sufriendo mayor degradación.

Ambiente: Principalmente antiguas superficies de topografía con colinas u ondulada, en regiones con un clima húmedo tropical, subtropical o templado cálido. El tipo de vegetación natural es selva.

Desarrollo del perfil: Diferenciación pedogenética del contenido de arcilla con un bajo contenido en el suelo superficial y mayor contenido en el subsuelo; lixiviación de cationes básicos debido al ambiente húmedo y avanzado grado de meteorización.

Manejo y uso de acrisoles. La preservación de la materia orgánica y control de la erosión son precondiciones para cultivar los Acrisoles. Si los períodos de ocupación, por el sistema rosa-tumba y quema, son cortos (solo uno o unos pocos años) y son seguidos por un período de regeneración suficientemente largo (hasta varias décadas), este sistema hace un buen uso de los recursos limitados de los Acrisoles. Se recomienda la agroforestación, frente a la agricultura nómada, como una alternativa para proteger al suelo y alcanzar altos rendimientos sin invertir en insumos costosos (IUSS, 2007).

Cambisol

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 decoloración; principalmente parduzca, incremento en el porcentaje de arcilla, y/o remoción de carbonatos.

Desarrollo del perfil: Los cambisoles se caracterizan por meteorización ligera a moderada del material parental y por ausencia de cantidades apreciables de arcilla

iluvial, materia orgánica, compuestos de Al y/o Fe. Los cambisoles también abarcan suelos que no cumplen una o más características de diagnóstico de otros Grupos de Suelos de Referencia (GSR), incluyendo los altamente meteorizados.

Ambiente: Terrenos llanos a montañosos en todos los climas; amplio rango de tipo de vegetación.

Manejo y uso de cambisoles. Los cambisoles generalmente constituyen buenas tierras agrícolas y se usan intensivamente, estos con alta saturación con bases en la zona templada están entre los suelos más productivos de la tierra. Los más ácidos, aunque menos fértiles, se usan para agricultura mixta y como tierras de pastoreo y forestales. *Los cambisoles que se encuentran en zonas montañosas, con pendientes escarpadas, es mejor conservarlos bajo bosque.* Los Cambisoles, en planicies aluviales bajo riego, en la zona seca se usan intensivamente para la producción agrícola. Los Cambisoles en terrenos ondulados o de colinas (principalmente coluviales) se siembran con cultivos anuales y perennes o se usan como tierras de pastoreo. Los Cambisoles en los trópicos húmedos son típicamente pobres en nutrientes, pero menos que los Acrisoles o Ferralsoles asociados; aunque con una mayor capacidad de intercambio catiónico que estos (IUSS, 2007).

Litosol

Los litosoles son suelos, muy someros, que se presentan sobre roca continua o sobre estratos extremadamente gravillosos y/o pedregosos. Los litosoles son suelos azonales y particularmente comunes en regiones montañosas.

Material parental: Varios tipos de roca continua o materiales no consolidados con menos de 20 por ciento (en volumen) de tierra fina.

Ambiente: Principalmente tierras en altitud media o alta con topografía fuertemente accidentada. Los litosoles se encuentran en todas las zonas climáticas (muchos de ellos en regiones secas cálidas o frías), particularmente en áreas fuertemente erosionadas.

Manejo y uso. Son un recurso potencial para el pastoreo en estación húmeda y para el uso forestal. Los litosoles en zonas templadas están cubiertos con bosque caducifolio mixto mientras que los litosoles ácidos con bosque de coníferas. La erosión es la mayor amenaza para estos suelos, particularmente en regiones montañosas de zonas templadas, con alta presión demográfica y sobreexplotación de los bosques. En sitios con pendientes de colinas generalmente son más fértiles que los suelos de tierras más llanas. Unos pocos ciclos de buenos rendimientos podrían cultivarse, en tales pendientes, pero al precio de una erosión severa.

Las pendientes pronunciadas, con suelos someros y pedregosos, estos suelos pueden transformarse, con alta inversión, en tierras cultivables a través del terraceo, remoción de piedras y su utilización como frentes de terrazas. La agroforestación (una combinación o rotación de cultivos arables y árboles bajo control estricto) es una opción productiva para estos suelos. El drenaje interno es excesivo y su escasa profundidad puede causar, aún en ambientes húmedos, la desecación del suelo (IUSS, 2007).

Luvisol

Los luvisoles son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla) que lleva a un horizonte subsuperficial árgico. Los Luvisoles tienen arcillas de alta actividad en todo el horizonte árgico y alta saturación con bases a ciertas profundidades.

Material parental: Una amplia variedad de materiales no consolidados incluyendo depósitos eólicos, aluviales y coluviales.

Ambiente: Principalmente tierras llanas o suavemente inclinadas en regiones templadas frescas y cálidas con estación seca y húmeda marcadas.

Desarrollo del perfil: Diferenciación pedogenética del contenido de arcilla con un bajo contenido en el suelo superficial y un contenido mayor en el subsuelo sin lixiviación marcada de cationes básicos o meteorización avanzada de arcillas de alta actividad.

Los luvisoles muy lixiviados pueden tener un horizonte eluvial álbico entre el horizonte superficial y el horizonte subsuperficial árgico (IUSS, 2007).

Pheozem

Los feozems son suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental. Son muy parecidos a chernozems y castañozems pero están más intensamente lixiviados. Consecuentemente, tienen un horizonte superficial oscuro, rico en humus y alta saturación de bases en el metro superior del suelo. En comparación con chernozems y castañozems, los Feozem son menos ricos en bases y pueden tener o carecer de carbonatos secundarios.

Material parental: Materiales no consolidados, predominantemente básicos, eólicos (loess).

Ambiente: Se presentan en climas de cálido a fresco (tierras altas tropicales), moderadamente continentales, pero suficientemente húmedos para que ocurra, en la mayoría de los años, percolación y ocurran períodos en los cuales el suelo se seca. Se observan en tierras llanas a onduladas cubiertas con pastizal, estepa de pastos altos y/o bosque.

Desarrollo del perfil: Un horizonte mólico (más fino y en muchos suelos menos oscuro que en los chernozems), principalmente sobre horizonte subsuperficial cámbico o árgico.

Manejo y uso. Los feozems son suelos porosos, fértiles y excelentes para la agricultura. En la franja templada se siembran con trigo, cebada y vegetales junto con otros cultivos. La erosión (eólica e hídrica) causa serios daños. En áreas vastas se usan para cría y engorda de ganado en pastizales mejorados (IUSS, 2007).

Regosol

Los regosoles forman un grupo remanente taxonómico que contiene todos los suelos que no pudieron acomodarse en alguno de los otros grupos de suelos. Son suelos

minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte mólico o úmbrico, no son muy someros ni muy ricos en gravas, arenosos o con materiales flúvicos. Los regosoles están extendidos en tierras erosionadas, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos.

Material parental: material no consolidado de grano fino.

Ambiente: Todas las zonas climáticas sin permafrost y todas las alturas. Los Regosoles son particularmente comunes en áreas áridas (incluyendo el trópico seco) y en regiones montañosas.

Desarrollo del perfil: Sin horizontes de diagnóstico. El desarrollo del perfil es mínimo como consecuencia de edad joven y/o lenta formación del suelo, e.g. debido a la aridez (IUSS, 2007).

6.1.5. Uso de suelo y vegetación

De acuerdo al levantamiento de uso de suelo y vegetación realizado por la WWF (2014) a través de imágenes de satélite Landsat con resolución de 5 m y verificación en campo la cuenca alta del río Verde presenta un total 13 principales usos de suelo y vegetación (Figura 5). Así, el 61.5 % de la cuenca está cubierto por algún tipo bosque, un 18.5 % por pastizales y aproximadamente el 11 % por agricultura (Cuadro 5). En la Figura 5 se observa que la agricultura de temporal se ubica principalmente en la parte centro y este de la cuenca.

Cuadro 5. Usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca alta del río Verde.

| Clave | Descripción | Superficie (ha) | Superficie (%) |
|-------|-------------------------|-----------------|----------------|
| RIEG | Agricultura de riego | 974.39 | 0.1 |
| TEMP | Agricultura de temporal | 82926.75 | 10.7 |
| BENC | Bosque de encino | 120901.90 | 15.6 |
| ENPI | Bosque de encino-pino | 10253.76 | 1.3 |

| | | | |
|----------------------|------------------------------|------------------|--------------|
| PINO | Bosque de pino | 159326.96 | 20.6 |
| PIEN | Bosque de pino-encino | 179160.24 | 23.1 |
| FRSE | Bosque mesófilo de montaña | 5359.40 | 0.7 |
| MATO | Chaparral | 16269.98 | 2.1 |
| WATR | Cuerpos de agua | 1145.13 | 0.1 |
| FRSD | Selva baja caducifolia | 49401.51 | 6.4 |
| PASI | Pastizal | 143755.72 | 18.5 |
| RNGB | Bosque de táscate | 1823.12 | 0.2 |
| UMRD | Residencial mediana densidad | 3843.14 | 0.5 |
| Total general | | 775142.01 | 100.0 |

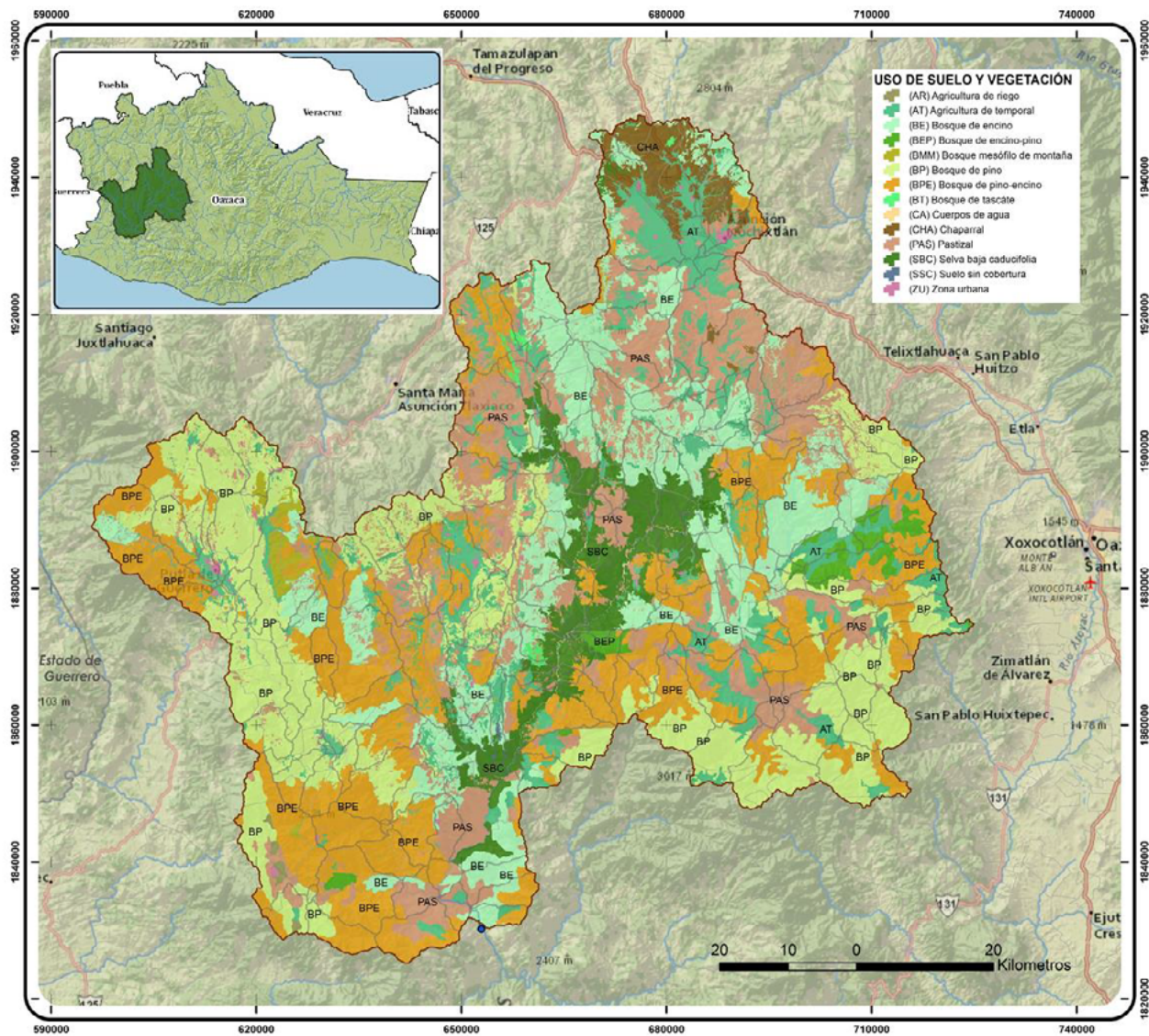


Figura 5. Usos de suelo y vegetación presentes en la cuenca alta del río Verde (WWF, 2014).

A continuación, se describen los principales tipos de vegetación presentes en la cuenca.

Agricultura de temporal

En el Estado de Oaxaca se siembran anualmente más de 500 mil hectáreas y en la región Mixteca alrededor de 120 mil hectáreas. Del total estatal, 87.6% corresponden a siembras de maíz de temporal en monocultivo o en asociación, con un rendimiento promedio, en el Estado de 1.32 t/ha (SEIDRUS, 2009).

El relieve y clima de la Mixteca Oaxaqueña, asociados a un paisaje abrupto y patrones de lluvia irregular, da lugar a un tipo de agricultura con altos índices de siniestralidad, altas tasas de erosión, bajos rendimientos de grano (INIFAP-CIMMYT, 1993). Así, el rendimiento de maíz en el distrito de Nochixtlán, reportado por el SIAP (2017), es de 1.0 t/ha.

Los sistemas de producción de maíz se desarrollan invariablemente en condiciones de temporal, en consecuencia, se presenta una gran variabilidad de los rendimientos a través de los años, sujetos al régimen de lluvias. Esta dependencia de las condiciones del temporal caracteriza a la actividad agrícola, en particular y agropecuaria en general, además de los altos índices de siniestralidad (>30%) y bajos rendimientos del maíz en temporal que, según SIAP (2017), se encuentran por debajo de la media nacional (2.3 t/ha) y alrededor de la media estatal (1.1 t/ha).

Pastizal inducido

Es aquel que surge cuando se elimina la vegetación original, como consecuencia de desmontes de cualquier tipo de vegetación. También suele establecerse en áreas agrícolas abandonadas o bien en áreas que se incendian frecuentemente. Algunas de las gramíneas que se encuentran en estas condiciones son *Aristida adscensionis* (Zacate tres barbas), *Erioneuron pulchellum* (Zacate borreguero), *Bouteloua simplex*, *Paspalum notatum* (Zacate burro), *Cenchrus spp.* (Zacate cadillo o roseta), *Lycurus phleoides*, *Enneapogon desvauxii* y otros. No es rara la presencia ocasional de diversas hierbas, arbustos y árboles. Su producción anual de biomasa varía entre 3 a 5 t MS/ha (COTECOCA, 1980).

Bosque mesófilo de montaña

Es un tipo de vegetación arbórea densa que se localiza en laderas de montañas, donde se forman neblinas durante casi todo el año, o bien en barrancas y otros sitios protegidos con condiciones favorables de humedad. Es notable en esta comunidad, la

mezcla de elementos templados y tropicales. Se desarrolla generalmente en altitudes de 800 a 2,400 msnm.

Son muchas las especies que la conforman siendo algunas de ellas las siguientes: *Engelhardtia mexicana* (Micoxcuáhuatl), *Carpinus caroliniana* (Lechillo), *Liquidambar styraciflua* (Liquidámbar), *Alnus jorullensis*, *Inga michelliana*, *Hampea tomentosa*, *Cecropia peltata*, *Quercus spp.* (Encino, Roble, etc.), *Clethra spp.*, *Podocarpus spp.*, *Magnolia spp.*, *Oreopanax spp.*, *Ternstroemia spp.*, *Persea spp.*, *Tilia spp.*, *Cornus spp.*, *Chaetoptelea (Ulmus) mexicana*, *Juglans spp.*, *Dalbergia spp.*, *Styrax spp.*, *Eugenia spp.*, *Ostrya virginiana*, *Meliosma spp.*, *Prunus spp.*, *Chiranthodendron pentadactylon*, *Matudaea trinervia*, etc., y gran cantidad de epífitas.

Por las características climáticas, estas áreas son utilizadas para el cultivo de café o en agricultura nómada de temporal. La madera de los diversos árboles se utiliza generalmente para el cercado de potreros en explotaciones ganaderas. COTECOCA (1980), reporta una producción anual, en materia seca, de forraje de 757.692 kg MS/ha que soporta una carga animal de 6.50 unidades animal por hectárea. Para la cobertura vegetal en su conjunto, Mass *et al.* (2002) reporta una producción anual de materia seca de 6.25 a 8.25 t/ha/año.

Bosque de pino

Esta comunidad vegetal se constituye aproximadamente por 35 especies creciendo desde los 600 m de altitud hasta los 4,200 m, en el límite altitudinal de la vegetación arbórea. Para la cuenca destacan: *Pinus rudis*, *P. michoacana*, *P. oaxacana*, *P. leiophylla*, *P. pseudostrobus*, (COTECOCA, 1980).

Estos bosques, junto con las mezclas de Encinos y otras especies, son los de mayor importancia económica en la industria forestal del país, y de la cuenca, como aserrío, resinación, obtención de pulpa para celulosa, postería, leña, recolección de frutos, semillas, entre otros.

Las gramíneas que se desarrollan son en esta comunidad arbórea son: *Aristida ternipes*, *Andropogon microstachyus*, *Tristachya avenacea*, *paspalum plicatulum*, *Andropogon bicornis*, *aristida jorulensis*, *mesosetum sp.*, *Leptocoryphium lanatum*, *Acroceras oryzoides*, *Andropogon leucostachyus*. En esta comunidad vegetal se produce en forraje 868.607 kg MS/ha para una carga animal de 5.67 ha/UA/año (COTECOCA, 1980).

Bosque de encino-pino

Son bosques donde predomina el encino. Suelen estar en climas templados y en altitudes mayores a 800 msnm. Esta comunidad es la que ocupa la mayor parte de la superficie forestal, de las partes superiores, de los sistemas montañosos del país. Las mezclas de diferentes especies de Pino (*Pinus spp.*) y Encino (*Quercus spp.*) son frecuentes y ocupan muchas condiciones comprendidas dentro del área general de distribución de los pinos.

La producción de biomasa en materia seca varía entre 3.4 y 5.3 t MS/ha/año, tanto para bosque de encino-pino, como de pino-encino. También COTECOCA (1980) reporta especies de *Quercus segoviensis*, *Q. crassifolia*, *Q. obtusata*, *Pinus oaxacana*, *P. patula*, *Acacia tortuosa*, *Tephrosia talpa*, *Baccharis conferta* y *Rhus sp.* La producción de forraje de esta comunidad vegetal es de 351.786 kg MS/ha correspondiente a una carga animal de 14 ha/UA/año.

Bosque de pino-encino

Son bosques en donde predomina el pino. Suelen estar en climas templados y en altitudes mayores a los 800 msnm. Esta asociación arbórea se forma por la dominancia del Pino (*Pinus spp.*) sobre el Encino (*Quercus spp.*) y en sus límites inferiores se desarrolla la explotación forestal.

Selva baja caducifolia

La selva baja caducifolia es común de los climas cálidos y subhúmedos del país, se caracteriza por su gran biodiversidad y marcada estacionalidad que le confiere un

aspecto muy distinto en época de lluvias y en época de secas. En la época de lluvias, que dura de 3 a 4 meses, los árboles permanecen cubiertos de hojas; que coincide con la época de reproducción de muchas de las plantas y animales que lo componen. En el resto del año, época de secas, la mayor parte de los árboles pierden sus hojas, muchos florecen y producen frutos y semillas. La vegetación que crece en este tipo de selva es densa y sus árboles alcanzan alturas de hasta 15 m. Actualmente la selva baja caducifolia es uno de los ecosistemas más amenazados en el país, por los altos índices de deforestación (estimados en más del 2.06%), con una pérdida del 90 al 95% de especies vegetales (Velázquez *et al.*, 2002).

6.1.6. Hidrología

La cuenca de estudio comprende la Región Hidrológica 20 Costa Chica - Río Verde de la cuenca del Río Atoyac. Específicamente en la cuenca alta del río Verde se localiza el río Sordo-Yolatepec y sobre este se ubica la estación hidrométrica Ixtayutla (20,021), controlada por la CONAGUA. El área de trabajo se delimitó hasta la estación hidrométrica Ixtayutla, con coordenadas geográficas $16^{\circ}35'07''$ y $-97^{\circ}36'18''$. El río Sordo-Yolatepec, que se afora en la estación hidrométrica Ixtayutla (20,021), es el principal afluente del río Verde y se une al río Atoyac un poco al Sur de Zenzontepec.

La Figura 6 muestra la distribución del volumen promedio anual de la serie histórica. Los años 1974, 1981 y 1984 han sido los más caudalosos, mientras que los demás se mantienen alrededor de la media (IMTA, 2016).

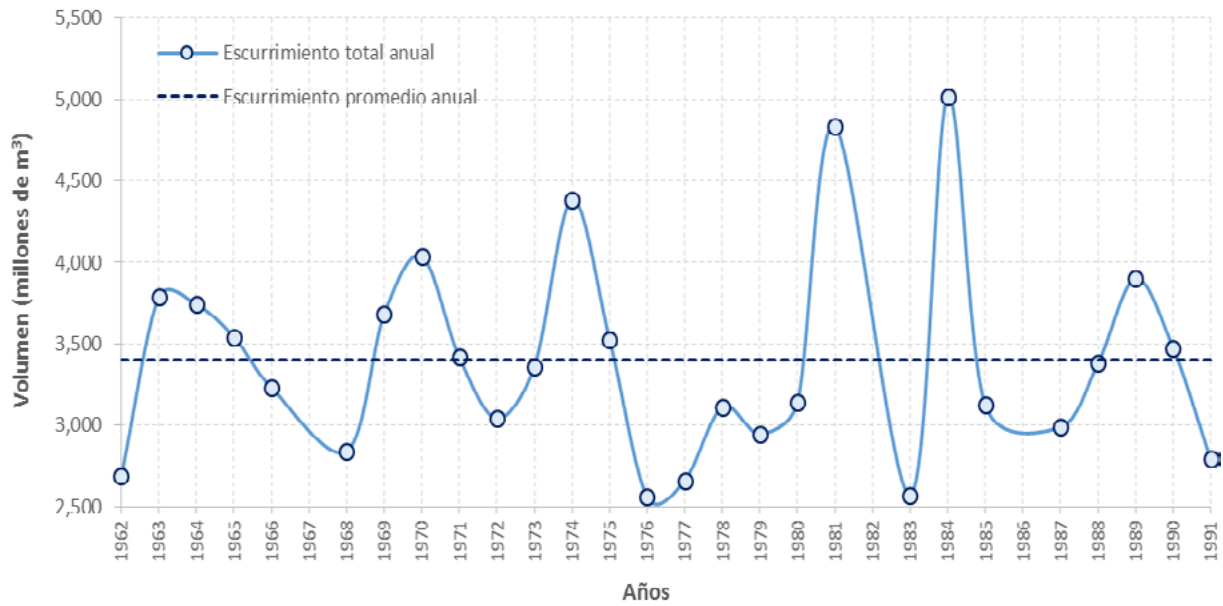


Figura 6. Volúmenes de esguerrimiento anual de la estación hidrométrica Ixtayutla (Clave CONAGUA 20021), cuenca alta del río Verde.

En la Figura 7 se muestra la distribución mensual de los volúmenes de esguerrimiento sedimentos reportados en la estación hidrométrica entre enero de 1972 y diciembre de 1991 (IMTA, 2016).

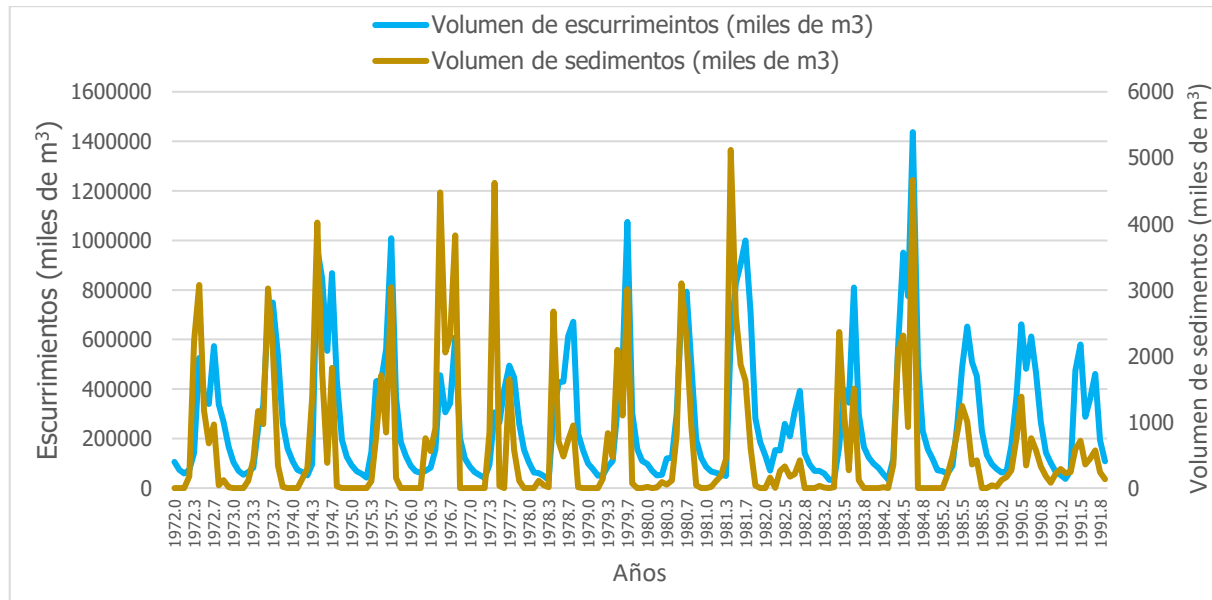


Figura 7. Volúmenes de esguerrimiento y sedimentos medios anuales de la estación hidrométrica Ixtayutla (Clave CONAGUA 20021), cuenca alta del río Verde.

6.1.7. Erosión

Las variaciones de las tasas de erosión, dentro de una cuenca de drenaje, son producto de varios factores ambientales, entre los más importantes están los tectónicos, con influencia en periodos largos y los climáticos, en periodos cortos y largos; sin olvidar el impacto antropogénico. Este último es el factor más dinámico y sus efectos se ven reflejados a corto plazo (meses o años). En la cuenca es notorio un círculo vicioso entre grado de marginación, migración, pérdida de cobertura vegetal y la erosión del suelo.

La cuenca en forma natural se observan condiciones frágiles, para la degradación de los suelos, producto de su historial geológico y geomorfológico; asociado a cambios climáticos y un tectonismo muy activo. En la parte Norte de la cuenca se advierten vestigios de suelos recientes de origen volcánico; correspondiente al sistema Neógeno (entre 3.3 y 23 millones de años). Así, al menos en los últimos 3.3 millones de años, la erosión natural paulatinamente ha arrastrado los materiales finos y puesto al descubierto la roca y material de arrastre subyacente; litosoles y regosoles respectivamente, que hoy observamos en la cuenca. En los tiempos modernos la erosión acelerada, asociada a cambios de uso de suelo antropogénicos, está mermando las acumulaciones de suelo volcánico remanente (Tonaltepec, Yanhuitlán, Tiltepec, Peñasco, Huamelúlpam) y de arrastre presentes en áreas de agregación de la cuenca como Soyaltepec, Chopoapan, Nochixtlán, Zahuatán, Jaltepec, y Tilantongo.

En la región Mixteca Oaxaqueña, Romero *et al.* (1986) establece que diversas estimaciones a nivel anual indican que: 36.0 a 38.7% de la superficie presenta erosión moderada (10 a 50 t/ha), 46.0% erosión alta (50 a 200 t/ha) y 13.3% erosión muy alta (más de 200 t/ha). Por su parte, Narváez (1991) estima que el 90% de la superficie presenta erosión, y 63% presenta erosión alta a muy alta, con pérdidas de suelo superiores a 50 y 200 t/ha/año, respectivamente; donde la mayor parte de la superficie erosionada corresponden a agostaderos.

En la misma cuenca, Cruz (1988) encontró pérdidas de suelo anuales en agostaderos erosionados de la localidad de Tiltepec, colindante al municipio de Yanhuitlán, en tres sitios, del orden de 1.6, 8.3 y 6.6 t/ha para agostaderos con 49, 35 y 48% de cobertura vegetal, respectivamente. Con la exclusión del pastoreo, el autor encontró que las pérdidas anuales se redujeron en el segundo año a 0.7, 3.1 y 3.20 t/ha respectivamente, para precipitaciones similares en ambos años. A nivel anual, Contreras-H. (2003) establece que los municipios de Etlatongo, Tecomatlán, Jaltepetongo, Zahuiatlán y Jaltepec, en el centro de la cuenca bajo estudio, el 71% de la superficie presenta erosión severa a extrema, con pérdidas de suelo de 13.7 t/ha en sistemas silvopastoriles, de 2.1 a 39.7 t/ha en sistemas pastoriles y de 54.7 t/ha en sistemas agropastoriles.

6.1.8. Producción agrícola

La actividad agrícola en la cuenca está orientada básicamente al cultivo de maíz; la cual es una actividad íntimamente ligada al régimen de lluvia y su siembra sujeta a la disponibilidad de humedad del suelo. Este sistema productivo, primordialmente de ladera, muestra poca variación respecto en sus técnicas de manejo. Se caracteriza por el uso de materiales criollos que varían según el color de la semilla empleada.

Las fechas de preparación del suelo cambian de acuerdo a las condiciones de cada sitio. La práctica de preparación más común es el barbecho, el cual generalmente se realiza con maquinaria agrícola. Estas se realizan generalmente unos días después de la cosecha, con el propósito de romper el continuo capilar de suelo y en consecuencia reducir la evaporación del suelo y evitar el aterronamiento por desecación, típico de los barbechos de primavera, que dificulta una buena cama de siembra. En otros lugares, con texturas medias (limo-arenosas), el inicio de la preparación del suelo coincide con la presencia de las primeras lluvias que aseguran un contenido de humedad adecuada (jugo) para el uso de los implementos agrícolas.

En la siembra se utiliza semilla criolla, preferentemente blanca, pero dada la amplia variabilidad genética se puede encontrar productores, que siembran maíz pinto y

amarillo. El control de malezas se hace fundamentalmente a través de limpiezas que varían, entre dos y cuatro veces, de acuerdo a la afectación de malezas presentes. Para las plagas no existe un control generalizado y estas pueden afectar hasta el 20% del rendimiento de grano; las de mayor frecuencia son el gusano cogollero y la gallina ciega.

La duración del ciclo de cultivo en la cuenca, desde la siembra hasta la cosecha, varía entre 160 y 190 días (promedio 180 días). Aunque en los lugares con mayor humedad del suelo (ej. loma bordo) se siembran semillas de ciclo más largo, como las pintas y las blancas de hasta 260 días. En la parte alta de la cuenca las fechas de siembra oscilan entre el 20 de mayo y el 20 de junio. Mientras que, en la parte más cálida y lluviosa, principalmente en los municipios de Putla y Chalcatongo, las siembras inician entre febrero y abril.

En la cuenca existe un empleo generalizado de fertilizantes, principalmente a base de nitrógeno y fósforo, con dosis de 60 y 26 kg/ha respectivamente. La aplicación suele ser de 2 a 4 bultos/ha con sulfato de amonio (50 kg/bulto). Su aplicación habitualmente coincide con el primer deshierbe (escarda) y cuando el contenido de humedad del suelo es suficiente para evitar la deshidratación de la planta; por el efecto higroscópico del fertilizante. Este deshierbe en promedio ocurre a los 45 días después de la siembra, este generalmente es con pala o machete y en ocasiones con herbicidas (paraquat de 2.0 a 3.0 l/ha).

El tratamiento postcosecha es casi nulo ya que la mayoría de las veces el grano se ve atacado por ratones o polilla (*Sitotroga Cerealella*). En el Cuadro 6 se presenta, según Salas (2013), el manejo del cultivo de maíz en condiciones de temporal para la Mixteca, ciclo primavera-verano.

Cuadro 6. Paquete tecnológico del cultivo de maíz para la Mixteca Oaxaqueña (Salas, 2013).

| Operación | Concepto/Actividad | Unidad | Cantidad | Observaciones |
|-------------------------|--------------------------|--|----------|---|
| Preparación del terreno | Barbecho | ha | 1 | Es el paso de arado de disco tirado por tractor agrícola en un tiempo de 2.5 h. En la región la mayoría de los productores realizan esta activada con tracción animal y arado tradicional. Esta actividad se realiza 15 días antes de la siembra. |
| | Rastreo | ha | 1 | Es el paso de la rastra de discos tirado por tractor agrícola en un tiempo de 2 h. Esta actividad se realizada por una minoría de los productores y se efectúa unos días antes de la siembra. |
| Siembra | Tipo de semilla | Los productores usan variedades criollas que seleccionan del ciclo anterior. | | |
| | Semilla | kg | 20 | |
| | Siembra manual | Jornales* | 4 | |
| | Arreglo topológico | | | Mateado. |
| | Distancia entre surcos | m | 0.8 | |
| | Distancia entre matas | m | 0.7 | |
| | Densidad de siembra | Plantas ha ⁻¹ | 35,700 | Generalmente 2 plantas por mata pero esta densidad varía según el número de semillas por mata. |
| | Fecha de siembra | La siembra se realiza en los primeros días de junio. | | |
| Control de malezas | Deshierbe y aclareo | Jornales* | 5 | Esta actividad se realiza en el mes de julio, aproximadamente un mes después de la siembra. |
| | Aporque | Jornales* | 5 | |
| Fertilización | Fórmula de fertilización | 60-26-00 (N-P-K) | | Según se establezca la época de lluvias. |
| | Aplicación | Jornales | 3 | Se realiza después del deshierbe y aclareo. |
| | Cosecha | | | |
| | Pizca | Jornales* | 5 | |
| | Deshoje y desgrane | Jornales* | 5 | |
| | Fecha de cosecha | La cosecha se realiza en la primera quincena de noviembre. | | |

En el

Cuadro 7 se presentan los rendimientos de grano, a nivel municipal, reportados por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera de la SAGARPA (SIAP, 2017) entre 2006 y 2012.

Cuadro 7. Rendimientos de maíz, medios municipales, reportados por SIAP (2016).

| Clave | Municipio | Rendimiento reportado (t/ha) | Clave | Municipio | Rendimiento reportado (t/ha) |
|-------|-------------------------------------|------------------------------|-------|--------------------------|------------------------------|
| 006 | Asunción Nochixtlán | 1.03 | 331 | San Pedro Tidaá | 0.86 |
| 026 | Chalcatongo de Hidalgo | 1.02 | 332 | San Pedro Topiltepec | 0.63 |
| 020 | Constancia del Rosario | 0.92 | 535 | San Vicente Lachixío | 0.75 |
| 397 | Heroica Ciudad de Tlaxiaco | 0.95 | 370 | Santa Catarina Tayata | 0.94 |
| 046 | Magdalena Jaltepec | 1.11 | 371 | Santa Catarina Ticuá | 1.39 |
| 050 | Magdalena Peñasco | 0.86 | 372 | Santa Catarina Yosonotú | 0.77 |
| 562 | Magdalena Yodocono de Porfirio Díaz | 1.25 | 377 | Santa Cruz Itundujia | 0.81 |
| 054 | Magdalena Zahuatlán | 1.17 | 383 | Santa Cruz Tayata | 0.96 |
| 073 | Putla Villa de Guerrero | 1.09 | 386 | Santa Cruz Zenzontepec | 0.76 |
| 086 | San Agustín Tlacoatepec | 0.85 | 569 | Santa Inés de Zaragoza | 2.04 |
| 088 | San Andrés Cabecera Nueva | 0.83 | 569 | Santa Lucía Monteverde | 0.88 |
| 096 | San Andrés Sinaxtla | 1.38 | 404 | Santa María Chachoápam | 1.28 |
| 108 | San Antonio Huitepec | 0.85 | 408 | Santa María del Rosario | 1.05 |
| 121 | San Bartolo Soyaltepec | 0.59 | 420 | Santa María Lachixío | 0.84 |
| 119 | San Bartolomé Yucuañe | 0.69 | 423 | Santa María Nduayaco | 0.64 |
| 127 | San Cristóbal Amoltepec | 0.99 | 426 | Santa María Peñoles | 0.82 |
| 133 | San Esteban Atatlahuca | 0.87 | 430 | Santa María Tataltepec | 0.82 |
| 135 | San Felipe Tejalápam | 0.96 | 444 | Santa María Yolotepec | 0.91 |
| 137 | San Francisco Cahuacuá | 0.85 | 404 | Santa María Yosoyúa | 0.81 |
| 140 | San Francisco Chindúa | 1.34 | 446 | Santa María Yucuhiti | 0.81 |
| 144 | San Francisco Jaltepetongo | 1.60 | 450 | Santiago Amoltepec | 0.86 |
| 147 | San Francisco Nuxaño | 1.00 | 466 | Santiago Ixtayutla | 0.97 |
| 172 | San Juan Achiutla | 0.98 | 469 | Santiago Juxtahuaca | 1.02 |
| 195 | San Juan Diuxi | 0.87 | 479 | Santiago Nejapilla | 0.69 |
| 215 | San Juan Sayultepec | 1.34 | 481 | Santiago Nuyoó | 0.78 |
| 217 | San Juan Tamazola | 1.23 | 491 | Santiago Textitlán | 0.83 |
| 224 | San Juan Yucuita | 1.30 | 492 | Santiago Tilantongo | 0.84 |
| 239 | San Martín Huamelúlpam | 1.01 | 493 | Santiago Tillo | 1.15 |
| 240 | San Martín Itunyoso | 0.86 | 494 | Santiago Tlazoyaltepec | 0.82 |
| 250 | San Mateo Etlatongo | 1.34 | 500 | Santiago Yosondúa | 0.89 |
| 252 | San Mateo Peñasco | 1.04 | 510 | Santo Domingo Ixcatlán | 0.99 |
| 258 | San Miguel Achiutla | 0.86 | 511 | Santo Domingo Nuxaá | 1.06 |
| 273 | San Miguel Peras | 0.89 | 518 | Santo Domingo Tlatayápam | 0.64 |
| 274 | San Miguel Piedras | 1.14 | 521 | Santo Domingo Tonaltepec | 0.65 |

| | | | | | |
|----------------------------|--------------------------|-------------|-----|--------------------------|------|
| 281 | San Miguel Tecamatlán | 1.10 | 523 | Santo Domingo Yanhuitlán | 0.96 |
| 292 | San Pablo Cuatro Venados | 0.83 | 532 | Santo Tomás Ocotepec | 0.81 |
| 297 | San Pablo Tijaltepec | 0.93 | 277 | Villa Sola de Vega | 0.88 |
| 320 | San Pedro Molinos | 1.40 | 564 | Yutanduchi de Guerrero | 1.04 |
| 329 | San Pedro Teozacoalco | 1.07 | 570 | Zimatlán de Álvarez | 0.93 |
| Media | | 0.98 | | | |
| Desviación estándar | | 0.27 | | | |

6.1.9. Pastoreo de agostaderos

La cantidad de forraje que produce un agostadero depende de la especie de forraje, la productividad del suelo, el sistema de manejo que se tenga y el clima, en particular, la cantidad de lluvia y sol. En la planeación del agostadero, para evitar problemas de sobreexplotación y su consecuente degradación, es necesario correlacionar por unidad de superficie, la biomasa producida por un determinado tipo de pasto y el número de animales capaces de alimentarse con ella, que a su vez depende de las necesidades alimenticias de las diversas especies pecuarias y de su edad.

Para obtener un dato equivalente de referencia, que homologue las diversas especies (mayores o menores), con fines de planeación, se usa el concepto de Unidad Animal (UA), el cual considera las necesidades alimenticias y la función zootécnica de una vaca adulta (vientre bovino).

Unidad animal (U.A.)

La unidad animal (U.A.) la constituye una vaca adulta (vientre bovino) de 400 a 450 kg de peso, en gestación o mantenimiento, que para satisfacer sus necesidades alimenticias y cumplir con su función zootécnica, consume por día el 3% de su peso vivo de forraje, en base a materia seca. Esta unidad animal, se utiliza como equivalencia para comparar animales mayores y menores; por tanto, una unidad animal equivale a 1 vaca, o 5 borregas, 6 cabras, o bien 5 colmenas. En el Cuadro 8, se muestran los valores de UA equivalentes para diferentes especies de interés pecuario (Jaramillo, 1969).

Cuadro 8. Factores de conversión a Unidad Animal (UA).

| Clase de Ganado | UA |
|--|-----------|
| Vaca (400 a 450 kg) en gestación o mantenimiento | 1.00 |
| Vaca lactando y con cría antes del destete | 1.30 |
| Becerro destetado y hasta los 24 meses | 0.70 |
| Novillo de 2 años y menos de 400 kg | 0.90 |
| Novillo de más de 2 años o 400 a 450 kg | 1.00 |
| Toros de más de 2 años | 1.25 |
| Caballos, yegua o mulo adulto | 1.00 |
| Potros y muleros, destete a 2 años | 0.70 |
| Oveja seca o con cría | 0.20 |
| Carnero | 0.25 |
| Ovino destetado de menos de 1 año | 0.17 |
| Macho cabrío castrado o cabra adulta | 0.20 |
| Cabra tripona (menor de 1 año) | 0.14 |

Para hacer ajustes a situaciones de peso diferentes a las indicadas, se recomienda modificar las unidades animales en 0.1 por cada 50 kg de peso.

Condición de pastizal

La productividad de un pastizal, en un área determinada, que lo hace diferente en potencial forrajero a las áreas adyacentes, puede variar de un año a otro o en el mismo año, según la condición climática y de manejo del sitio en particular. Esta variación en productividad lleva al concepto de condición del pastizal, el cual refleja en términos comparativos, la producción actual de un sitio, comparada con la que debería tener si las prácticas de manejo, bajo condiciones normales de clima, fuesen las más apropiadas.

Para ello, se consideran cuatro clases de condición de pastizal en función del porcentaje de la vegetación del sitio (Cuadro 9).

Cuadro 9. Clase de condición de pastizal.

| Clase de condición de pastizal | Porcentaje de la vegetación clímax para el sitio de pastizal |
|---------------------------------------|---|
| Excelente | 76 a 100 |
| Buena | 51 a 75 |
| Regular | 26 a 50 |
| Pobre | 0 a 25 |

Esta clasificación sobre la condición del pastizal, expresa como se aparta la biomasa presente, de la producción clímax que potencialmente podría presentarse en el pastizal. Esta valoración proporciona una medida aproximada del grado de deterioro o disturbio que ha sucedido a la cubierta vegetal, con la finalidad de tener una base para predecir el grado de mejoramiento posible en dicho pastizal.

A cada una de estas categorías corresponde una productividad y una diferente carga animal. Lógicamente a una condición menor, debe corresponder un área de agostadero mayor para evitar la degradación de los pastizales. En ese sentido, los coeficientes de agostadero (ha/UA) de la Comisión Técnica Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero (COTECOCA), están referidos a la condición de pastizal denominada como "buena". Conocer los términos y parámetros que implican la carga animal y coeficiente de agostadero, permite tomar decisiones que ayudarán a evitar la degradación de los recursos por el sobrepastoreo y obtener los máximos rendimientos posibles.

El propósito de determinar la carga animal y el coeficiente de agostadero es calcular el número de unidades animales que se pueden pastorear en un área determinada, así como el número de hectáreas necesarias para mantener una unidad animal en un año, esto de acuerdo a las condiciones del área de estudio. Como se verá a continuación cuando carga animal es menor, el forraje disponible para pastoreo es menor y el coeficiente de agostadero es mayor, es decir son dos conceptos inversamente proporcionales.

Carga animal

La carga animal se define como el número de unidades animales que pastorean en un área determinada y en un tiempo específico, es decir, es el número de animales convertidos a UA, que pastorean por hectárea de pradera durante un periodo determinado.

$$CA = \frac{Fd}{C} = \frac{UA}{ha} \quad (1)$$

Donde:

- CA = Carga animal, UA/ha.
- Fd = Forraje disponible, ton.
- C = Consumo, ton.
- UA = Unidad animal.
- ha = Hectáreas.

También se refiere a la cantidad de ganado en UA que puede mantenerse durante todo el año, en una unidad de producción, sin deteriorar los recursos naturales (UA/ha/año).

La carga animal recomendada es el área que se sugiere asignar para el sostenimiento de una unidad animal, en máximo estado de productividad, sin causar deterioro al pastizal. Esa carga será diferente según la condición en que se encuentre el pastizal. La carga animal se mejora rehabilitando periódicamente las praderas e incluyendo suficiente sombra y agua disponible para los animales. De ahí que sea muy importante mantener los pastizales en buenas condiciones, ya que, de lo contrario, paulatina pero inexorablemente, perderá su capacidad de carga.

Coefficiente de agostadero

El coeficiente de agostadero, como lo define la COTECOCA, indica la superficie necesaria para mantener una cabeza de ganado mayor o su equivalente en ganado menor anualmente, con un pastizal en buenas condiciones.

Se calcula mediante la siguiente expresión:

$$IA = \frac{ha}{UA} \quad (2)$$

Donde:

- IA = Coeficiente o índice de agostadero, ha/UA/año.
- ha = Área de pastizal, ha.
- UA = Unidad animal adecuada para mantener una explotación permanente.

Así, es una relación entre el área y la unidad animal que, aunque es un dato de carga animal, se refiere a carga permanente.

Dado que el coeficiente de agostadero mide la capacidad forrajera de los terrenos, se le ha otorgado un carácter legal para determinar el tamaño de la pequeña propiedad ganadera (Aguirre, 1967).

En virtud que el coeficiente de agostadero está calculado para un pastizal en buenas condiciones, sin considerar el disturbio provocado por mal uso incorporando mejoras de la situación de los sitios evaluados, lo que permite no solamente el mantenimiento y recuperación de los pastos, sino, además, que los animales que viven de ellos alcancen un peso adecuado a su especie y produzcan crías sanas y vigorosas.

En algunas ocasiones la carga animal y el coeficiente de agostadero pueden coincidir, pero en un manejo correcto de la explotación ganadera, la carga de un potrero determinado debe variar a través del año mientras que el coeficiente de agostadero es una relación permanente para un determinado sitio.

Debe entenderse que el coeficiente de agostadero es el resultado de todos los factores variables que intervienen en la producción forrajera, por lo tanto, no quiere decir que

durante todo el año deba tenerse siempre la misma carga animal sobre el mismo sitio, ya que ésta varía en función de la estación del año. Se recomienda, que los valores reportados por la COTECOCA (2002), se ajuste a las condiciones actuales de manejo, vegetación, clima y especie animal que utiliza los recursos de los sitios considerados. En el Cuadro 10 se presentan los coeficientes de agostadero por tipo de vegetación. Es importante mencionar que estos datos pueden sobrestimar o subestimar la capacidad real, dependiendo de las condiciones presentes en el sitio de interés.

Cuadro 10. Coeficientes de agostadero (CA) por tipo de vegetación (2009).

| Tipo de Vegetación | | CA (ha/UA) | | |
|---------------------------|----------------------------------|----------------------|-------------|-------|
| | | Mín. | Máx. | |
| Pastizal | Amacollado abierto | 7.59 | 24.34 | |
| | Halófito abierto | 7.00 | 20.37 | |
| | Inducido | 7.41 | 10.40 | |
| | Mediano abierto | 5.01 | 20.52 | |
| | Alto espinoso | 8.20 | 29.00 | |
| Matorral | Bajo espinoso | 7.46 | 25.20 | |
| | Crasicaule | 9.16 | 24.63 | |
| | Mediano espinoso | 8.79 | 35.46 | |
| Selva | Baja caducifolia | 1.3 | 32.04 | |
| | Baja caducifolia espinosa | 1.95 | 12.00 | |
| | Baja subcaducifolia | 4.30 | 4.90 | |
| | Baja subperennifolia | 3.60 | 4.36 | |
| | Baja subperennifolia espinosa | 7.00 | 7.80 | |
| | Baja subperennifolia subespinosa | 2.00 | 2.50 | |
| | Baja caducifolia subespinosa | 6.30 | 14.00 | |
| | Aciculi-esclerófilo | 2.00 | 30.77 | |
| | Bosque | Caducifolio | 1.10 | 20.00 |
| | | Caducifolio espinoso | 5.47 | 27.40 |
| Vegas arboladas | | 4.50 | 4.50 | |

Capacidad de pastoreo

Un parámetro asociado es la capacidad de pastoreo de los sitios, expresada en hectáreas por unidad animal, en donde el rendimiento de forraje se expresa en kg de materia seca por hectárea. Su fórmula es la siguiente:

$$CP = \frac{\text{Requerimientos anuales de materia seca (kg/UA)}}{\text{Materia seca (kg/ha)}} = \frac{\text{ha}}{\text{UA}} \quad (3)$$

Donde:

- ha = Hectárea de pastizal.
- UA = Unidad animal adecuada para mantener una explotación permanente.

En el Cuadro 11 se presenta la composición del hato ganadero, reportado por INEGI (2007), para los municipios que cubren la cuenca alta del río Verde.

Cuadro 11. Existencias totales de cabezas de ganado por municipio (INEGI, 2007).

| Clave Núm | Nombre del Municipio | Existencias totales (cabezas) | | | | | |
|--------------|----------------------------|-------------------------------|-------|---------|--------|-------|-------|
| | | Bovino | Ovino | Caprino | Equino | Mular | Asnal |
| 6 | Asunción Nochixtlán | 1065 | 3973 | 258 | 41 | 5 | 794 |
| 26 | Chalcatongo de Hidalgo | 815 | 5726 | 0 | 66 | 18 | 434 |
| 20 | Constancia del Rosario | 316 | 0 | 60 | 46 | 1 | 4 |
| 397 | Heroica Ciudad de Tlaxiaco | 3285 | 6161 | 336 | 125 | 71 | 608 |
| 76 | La Reforma | 1045 | 20 | 0 | 63 | 5 | 22 |
| 46 | Magdalena Jaltepec | 1180 | 2535 | 259 | 44 | 32 | 358 |
| 48 | Magdalena Mixtepec | 22 | 144 | 0 | 18 | 25 | 216 |
| 50 | Magdalena Peñasco | 310 | 2836 | 75 | 2 | 3 | 58 |

| Clave Núm | Nombre del Municipio | Existencias totales (cabezas) | | | | | | |
|--------------|--|-------------------------------|-------|---------|--------|-------|-------|--|
| | | Bovino | Ovino | Caprino | Equino | Mular | Asnal | |
| 562 | Magdalena Yodocono de Porfirio Díaz | 199 | 383 | 55 | 61 | 10 | 128 | |
| 54 | Magdalena Zahuatlán | 44 | 146 | 0 | 4 | 0 | 27 | |
| 73 | Putla Villa De Guerrero | 2312 | 852 | 2271 | 567 | 48 | 128 | |
| 86 | San Agustín Tlaxcopec | 289 | 877 | 219 | 0 | 2 | 40 | |
| 88 | San Andrés Cabecera Nueva | 1340 | 740 | 736 | 120 | 34 | 56 | |
| 94 | San Andrés Nuxiño | 323 | 314 | 0 | 2 | 0 | 45 | |
| 104 | San Antonino El Alto | 110 | 742 | 35 | 38 | 7 | 302 | |
| 108 | San Antonio Huitepec | 798 | 716 | 66 | 190 | 27 | 156 | |
| 110 | San Antonio Sinicahua | 488 | 858 | 0 | 3 | 0 | 221 | |
| 121 | San Bartolo Soyaltepec | 91 | 1290 | 0 | 7 | 0 | 46 | |
| 119 | San Bartolomé Yucuañe | 90 | 23 | 0 | 5 | 0 | 9 | |
| 127 | San Cristóbal Amoltepec | 245 | 675 | 0 | 8 | 0 | 156 | |
| 133 | San Esteban Atlatlahuca | 776 | 722 | 0 | 4 | 0 | 11 | |
| 137 | San Francisco Cahuacuá | 1169 | 190 | 1158 | 85 | 1 | 257 | |
| 140 | San Francisco Chindúa | 114 | 798 | 130 | 6 | 0 | 112 | |
| 144 | San Francisco Jaltepetongo | 261 | 2163 | 266 | 15 | 0 | 441 | |
| 147 | San Francisco Nuxaño | 119 | 789 | 0 | 27 | 4 | 114 | |
| 161 | San Francisco Sola | 253 | 493 | 122 | 10 | 7 | 192 | |
| 172 | San Juan Achiutla | 65 | 934 | 72 | 32 | 2 | 34 | |
| 195 | San Juan Diuxi | 317 | 456 | 0 | 48 | 20 | 138 | |
| 215 | San Juan Sayultepec | 56 | 781 | 0 | 19 | 2 | 12 | |
| 217 | San Juan Tamazola | 2008 | 1983 | 204 | 155 | 38 | 642 | |
| 218 | San Juan Teita | 254 | 0 | 0 | 150 | 4 | 46 | |
| 221 | San Juan Teposcolula | 175 | 1930 | 80 | 28 | 9 | 197 | |
| 239 | San Martín Huamelulpam | 66 | 1468 | 94 | 5 | 0 | 59 | |
| 240 | San Martín Itunyoso | 236 | 197 | 0 | 48 | 2 | 146 | |
| 250 | San Mateo Etlatongo | 261 | 751 | 0 | 14 | 2 | 44 | |
| 252 | San Mateo Peñasco | 180 | 312 | 0 | 11 | 0 | 112 | |
| 255 | San Mateo Sindihui | 627 | 60 | 213 | 159 | 46 | 416 | |
| 258 | San Miguel Achiutla | 96 | 817 | 0 | 7 | 1 | 11 | |
| 269 | San Miguel El Grande | 544 | 3074 | 80 | 7 | 10 | 91 | |
| 273 | San Miguel Peras | 221 | 1176 | 125 | 94 | 6 | 260 | |

| Clave Núm | Nombre del Municipio | Existencias totales (cabezas) | | | | | |
|--------------|--------------------------|-------------------------------|-------|---------|--------|-------|-------|
| | | Bovino | Ovino | Caprino | Equino | Mular | Asnal |
| 274 | San Miguel Piedras | 604 | 177 | 132 | 107 | 4 | 59 |
| 281 | San Miguel Tecamatlán | 34 | 232 | 20 | 10 | 3 | 21 |
| 292 | San Pablo Cuatro Venados | 281 | 850 | 0 | 32 | 13 | 221 |
| 297 | San Pablo Tijaltepec | 631 | 26 | 0 | 17 | 7 | 139 |
| 320 | San Pedro Molinos | 108 | 364 | 0 | 8 | 2 | 77 |
| 329 | San Pedro Tezacoalco | 225 | 180 | 125 | 26 | 0 | 51 |
| 331 | San Pedro Tidaá | 90 | 97 | 0 | 3 | 0 | 32 |
| 332 | San Pedro Topiltepec | 85 | 752 | 0 | 2 | 3 | 66 |
| 370 | Santa Catarina Tayata | 179 | 1312 | 58 | 36 | 3 | 32 |
| 371 | Santa Catarina Ticuá | 223 | 350 | 168 | 17 | 9 | 170 |
| 372 | Santa Catarina Yosonotu | 271 | 84 | 0 | 1 | 2 | 19 |
| 377 | Santa Cruz Itundujia | 1734 | 1366 | 111 | 86 | 7 | 69 |
| 382 | Santa Cruz Tacahua | 223 | 20 | 110 | 1 | 0 | 0 |
| 383 | Santa Cruz Tayata | 107 | 1227 | 220 | 0 | 0 | 10 |
| 569 | Santa Inés de Zaragoza | 693 | 1405 | 0 | 14 | 0 | 122 |
| 392 | Santa Lucía Monteverde | 673 | 2442 | 50 | 108 | 15 | 293 |
| 404 | Santa María Chachoapam | 105 | 764 | 270 | 10 | 1 | 80 |
| 408 | Santa María del Rosario | 100 | 744 | 29 | 2 | 0 | 28 |
| 420 | Santa María Lachixío | 242 | 180 | 0 | 30 | 1 | 153 |
| 423 | Santa María Nduayaco | 148 | 1251 | 60 | 36 | 1 | 89 |
| 426 | Santa María Peñoles | 888 | 1207 | 35 | 20 | 15 | 231 |
| 430 | Santa María Tataltepec | 33 | 42 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 444 | Santa María Yolotepec | 115 | 22 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 445 | Santa María Yosoyúa | 438 | 271 | 0 | 3 | 1 | 166 |
| 446 | Santa María Yucuhiti | 100 | 1146 | 0 | 89 | 17 | 18 |
| 447 | Santa María Zacatepec | 6497 | 50 | 461 | 344 | 65 | 239 |
| 450 | Santiago Amoltepec | 846 | 24 | 415 | 59 | 33 | 196 |
| 466 | Santiago Ixtayutla | 3415 | 1 | 249 | 258 | 99 | 151 |
| 469 | Santiago Juxtlahuaca | 1275 | 1618 | 3661 | 377 | 29 | 426 |
| 479 | Santiago Nejapilla | 14 | 118 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 481 | Santiago Nuyoó | 111 | 618 | 0 | 18 | 9 | 28 |
| 492 | Santiago Tilantongo | 781 | 2415 | 102 | 60 | 47 | 494 |
| 493 | Santiago Tillo | 50 | 593 | 0 | 4 | 0 | 17 |

| Clave Núm | Nombre del Municipio | Existencias totales (cabezas) | | | | | |
|--------------|--------------------------|-------------------------------|-------|---------|--------|-------|-------|
| | | Bovino | Ovino | Caprino | Equino | Mular | Asnal |
| 499 | Santiago Yolomecatl | 258 | 1128 | 174 | 41 | 0 | 36 |
| 500 | Santiago Yosondúa | 1493 | 3768 | 136 | 91 | 7 | 174 |
| 510 | Santo Domingo Ixcatlán | 77 | 358 | 0 | 6 | 0 | 13 |
| 511 | Santo Domingo Nuxaá | 697 | 1509 | 0 | 5 | 6 | 144 |
| 518 | Santo Domingo Tlatayapam | 2 | 234 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 523 | Santo Domingo Yanhuitlán | 168 | 1800 | 258 | 8 | 2 | 57 |
| 532 | Santo Tomás Ocotepec | 765 | 2557 | 30 | 58 | 12 | 121 |
| 277 | Villa Sola de Vega | 4120 | 2584 | 1018 | 134 | 95 | 908 |
| 564 | Yutanduchi de Guerrero | 126 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 570 | Zimatlán de Álvarez | 1300 | 3982 | 230 | 199 | 26 | 288 |

5.6. Materiales

Para la corrida del modelo APEX se empleó la siguiente información:

- Modelo digital de elevaciones escala 1:50,000 con resolución de 15 m del INEGI (2015).
- Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2016) publicado en 1999.
- Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), con información recopilada al año (SMN, 2016).
- Censo ganadero a nivel municipal del INEGI (2007)
- Rendimientos de cultivo de maíz a nivel municipio del INEGI (1994 y 1998).

También se utilizó el siguiente software:

- ArcAPEX para ArcGis 10.2
- QGIS 2.8.1
- Global weather data for SWAT (CFSR, 2015)
- Microsoft Office Professional Plus 2013.
- Google earth pro

5.7. Metodología

La obtención de datos se basó en lo descrito por Sharpley y Williams (1990) y Williams *et al.* (1990), que indican que la información requerida por el modelo APEX son: datos generales (dimensiones del área, ubicación geográfica, elevación, entre otras), clima (temperatura máxima y mínima, precipitación, humedad relativa, evaporación y radiación), suelo (características generales y descripción fisicoquímica de cada capa del suelo), manejo del cultivo (fechas y prácticas agrícolas aplicadas al cultivo) y variables fisiotécnicas de la planta (altura, índice de área foliar, relación biomasa-energía, índice de cosecha, entre otras). El diagrama de flujo de la Figura 8 muestra la secuencia seguida para modelar la cuenca con el modelo APEX y las salidas que se producen al correr este.

La metodología muestra como primer paso el acopió de información vectorial (MDE, suelos y uso de suelo y vegetación), de campo (propiedades físicas y químicas de suelos y de vegetación) y estadística (datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, escurrimientos y sedimentos) necesaria para alimentar APEX. Con la información recopilada se delimito la cuenca, se definieron las subcuencas y las subáreas.

Se calibraron los parámetros fisiotécnicos del modelo en pequeñas variaciones hasta que el rendimiento de grano y forraje fuera igual o cercano a lo reportado.

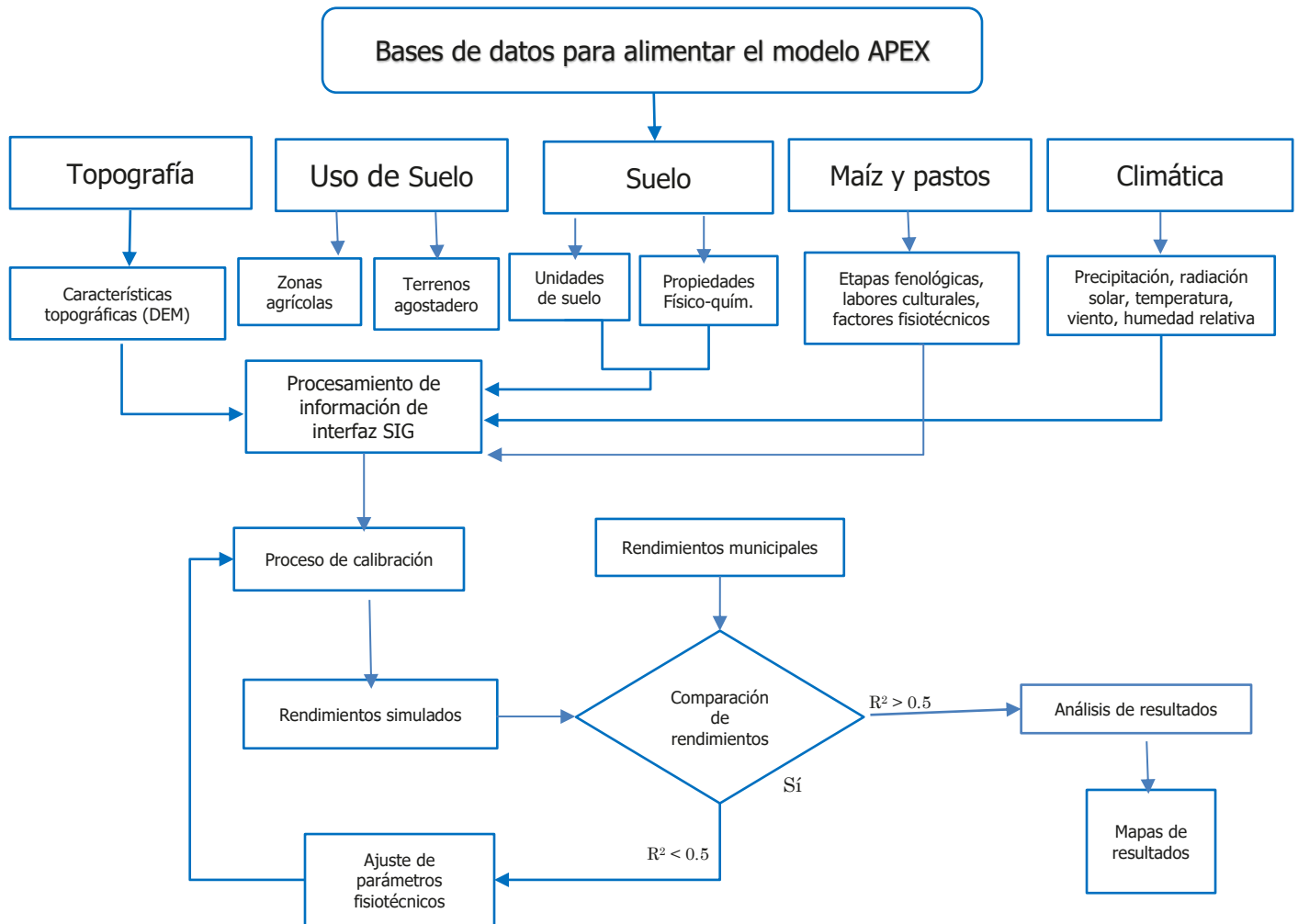


Figura 8. Diagrama de flujo metodológico.

6.1.10. Delimitación del área de estudio

Delimitación de la cuenca y alimentación del modelo APEX

La cuenca se delimitó con la interface del modelo APEX denominado *Agricultural Policy / Enviromental Extender Model* (Figura 9) usando un MDE, de 15 m resolución, de INEGI (2012). Se tomó como punto de salida la estación hidrométrica Ixtlayutla (20,021), localizada en 16° 32' 55.9" de latitud norte y 97° 34' 0.07" de longitud oeste.

A partir de la delimitación que se realiza con ARC_APEX para cada subárea se calculan los parámetros que se muestran en la Figura 10 y se describen en el Cuadro 12.

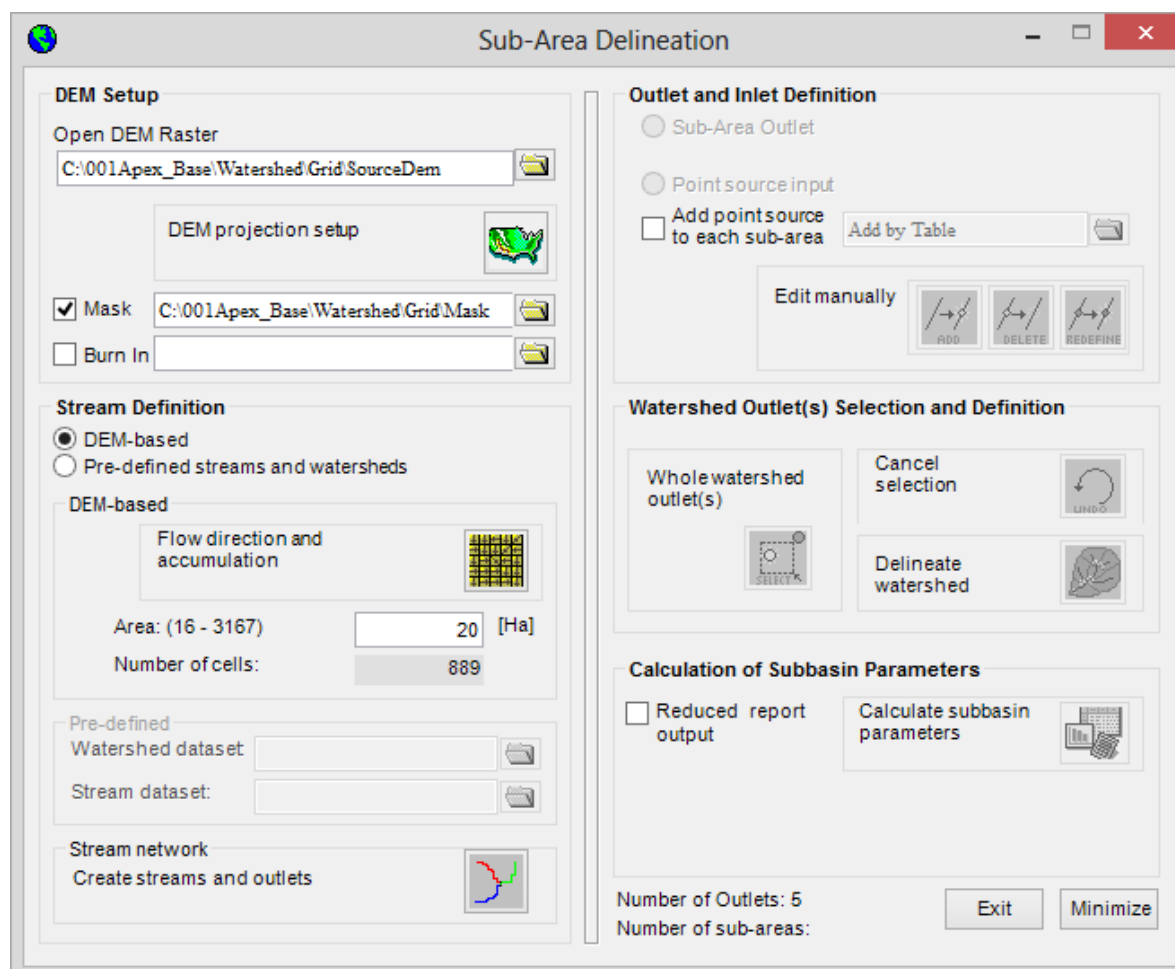


Figura 9. Delimitación de la cuenca con APEX.

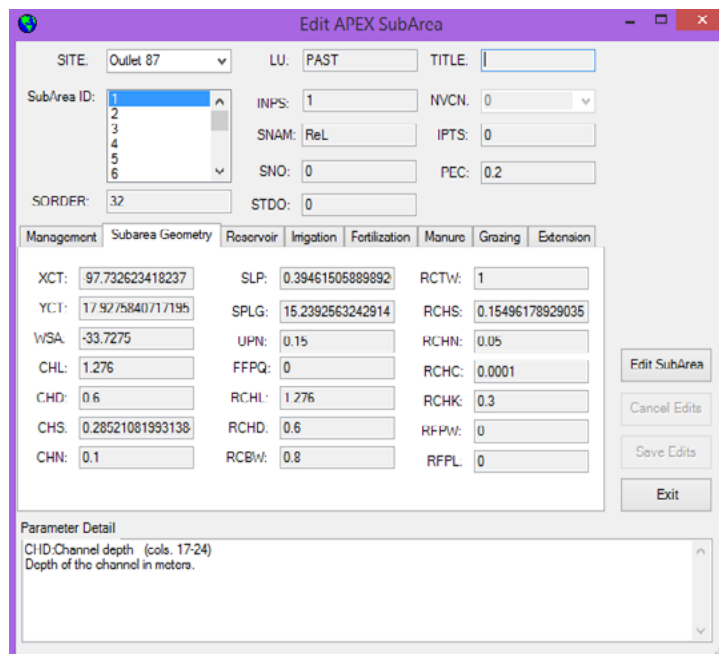


Figura 10. Ventana de edición de subáreas del modelo APEX.

Cuadro 12. Descripción de los campos de la ventana de edición de subáreas

| Variable | Descripción |
|----------|---|
| XCT | Coordenada X (Longitud) del centroide del subárea. |
| YCT | Coordenada Y (Latitud) del centroide del subárea. |
| WSA | Área de la cuenca (drenaje), ha. |
| CHL | Distancia desde la salida hasta el punto más distante en la cuenca (Longitud del canal) |
| CHD | Profundidad del canal (m), si es desconocido ingrese 0. |
| CHS | Pendiente del canal principal. |
| CHN | Valor de Manning (N) para el canal. |
| SLP | Pendiente media de la ladera |
| SLPG | Longitud promedio de la pendiente de la ladera. |
| UPN | Valor de Manning (N) para meseta |
| FFPQ | Fracción del flujo de la llanura de inundación |
| RCHL | Longitud del canal de alcance de enrutamiento |
| RCHD | Profundidad del canal de alcance de enrutamiento |
| RCBW | Ancho inferior del canal de acceso de enrutamiento |
| RCTW | Ancho máximo del canal de alcance de enrutamiento |
| RCHS | Canal inclinado del alcance de enrutamiento |

Cuadro 13. Variables climáticas mensuales para el generador climático APEX.

| Variable | Valor mínimo | Valor máximo | Descripción |
|-----------------|---------------------|---------------------|---|
| WID | - | - | Nombre o identificador de la estación |
| LON | -180 | 180 | Longitud de la estación |
| LAT | -90 | 90 | Latitud de la estación |
| ELEV | 0 | 5000 | Elevación de la estación |
| OBMX | -40 | 40 | Temperatura máxima promedio mensual del aire (°C) |
| OBMN | -30 | 50 | Promedio de temperatura mínima mensual del aire (°C) |
| SDTMX | 0.1 | 100 | Desviación estándar promedio mensual de la temperatura máxima diaria (°C) |
| SDTMN | 0.1 | 30 | Desviación estándar promedio mensual de la temperatura mínima diaria (°C) |
| RMO | 0 | 600 | Precipitación media mensual (mm) |
| RST2 | 0 | 50 | Desviación estándar mensual de la precipitación diaria (mm). |
| RST3 | -50 | 20 | Coefficiente de sesgo mensual de precipitación diaria) |
| PRW1 | 0 | 0.95 | Probabilidad mensual de día húmedo después del día seco |
| PRW2 | 0 | 0.95 | Probabilidad mensual de día húmedo después del día húmedo |
| DAYP | 0 | 31 | Promedio de días de lluvia por mes (días). |
| WI | 0 | 125 | Precipitación mensual máxima de 0.5h (mm). |
| OBSL | 0 | 750 | Promedio de radiación solar mensual (MJ/m ² o LY (Langley)) |
| UAV0 | | | Velocidad de viento promedio mensual (m/s) |

Además de la información climática histórica diaria de 27 estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2016) también se recopiló información climática de 81 cuadrantes (38x38 km) del *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP, 2016). Después de ajustar los datos del NCEP a la tendencia regional histórica del SMN se obtuvo, para los 81 cuadrantes, la serie diaria para los años 1991 y 1994, para la simulación de rendimientos de maíz, y de 2007 para la simulación de biomasa en pastos inducidos. Los datos climáticos empleados fueron precipitación (RMO), temperatura máxima (OBMX) y temperatura mínima (OBMN), radiación solar (OBSL), humedad relativa (RH), velocidad del viento (UAV0) y precipitación máxima de 0.5h (WI). Estos datos diarios se capturaron en el formato requerido por el modelo (*.txt), de temperatura (máxima y mínima) y precipitación.

6.1.12. Información de uso de suelo y vegetación

La capa vectorial de uso de suelo y vegetación que se utilizó para alimentar al modelo, se obtuvo de un estudio realizado por la WWF (2014) en la cuenca a través de imágenes

de satélite Landsat con resolución de 5 m y verificación en campo (Figura 5). Para cargar al modelo los polígonos de cobertura vegetal, estos se ajustaron a la superficie de la cuenca y se convirtieron a formato *grid*. Así mismo, se asignó a los usos de suelo de agricultura y pastizal inducido (Pasto bandera, *Bouteloa Curpitendula*) los parámetros fisiotécnicos que requiere APEX (Figura 12, Cuadro 14). Esta información se capturó en la base de datos "crop", con los datos fisiotécnicos que calibró Sánchez, *et. al*, 2017 para la misma cuenca con el modelo SWAT.

The screenshot shows the 'Edit Crop Database' window. On the left, a list of crop names is visible, with 'CORN' highlighted. The main area contains a grid of input fields for various crop parameters. The parameters and their values are as follows:

| | | | | | |
|--------|--------|-------|--------|-----------|-------|
| CNUM: | 2 | CPY: | 0.0025 | IDC: | 4 |
| CPNM: | CORN | CKY: | 0.0032 | FRST1: | 5.15 |
| WA: | 40 | WSYF: | 0.3 | FRST2: | 15.95 |
| HI: | 0.33 | PST: | 0.6 | WAVP: | 8 |
| TOP: | 25 | COSD: | 0.61 | VPTH: | 0.5 |
| TBS: | 9 | PRYG: | 269 | VPD2: | 4.75 |
| DMLA: | 6 | PRYF: | 96 | RWPC1: | 0.4 |
| DLAI: | 0.8 | WCY: | 0.14 | RWPC2: | 0.2 |
| DLAP1: | 15.05 | BN1: | 0.044 | GMHU: | 100 |
| DLAP2: | 50.95 | BN2: | 0.018 | PPLP1: | 4.47 |
| RLAD: | 1 | BN3: | 0.0165 | PPLP2: | 7.81 |
| RBMD: | 0.1 | BP1: | 0.0062 | STX1: | 0.12 |
| ALT: | 3 | BP2: | 0.0023 | STX2: | 1.7 |
| GSI: | 0.007 | BP3: | 0.0018 | BLG1: | 0.01 |
| CAF: | 0.85 | BK1: | 0.015 | BLG2: | 0.1 |
| SDW: | 20 | BK2: | 0.012 | WUB: | 0.055 |
| HMX: | 2.3 | BK3: | 0.009 | FTO: | 0 |
| RDMX: | 2 | Bw1: | 0.433 | FLT: | 0 |
| WAC2: | 660.45 | Bw2: | 0.433 | OPS_NAME: | MTMP |
| CNY: | 0.013 | Bw3: | 0.213 | Select: | |

Buttons on the right side include: Edit Crop, Cancel Edits, Save Edits, Set Default, Exit, and Select.

The 'Parameter Detail' section at the bottom provides the following text for the 'WA' parameter:

WA: Biomass-Energy Ratio (CO2=330ppm). This is the potential (unstressed) growth rate (including roots) per unit of intercepted photosynthetically active radiation. This parameter should be one of the last to be adjusted. Adjustments should be based on research results. This parameter can greatly change the rate of growth, incidence of stress during the season and the resultant yield. Care should be taken to make adjustments in the parameter only based on data with no drought, nutrient or temperature stress. WA is also known as radiation use efficiency.

Figura 12. Ventana de parámetros fisiotécnicos requeridos por el modelo APEX.

Cuadro 14. Parámetros fisiotécnicos requeridos por el modelo APEX.

| Parámetro | Descripción | Pastizal Inducido | Agricultura de temporal |
|-----------|--|--|--|
| CNUM | Código de 4 caracteres para representar la cobertura del suelo/nombre planta | PASI | TEMP |
| CPNM | Nombre de la descripción de los cultivos. | Pastizal Inducido <i>Sideoats grama</i> | Agricultura de temporal <i>Corn</i> |
| WA | Relación Biomasa/energía (CO ₂ =330ppm). | 10 | 39 |
| HI | Índice de cosecha. (kg ha ⁻¹) | 0.7 | 0.33 |
| DMLA | índice de área foliar máxima (m ² m ⁻²) | 5 | 2 |
| DLAP1 | Fracción de la temporada de cultivo de plantas correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo de las hojas óptimo área. | 0.15 | 0.15 |
| DLAP2 | Fracción de la temporada de cultivo de plantas correspondientes al segundo punto de la curva de desarrollo de las hojas óptimo área. | 0.5 | 0.5 |
| DLAI | Fracción de la estación de crecimiento cuando el área de la hoja comienza a disminuir. | 0.99 | 0.7 |
| HMX | Máxima altura del dosel. | 1 | 2.5 |
| TOP | Temperatura óptima para el crecimiento vegetal. (°C) | 25 | 25 |
| TBS | Temperatura mínima de crecimiento de las plantas. (°C) | 8 | 8 |
| CNY | Fracción de nitrógeno en las semillas. (kg N/kg semilla) | 0.0234 | 0.014 |
| CPY | Fracción de fósforo en las semillas. (kg P/kg semilla) | 0.0033 | 0.0016 |
| BN1 | Fracción de N en las plantas durante la emergencia. | 0.06 | 0.047 |
| BN2 | Fracción de N en la planta de 0.5 madurez. | 0.0231 | 0.0177 |
| BN3 | Fracción de N en la planta en la madurez | 0.0134 | 0.0138 |
| BP1 | Fracción de P durante la emergencia. | 0.0084 | 0.0048 |
| BP2 | Fracción de P en el 0.5 madurez. | 0.0032 | 0.0018 |
| BP3 | Fracción de P en la madurez. | 0.0019 | 0.0014 |
| WSYF | Límite inferior del índice de cosecha. | 0.01 | 0.3 |
| GSI | Máxima conductancia estomática (en condiciones de sequía). | 0.005 | 0.007 |
| WAVP | Tasa de disminución en la eficiencia de la radiación uso por unidad de incremento en el déficit de presión de vapor. | 6 | 7.2 |
| WAC2 | Concentración de CO ₂ / Valor de WA resultante (Variable dividida). (ul l ⁻¹) | 660 | 660 |

6.1.13. Información de manejo

El modelo se alimentó con información de las prácticas agrícolas que realizan los productores en la región para la preparación del terreno, siembra, riego, fertilización, control de malezas, control de plagas y enfermedades, cosecha, etc. De este modo, se tomaron las operaciones, fechas y cantidades del paquete tecnológico para el ciclo primavera-verano de este cultivo obtenido por Salas (2013), el cual se detalla en el Cuadro 6.

Para la calibración del modelo fue necesario contar con datos medidos de rendimientos de forrajes, con el propósito de compararlos con los datos simulados y así poder realizar la calibración que se ajuste a los rendimientos de granos reportados a nivel municipal. Dada la importancia agrícola regional del cultivo de maíz en condiciones de temporal, las áreas agrícolas se consideraron como si estas fueran cultivadas en su totalidad por maíz. En la Figura 13 y Cuadro 15 se muestran las operaciones de manejo que son proporcionadas al modelo APEX.

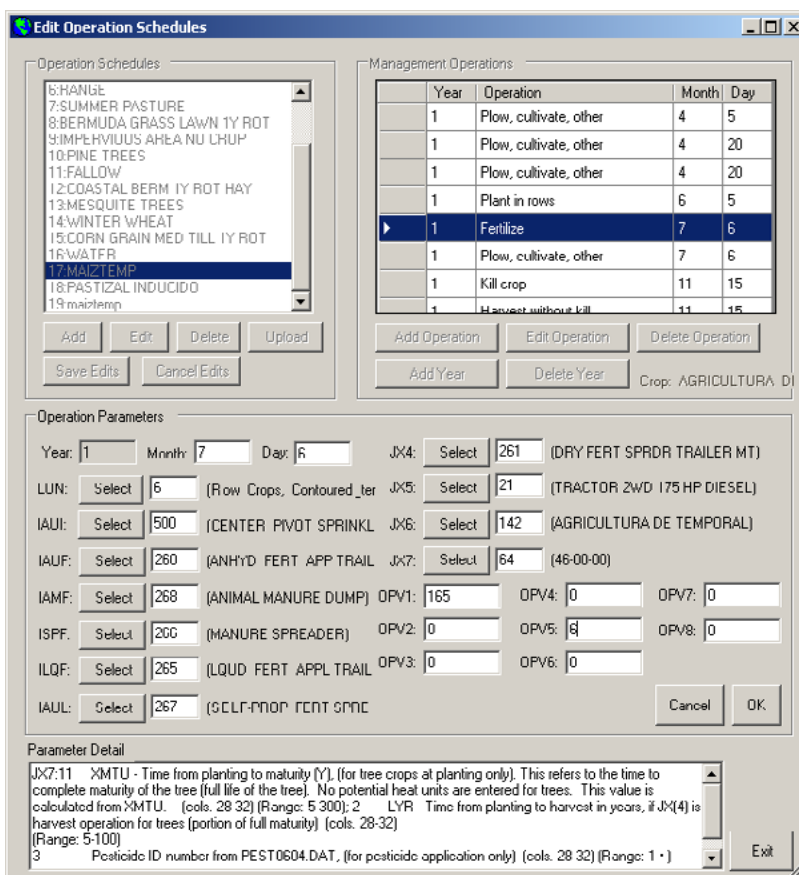


Figura 13. Ventana de edición de las variables de manejo para el modelo APEX.

Cuadro 15. Descripción de las variables de manejo requeridas por el modelo APEX

| Variable | Descripción |
|----------|--|
| LUN | Número de uso de la tierra |
| IAUI | Irrigación automática |
| IAUF | Fertilizante comercial automático |
| IAMF | Auto Deposición de estiércol por animales |
| ISPF | Aplicación de estiércol sólido automático |
| ILQF | Aplicación de estiércol líquido automático |
| IAUL | Aplicación automática de cal |
| JX(1) | Año de operación |
| JX(2) | Mes de operación |
| JX(3) | Día de operación |
| J(4) | Número de ID de labranza |
| JX(5) | ID tractor |
| JX(6) | Número de identificación de cultivo |
| OPV1 | Unidades de calor potencial (PHU) para plantar. |
| OPV2 | Condición SCS número de la curva, o Uso de la Tierra número (opcional) |
| OPV3 | Disparador de riego automático |
| OPV4 | Se aplica agua de riego vol/vol. |
| OPV5 | Población de plantas |

| | |
|------|--|
| OPV6 | Máximo fertilizante N anual aplicado a un cultivo |
| OPV7 | Tiempo de operación como fracción de la temporada de crecimiento |

6.1.14. Información de suelos

La capa vectorial de suelo utilizada para alimentar al modelo, se obtuvo del ajuste que realizó Sánchez et al. (2017), a la carta de INEGI (2006). Asimismo, las propiedades físicas y químicas de los suelos presentes en la cuenca, se definieron a partir los valores definidos por estos mismos autores, con base en los perfiles de suelo del INEGI (2016) y muestreos de suelo que realizaron. Las propiedades físicas y químicas capturadas (Figura 14), en la base de datos de suelo de APEX (usersoils.dbf), a diferentes profundidades fueron: distribución granulométrica del suelo (arenas, limo, arcillas), pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Las propiedades de los suelos a diferentes profundidades o capas, presentes en la cuenca, se resumen en el Cuadro 16.

Figura 14. Ventana de edición de las variables de suelo para el modelo APEX.

Cuadro 16. Propiedades físicas y químicas, por tipo de suelo, para el modelo APEX.

| Tipo de suelo | Luvisol | Phaeozem | Litosol | Regosol | Rendzina | Vertisol | Acrisol | Cambisol | Fluvisol |
|---------------|---------|------------------------|---------|------------------|----------------|-----------------------|---------|----------|----------|
| SNAM | EL | HcSf | ISf | RcSf | ReL | VcSf | AC | CM | FLP |
| NLAYERS | 1 | 3 | 1 | 2 | 1 | 3 | 4 | 7 | 2 |
| HYDGRP | B | B | B | B | C | C | C | B | B |
| SOL_ZMX | 350 | 1000 | 150 | 650 | 350 | 1000 | 1100 | 1250 | 1000 |
| ANION_EXC | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| L | | | | | | | | | |
| SOL_CRK | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.5 |
| TEXTURE | Franco | Franco arcillo arenoso | Franco | Franco arcilloso | Franco arenoso | Franco arcillo limoso | ND | SIL-UWB | SIL-UWB |
| SOL_Z1 | 350 | 350 | 150 | 350 | 350 | 350 | 190 | 100 | 250 |
| SOL_BD1 | 1.08 | 1.3 | 1.29 | 1.24 | 2.16 | 1.61 | 1.25 | 1.13 | 1.6 |
| SOL_AWC1 | 0.114 | 0.18 | 0.067 | 0.171 | 0.075 | 0.136 | 0.11 | 0.16 | 0.05 |
| SOL_K1 | 614 | 15 | 80.8 | 1 | 4.3 | 145 | 2.65 | 43.19 | 33.5 |
| SOL_CBN1 | 5.65 | 1.39 | 1.22 | 1.51 | 0.85 | 1.78 | 2.5 | 3.8 | 0.1 |
| CLAY1 | 22.6 | 37.7 | 20.6 | 38 | 9 | 33.1 | 54 | 16 | 10 |
| SILT1 | 32.74 | 27.2 | 33.06 | 40 | 33 | 49.23 | 30 | 44 | 14 |
| SAND1 | 44.66 | 35.1 | 46.34 | 22 | 58 | 17.67 | 16 | 40 | 76 |
| ROCK1 | 5 | 0 | 0 | 0 | 50 | 0 | 5 | 2 | 35 |
| SOL_ALB1 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| USLE_K1 | 0.023 | 0.2 | 0.16 | 0.2 | 0.25 | 0.13 | 0.005 | 0.32 | 0.2 |
| SOL_EC1 | 0.18 | 0.5 | 0.34 | 0.15 | 0.14 | 0.37 | 2.5 | 3.5 | 1 |
| SOL_Z2 | 0 | 650 | 0 | 650 | 0 | 650 | 380 | 160 | 1000 |
| SOL_BD2 | 0 | 1.3 | 0 | 1.24 | 0 | 1.7 | 1.27 | 1.41 | 1.61 |
| SOL_AWC2 | 0 | 0.13 | 0 | 0.15 | 0 | 0.11 | 0.11 | 0.13 | 0.04 |
| SOL_K2 | 0 | 21 | 0 | 1 | 0 | 176 | 0.93 | 24.4 | 37.97 |
| SOL_CBN2 | 0 | 0.8 | 0 | 0.58 | 0 | 0.76 | 1.3 | 1.7 | 0.1 |
| CLAY2 | 0 | 41.2 | 0 | 34 | 0 | 31.3 | 54 | 16 | 6 |
| SILT2 | 0 | 24.9 | 0 | 42 | 0 | 48.25 | 24 | 40 | 12 |
| SAND2 | 0 | 33.9 | 0 | 24 | 0 | 20.45 | 18 | 44 | 82 |
| ROCK2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 2 | 35 |
| SOL_ALB2 | 0 | 0.13 | 0 | 0.13 | 0 | 0.13 | 0.08 | 0.08 | 0.08 |
| USLE_K2 | 0 | 0.2 | 0 | 0.22 | 0 | 0.38 | 0.07 | 0.3 | 0.2 |

| Tipo de suelo | Luvisol | Phaeozem | Litosol | Regosol | Rendzina | Vertisol | Acrisol | Cambisol | Fluvisol |
|----------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| SOL_EC2 | 0 | 0.35 | 0 | 0.16 | 0 | 0.28 | 1 | 1 | 1 |
| SOL_Z3 | 0 | 1000 | 0 | 0 | 0 | 1000 | 790 | 320 | 0 |
| SOL_BD3 | 0 | 1.28 | 0 | 0 | 0 | 1.41 | 1.26 | 1.5 | 0 |
| SOL_AWC3 | 0 | 0.14 | 0 | 0 | 0 | 0.127 | 0.11 | 0.14 | 0 |
| SOL_K3 | 0 | 100 | 0 | 0 | 0 | 40.7 | 0.77 | 24.46 | 0 |
| SOL_CBN3 | 0 | 0.52 | 0 | 0 | 0 | 1.1 | 0.8 | 1 | 0 |
| CLAY3 | 0 | 45 | 0 | 0 | 0 | 21.5 | 58 | 12 | 0 |
| SILT3 | 0 | 23.9 | 0 | 0 | 0 | 47.05 | 24 | 46 | 0 |
| SAND3 | 0 | 31.1 | 0 | 0 | 0 | 31.45 | 18 | 42 | 0 |
| ROCK3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| SOL_ALB3 | 0 | 0.13 | 0 | 0 | 0 | 0.13 | 0.13 | 0.13 | 0 |
| USLE_K3 | 0 | 0.21 | 0 | 0 | 0 | 0.29 | 0.07 | 0.3 | 0 |
| SOL_EC3 | 0 | 0.4 | 0 | 0 | 0 | 0.44 | 1 | 2 | 0 |
| SOL_Z4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1100 | 470 | 0 |
| SOL_BD4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.21 | 1.6 | 0 |
| SOL_AWC4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.12 | 0.15 | 0 |
| SOL_K4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.4 | 14.99 | 0 |
| SOL_CBN4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 0.3 | 0 |
| CLAY4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 58 | 12 | 0 |
| SILT4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 34 | 52 | 0 |
| SAND4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 36 | 0 |
| ROCK4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 0 |
| SOL_ALB4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.13 | 0.13 | 0 |
| USLE_K4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.07 | 0.3 | 0 |
| SOL_EC4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2.1 | 0 |
| SOL_Z5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 720 | 0 |
| SOL_BD5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.45 | 0 |
| SOL_AWC5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.16 | 0 |
| SOL_K5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 15.81 | 0 |
| SOL_CBN5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.2 | 0 |
| CLAY5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 0 |
| SILT5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 54 | 0 |
| SAND5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 30 | 0 |

| Tipo de suelo | Luvisol | Phaeozem | Litosol | Regosol | Rendzina | Vertisol | Acrisol | Cambisol | Fluvisol |
|----------------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| ROCK5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| SOL_ALB5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.13 | 0 |
| USLE_K5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.3 | 0 |
| SOL_EC5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.6 | 0 |
| SOL_Z6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 910 | 0 |
| SOL_BD6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.6 | 0 |
| SOL_AWC6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.12 | 0 |
| SOL_K6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13.36 | 0 |
| SOL_CBN6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.2 | 0 |
| CLAY6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 16 | 0 |
| SILT6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 40 | 0 |
| SAND6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 44 | 0 |
| ROCK6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| SOL_ALB6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.13 | 0 |
| USLE_K6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.2 | 0 |
| SOL_EC6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.6 | 0 |
| SOL_Z7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1250 | 0 |
| SOL_BD7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.62 | 0 |
| SOL_AWC7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.14 | 0 |
| SOL_K7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 12.54 | 0 |
| SOL_CBN7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.1 | 0 |
| CLAY7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14 | 0 |
| SILT7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 48 | 0 |
| SAND7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 38 | 0 |
| ROCK7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| SOL_ALB7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.13 | 0 |
| USLE_K7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.2 | 0 |
| SOL_EC7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 |

6.1.15. Calibración del modelo

La calibración de los modelos a nivel se realiza para analizar el comportamiento de sub-modelos específicos o para extrapolar los resultados obtenidos, durante un

experimento de tiempo limitado, a un período largo (Wang *et al.*, 2006). En este caso, las predicciones del modelo se compararon a nivel municipio utilizando reportes estadísticos y parámetros de suelo, manejo de cultivo y tipo labranza (fertilización, riego, tratamiento químico, siembra y fechas de cosecha). Específicamente, se comparó, a través de análisis de regresión, el rendimiento de maíz simulado con APEX con los reportados por los censos agrícolas 1991 (INEGI, 1994) y 1994 (INEGI, 1998). Asimismo, la producción de pasto simulada con el modelo para 2007 se comparó con el consumo de forraje estimado según el hato ganadero reportado por censo ganadero de INEGI (2007b).

A fin de comparar la biomasa de pasto simulada por APEX con el consumo de forraje del hato ganadero reportado en el censo ganadero de INEGI (2007b), se calculó este consumo con base en la superficie de agostadero de cada municipio y convirtiendo el tamaño del hato censado en Unidades Animal (UA), según el procedimiento descrito por COTECOCA (1969).

Para el cálculo de las UA se tomaron en cuenta los siguientes supuestos 1) no se incluyó el ganado lechero (estabulado) ya que este básicamente no sale a los agostaderos; 2) el hato ganadero, compuesto principalmente por ganado menor, hace buen aprovechamiento del forraje y su eficiencia de pastoreo alcanza 70%; 3) en los meses más críticos del estiaje los pies de cría (caprinos, ovinos y bovinos) y animales de trabajo se alimentan básicamente de rastrojo de maíz y del pastoreo en áreas forestales; 4) se considera un peso de 425 kg por UA y un consumo diario de forraje correspondiente al 3% de peso su vivo; 5) para ganado bovino (trabajo y engorda), caballar y mular se asignó un factor de 1.0 UA, para asnal de 0.6 UA y para caprino y ovino de 0.3 UA.

El crecimiento de las plantas, en APEX, depende de las curvas de crecimiento vegetal por lo que se ajustaron aquellos parámetros asociados a la producción de biomasa en función de los valores de rendimiento simulados y observados, procurando que los

parámetros empleados no variaran, respecto a los de referencia (Cuadro 14), más del 10%.

7. RESULTADOS

Aprovechando el gran número de municipios que tiene el estado de Oaxaca, en este trabajo, se compararon los rendimientos de maíz y forraje simulados con APEX con los rendimientos de grano reportados a nivel municipal por censos agrícolas de INEGI (1994) e INEGI (1998) y el censo ganadero de INEGI (2007b), este último convertido a UA y consumo de forraje. El crecimiento de las plantas, en APEX, depende de las curvas de crecimiento vegetal por lo que se calibraron aquellos parámetros asociados a la producción de biomasa, principalmente: relación Biomasa/energía (WA), índice de cosecha (HI), índice de área foliar máxima (DMLA).

5.8. La producción de maíz en laderas

En el Cuadro 17 y la Figura 15 se presentan a nivel municipal, para los años de 1991 y 1994, los rendimientos de grano promedio reportados por el INEGI (1994 y 1998) y los rendimientos medios simulados con APEX a través de datos climáticos del CFSR (ANEXO 2) ajustados a las observaciones del SMN para ambos años. El área de influencia de la cuenca presenta una densidad de estaciones climatológicas del SMN regular y falta de registros intermitentes por lo que se optó por correr con datos climáticos diarios del CFSR¹ (*Climate Forecast System Reanalysis*); perteneciente al *National Center for Atmospheric Research*, EUA. El CFSR reporta datos de precipitación, viento, humedad relativa, y radiación solar para una cuadrícula de 38 x 38 km. Esta información es resultado de técnicas de simulación con imágenes de satélite y datos de estaciones en

¹ <https://globalweather.tamu.edu/#pubs>

terreno y océanos; la cual ha sido utilizada en diversas investigaciones con resultados satisfactorios.

Cuadro 17. Rendimientos medios municipales de maíz: reportados por el INEGI y simulados por APEX.

| Clave | Municipio | Censo | APEX | Censo | APEX |
|-------|----------------------------|-------|------|-------|------|
| | | 1991 | 1991 | 1994 | 1994 |
| | | t/ha | t/ha | t/ha | t/ha |
| 6 | Asunción Nochixtlán | 0.5 | 0.58 | 0.46 | 0.56 |
| 20 | Constancia del Rosario | 1.8 | 1.98 | 0.91 | 1.75 |
| 26 | Chalcatongo de Hidalgo | 0.9 | 0.76 | | 1.11 |
| 46 | Magdalena Jaltepec | 0.6 | 0.69 | 0.57 | 0.85 |
| 50 | Magdalena Peñasco | 0.6 | 0.91 | 0.58 | 0.57 |
| 54 | Magdalena Zahuatlán | 0.4 | 0.52 | 0.33 | 0.55 |
| 73 | Putla Villa de Guerrero | 1.3 | 1.62 | 1.25 | 1.40 |
| 86 | San Agustín Tlacotepec | 0.6 | 0.91 | 0.57 | 1.20 |
| 88 | San Andrés Cabecera Nueva | 1.0 | 1.30 | 1.15 | 1.18 |
| 108 | San Antonio Huitepec | 1.0 | 1.28 | 0.98 | 1.27 |
| 119 | San Bartolomé Yucuañe | 0.5 | 0.88 | 0.52 | 1.26 |
| 121 | San Bartolo Soyaltepec | 0.3 | 0.48 | 0.34 | 0.57 |
| 127 | San Cristóbal Amoltepec | 0.4 | 0.84 | 0.37 | 0.54 |
| 133 | San Esteban Atatlahuca | 0.7 | 0.82 | 0.72 | 1.02 |
| 135 | San Felipe Tejalaápam | | 0.43 | 0.35 | 0.53 |
| 137 | San Francisco Cahuacuá | 1.2 | 1.12 | 1.81 | 2.83 |
| 140 | San Francisco Chindúa | 0.8 | 0.68 | 0.76 | 1.23 |
| 144 | San Francisco Jaltepetongo | 0.2 | 0.43 | 0.20 | 0.31 |
| 147 | San Francisco Nuxaño | 0.5 | 0.77 | 0.52 | 0.88 |
| 172 | San Juan Achiutla | 1.1 | 1.10 | 1.07 | 1.45 |

| | | | | | |
|-----|----------------------------|-----|------|------|------|
| 215 | San Juan Sayultepec | 0.8 | 0.68 | 0.81 | 0.97 |
| 217 | San Juan Tamazola | 0.8 | 1.07 | | 0.98 |
| 239 | San Martín Huamelúlpam | 0.5 | 0.87 | 0.44 | 0.97 |
| 240 | San Martín Itunyoso | 1.3 | 1.72 | 1.28 | 2.22 |
| 250 | San Mateo Etlatongo | 0.6 | 0.60 | 0.61 | 0.69 |
| 252 | San Mateo Peñasco | 0.8 | 0.99 | 0.72 | 1.24 |
| 258 | San Miguel Achiutla | 0.4 | 0.84 | 0.4 | 0.53 |
| 273 | San Miguel Peras | 0.8 | 1.17 | 0.82 | 1.60 |
| 274 | San Miguel Piedras | | 2.70 | 2.19 | 2.93 |
| 277 | Villa Sola de Vega | 0.7 | 1.18 | 0.90 | 1.13 |
| 281 | San Miguel Tecomatlán | 0.5 | 0.56 | | 0.61 |
| 292 | San Pablo Cuatro Venados | 0.8 | 1.13 | 0.79 | 1.29 |
| 297 | San Pablo Tijaltepec | 0.9 | 0.76 | 0.87 | 1.35 |
| 320 | San Pedro Molinos | 0.9 | 0.75 | 0.96 | 1.86 |
| 331 | San Pedro Tidaá | 0.6 | 0.87 | 0.62 | 1.07 |
| 332 | San Pedro Topiltepec | 0.5 | 0.54 | 0.46 | 0.57 |
| 370 | Santa Catarina Tayata | 0.5 | 0.88 | 0.47 | 0.89 |
| 371 | Santa Catarina Ticuá | 0.6 | 0.63 | 0.55 | 0.77 |
| 372 | Santa Catarina Yosonotú | 0.8 | 0.79 | 0.79 | 0.93 |
| 377 | Santa Cruz Itundujia | 1.0 | 1.19 | 0.95 | 1.55 |
| 383 | Santa Cruz Tayata | 0.4 | 0.84 | 0.35 | 0.49 |
| 386 | Santa Cruz Zenzontepec | 2.0 | 2.01 | 2.01 | 2.12 |
| 397 | Heroica Ciudad de Tlaxiaco | 0.6 | 0.91 | | 0.74 |
| 404 | Santa María Yosoyúa | 0.8 | 0.71 | 0.77 | 1.30 |
| 408 | Santa María del Rosario | 0.6 | 0.91 | 0.55 | 0.64 |
| 420 | Santa María Lachixío | 1.1 | 1.36 | 1.06 | 1.90 |
| 423 | Santa María Nduayaco | 0.4 | 0.68 | 0.42 | 0.78 |
| 426 | Santa María Peñoles | 0.6 | 1.09 | 0.63 | 1.51 |
| 430 | Santa María Tataltepec | 0.7 | 0.94 | 0.72 | 1.15 |

| | | | | | |
|-----|--|-----|------|------|------|
| 444 | Santa María Yolotepec | 1.0 | 0.90 | 1.04 | 1.05 |
| 446 | Santa María Yucuhiti | 0.7 | 1.12 | 0.68 | 1.27 |
| 450 | Santiago Amoltepec | 2.0 | 2.17 | 2.01 | 2.99 |
| 466 | Santiago Ixtayutla | 1.2 | 1.75 | 1.21 | 1.51 |
| 469 | Santiago Juxtlahuaca | 0.9 | 1.54 | 0.84 | 1.34 |
| 479 | Santiago Nejapilla | 0.4 | 0.50 | 0.39 | 0.58 |
| 481 | Santiago Nuyoó | 0.6 | 1.09 | 0.57 | 0.81 |
| 491 | Santiago Textitlán | 1.9 | 1.90 | 1.86 | 2.69 |
| 492 | Santiago Tilantongo | | 0.32 | 0.26 | 0.35 |
| 494 | Santiago Tlazoyaltepec | 0.7 | 1.12 | 0.72 | 1.34 |
| 500 | Santiago Yosondúa | 1.0 | 0.90 | 0.95 | 1.57 |
| 510 | Santo Domingo Ixcatlán | 1.0 | 0.91 | 0.96 | 1.23 |
| 511 | Santo Domingo Nuxaá | 0.5 | 0.98 | 0.53 | 1.53 |
| 518 | Santo Domingo Tlatayápam | 0.5 | 0.55 | 0.48 | 0.68 |
| 521 | Santo Domingo Tonaltepec | 0.5 | 0.56 | 0.41 | 0.69 |
| 523 | Santo Domingo Yanhuitlán | 0.6 | 0.63 | 0.58 | 0.66 |
| 532 | Santo Tomás Ocotepec | 0.9 | 1.29 | 0.88 | 1.43 |
| 535 | San Vicente Lachixío | 1.2 | 1.38 | 1.22 | 2.03 |
| 562 | Magdalena Yodocono de Porfirio Díaz | 0.6 | 0.83 | 0.59 | 0.88 |
| 568 | Santa Inés de Zaragoza | | 1.09 | 0.89 | 1.00 |
| 569 | Santa Lucía Monteverde | 1.0 | 1.10 | 0.89 | 1.14 |
| 570 | Zimatlán de Álvarez | 0.7 | 1.20 | 0.68 | 1.33 |

| | | | | | |
|--|----------|--|------|--|------|
| | Promedio | | 1.00 | | 1.20 |
|--|----------|--|------|--|------|

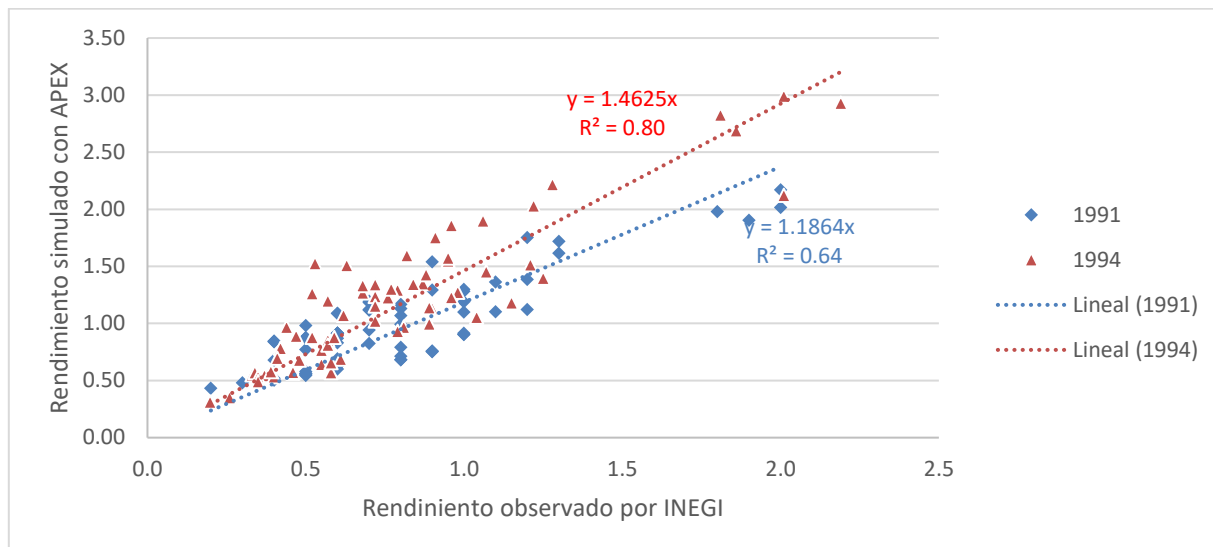


Figura 15. Rendimientos medios municipales de grano de maíz reportado y simulado APEX.

Los resultados de la Figura 15 muestran la presencia de dos tipos de maíces uno de ciclo largo para las partes bajas y más húmedas de la cuenca y otro de ciclo más corto para las partes más altas y más secas de la Mixteca. Esto implica que los parámetros fisiotécnicos de ambos tipos de maíces, principalmente criollos, son distintos y requiere de un análisis más detallado para identificar las diferencias genotípicas.

En general se observa que el año de 1994 se obtuvo mayores rendimientos de grano esto asociado a una mejor distribución de la lluvia en la cuenca durante el periodo de crecimiento del cultivo. En general, los datos simulados, respecto a los reportados por INEGI, se encuentran dentro del rango simulado. Al comparar los rendimientos observados y simulados con APEX se alcanzó un coeficiente de determinación de 0.64 para 1991 y de 0.80 para 1994. Las diferencias entre los valores observados y simulados están asociados a diversas incertidumbres en la información como son: 1) el manejo de cultivo; 2) la metodología y representatividad del muestreo realizado por el INEGI; 3) la precisión de los datos de fertilidad de los suelos; 4) la cercanía de las estaciones meteorológicas al centroide de cada subárea. Es importante mencionar, que en presente trabajo se utilizaron para toda la cuenca, por su dominancia, los parámetros y paquetes tecnológicos propios de la agricultura de temporal.

Por otra parte, utilizando, a nivel de cuenca, los parámetros fisiotécnicos, los datos del generador climático y las propiedades físicas de los suelos, para un período de 20 años, con APEX se simuló para laderas un rendimiento medio de 1.02 t/ha (± 0.47 t/ha), mientras que el SIAP (2017) reporta, para un período de seis años, 0.98 t/ha (± 0.27 t/ha) de grano de maíz. Los resultados de APEX, a nivel municipal permitieron conocer, en términos generales, la distribución espacial del rendimiento de grano. En la Figura 16 se muestran los rendimientos promedio de grano, usando APEX con generador climático, para 20 años.

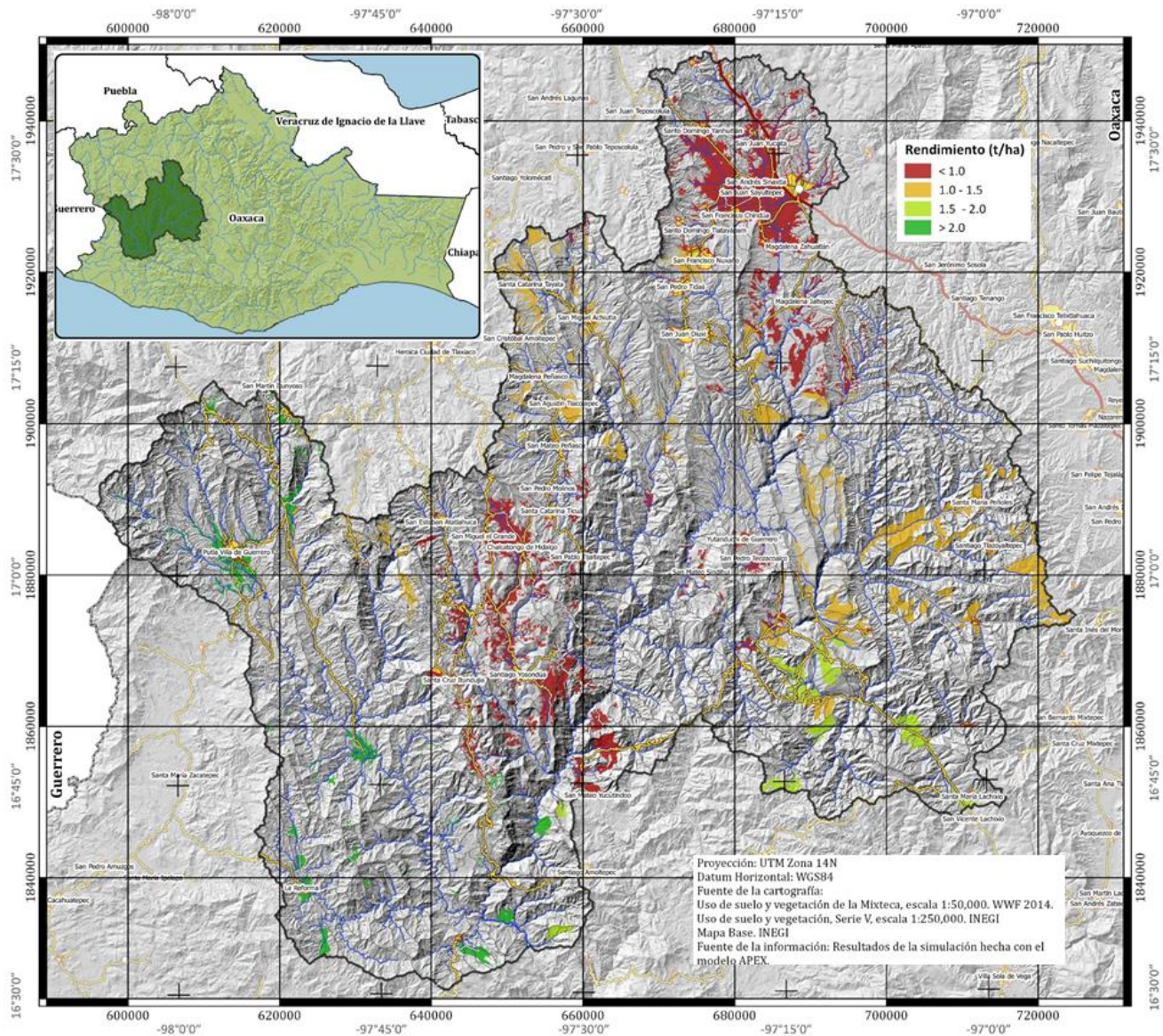


Figura 16. Rendimientos de maíz simulados por APEX para la cuenca alta del río Verde.

En general se observa que dos terceras partes de la superficie agrícola de ladera tiene rendimientos de maíz inferiores a 1.0 t/ha y el 33% de la superficie restante, en promedio, presenta rendimientos de grano entre 1.0 a 2.75 t/ha (Figura 17). Por los bajos rendimientos de grano, en la cuenca se observa que la producción de maíz en ladera se realiza también para asegurar la alimentación del hato ganadero, que es la principalmente fuente de ingresos económicos.

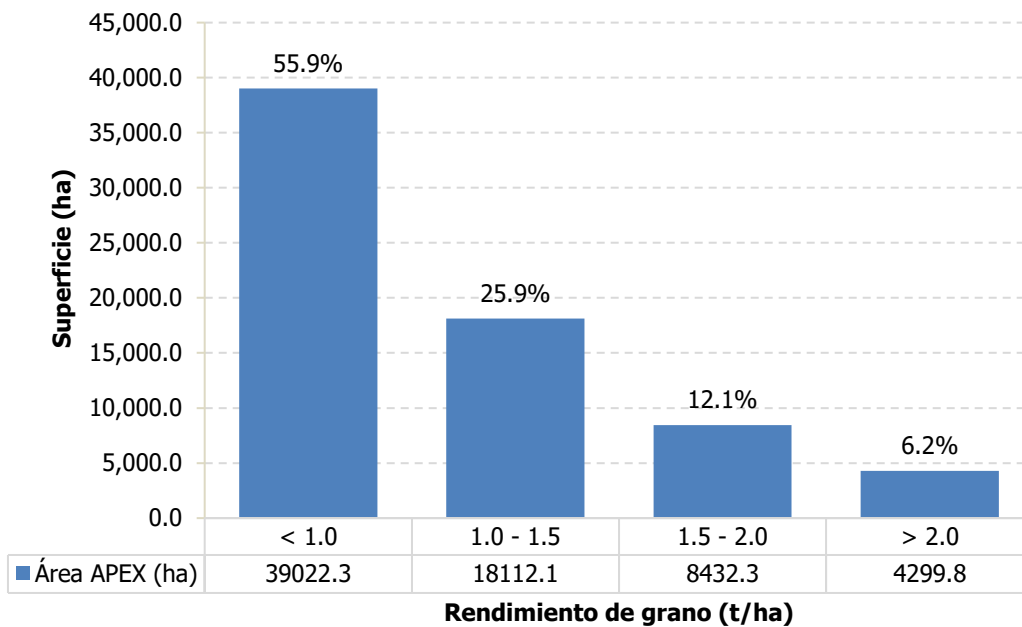


Figura 17. Rendimientos medios de maíz simulados por APEX dentro de la cuenca alta del río Verde.

5.9. Producción de forraje en los agostaderos.

En la Figura 18 se muestra la correlación entre la superficie de agostadero estimada a nivel municipal y las Unidades Animal (UA) generadas a partir de INEGI (2007b). Esta gráfica permitió seleccionar 50 municipios, de un total de 83 con superficie de agostadero, para la comparación de rendimientos con APEX; excluyendo así del análisis el 39% de registros extremos por posibles efectos de importaciones de forraje, imprecisión del censo de INEGI (2007b) y pastoreo en áreas forestales y agrícolas. Para los municipios seleccionados, el análisis de regresión, muestra, con un coeficiente de determinación de $r^2=0.75$, una Capacidad de Carga de $0.2615 \text{ UA ha}^{-1}$, es decir, un Índice de Agostadero de $3.8241 \text{ UA ha}^{-1}$. Este Índice de Agostadero está 7.2% debajo del valor ponderado ($4.12 \text{ ha UA}^{-1} \text{ año}$) reportado por la COTECOCA (1980) para el estado de Oaxaca.

Estos datos sugieren que la carga animal reportada se encuentra en equilibrio dinámico con la capacidad productiva de forraje de la cuenca y que los municipios con UA por arriba de la línea de regresión (Figura 18) es probable que complementen sus

requerimientos de forraje con pastoreo en áreas forestales o presenten problemas de sobrepastoreo. Cabe mencionar que en la región el sobre sobrepastoreo es un problema conocido (Contreras *et al.*, 2003) y este se observa principalmente en las inmediaciones de los núcleos de población.

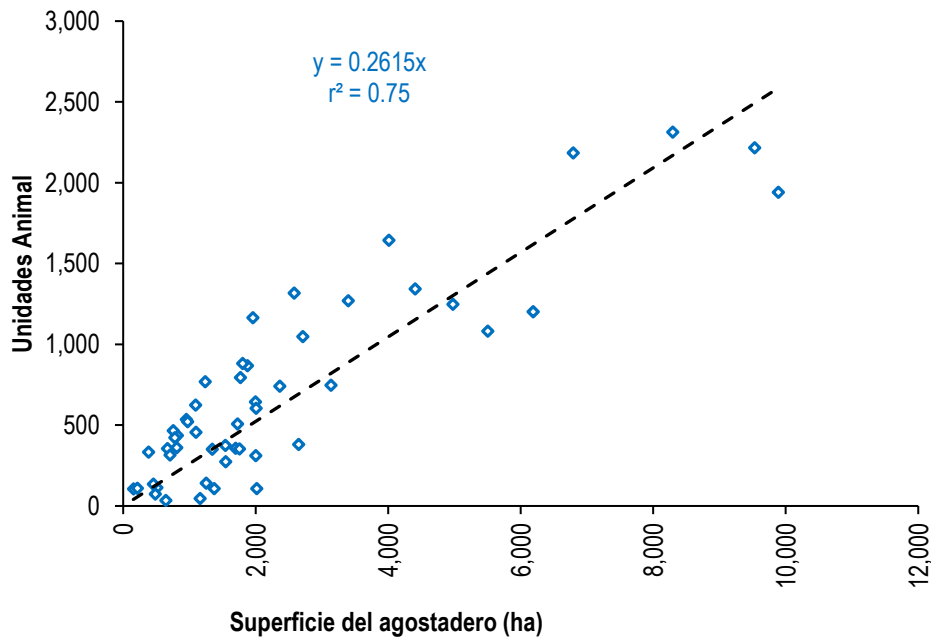


Figura 18. Correlación entre la superficie de agostadero y unidades animal censadas.

Con el propósito de comparar los rendimientos de forraje estimados a través del censo agrícola y ganadero de INEGI (2007) y los valores simulados con APEX, se calculó el rendimiento medio de forraje (t/ha) con base en la superficie de agostadero de cada municipio y convirtiendo el tamaño del hato ganadero censado (Cuadro 11) a Unidades Animal (UA).

Para el cálculo de las UA se tomaron en cuenta los siguientes aspectos 1) no se incluyó el ganado lechero (estabulado) ya que este básicamente no sale a los agostaderos; 2) el forraje en las áreas de pastoreo se aprovecha con una eficiencia de pastoreo del 70%. Este valor considera que el hato ganadero está compuesto principalmente por ganado menor el cual hace un buen aprovechamiento del forraje producido. 3) en los meses más críticos del estiaje los pies de cría (caprinos, ovinos y bovinos) y animales

de trabajo se alimentan básicamente de rastrojo de maíz y del pastoreo en áreas forestales; 4) se consideró un peso de 425 kg por Unidad Animal (UA) y un consumo diario de forraje correspondiente al 3% de peso su vivo; 5) para bovinos (trabajo y engorda), caballar y mular se asignó un factor de 1.0 UA; para ganado asnal de 0.6 UA; y para caprino y ovinos de 0.3 UA (Jaramillo, 1969).

En el Cuadro 18 se presenta, a nivel municipal el rendimiento de forraje necesario para sostener el hato municipal reportado por INEGI (2007) y la producción de forraje simulado con APEX.

Cuadro 18. Producción de forraje, a nivel municipal, estimada según censo ganadero del INEGI (2007) y simulado con APEX.

| Nombre del Municipio | Censo 2007 | Superficie Municipal en cuenca | UA en el agostadero | Superficie Agostadero | Índice de agostadero (Censo) | Producción forraje (Censo) | Producción forraje (APEX) |
|-------------------------------------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| | UA | % | UA | ha | ha/UA | t/ha | t/ha |
| Asunción Nochixtlán | 2856.7 | 36.6 | 1047.0 | 2708.4 | 2.6 | 2.6 | 2.6 |
| Heroica Ciudad de Tlaxiaco | 5794.9 | 1.9 | 111.9 | 508.3 | 4.5 | 1.5 | 1.2 |
| La Reforma | 1132.2 | 70.2 | 794.4 | 1766.6 | 2.2 | 3.0 | 3.3 |
| Magdalena Jaltepec | 2309.0 | 95.9 | 2214.8 | 9530.5 | 4.3 | 1.5 | 2 |
| Magdalena Peñasco | 1223.1 | 88.4 | 1080.7 | 5500.3 | 5.1 | 1.3 | 1.6 |
| Magdalena Yodocono de Porfirio Díaz | 478.2 | 74.2 | 354.6 | 666.9 | 1.9 | 3.5 | 3.6 |
| Magdalena Zahuatlán | 108.0 | 98.9 | 106.8 | 1372.3 | 12.8 | 0.5 | 1 |
| San Agustín Tlacotepec | 643.8 | 100.0 | 643.8 | 1993.3 | 3.1 | 2.1 | 2.9 |
| San Andrés Nuxiño | 446.2 | 85.2 | 380.0 | 2648.5 | 7.0 | 1.0 | 1.2 |
| San Antonino el Alto | 569.3 | 93.8 | 533.7 | 950.5 | 1.8 | 3.7 | 4.1 |
| San Antonio Huitepec | 1343.2 | 100.0 | 1343.2 | 4405.9 | 3.3 | 2.0 | 2.9 |
| San Antonio Sinicahua | 881.0 | 99.9 | 880.2 | 1800.3 | 2.0 | 3.3 | 2.9 |
| San Bartolomé Yucuañe | 107.3 | 100.0 | 107.3 | 2012.7 | 18.8 | 0.4 | 1.7 |
| San Cristóbal Amoltepec | 549.1 | 57.5 | 315.5 | 707.0 | 2.2 | 3.0 | 2.8 |
| San Francisco Cahuacuá | 1813.6 | 90.7 | 1644.0 | 4010.0 | 2.4 | 2.7 | 5.1 |
| San Francisco Chindúa | 465.6 | 100.0 | 465.6 | 755.2 | 1.6 | 4.1 | 4.4 |
| San Francisco Jaltepetongo | 1269.3 | 100.0 | 1269.3 | 3396.2 | 2.7 | 2.5 | 2.2 |
| San Francisco Nuxaño | 455.1 | 100.0 | 455.1 | 1095.7 | 2.4 | 2.8 | 3 |

| Nombre del Municipio | Censo 2007 | Superficie Municipal en cuenca | UA en el agostadero | Superficie Agostadero | Índice de agostadero (Censo) | Producción forraje (Censo) | Producción forraje (APEX) |
|-----------------------------|-------------------|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| | UA | % | UA | ha | ha/UA | t/ha | t/ha |
| San Juan Achiutla | 421.2 | 100.0 | 421.2 | 778.7 | 1.8 | 3.6 | 4.3 |
| San Juan Diuxi | 604.6 | 100.0 | 604.6 | 2005.2 | 3.3 | 2.0 | 2.1 |
| San Juan Teita | 435.6 | 100.0 | 435.6 | 816.5 | 1.9 | 3.6 | 4 |
| San Martín Itunyoso | 432.7 | 24.0 | 103.8 | 153.4 | 1.5 | 4.5 | 5.8 |
| San Mateo Peñasco | 351.8 | 100.0 | 351.8 | 1753.4 | 5.0 | 1.3 | 2.3 |
| San Mateo Sindihui | 1163.5 | 100.0 | 1163.5 | 1958.9 | 1.7 | 4.0 | 4.3 |
| San Miguel Achiutla | 355.7 | 100.0 | 355.7 | 1698.3 | 4.8 | 1.4 | 1.6 |
| San Miguel Peras | 867.3 | 99.9 | 866.5 | 1874.7 | 2.2 | 3.1 | 4.1 |
| San Miguel Tecomatlán | 135.2 | 100.0 | 135.2 | 455.8 | 3.4 | 2.0 | 1.5 |
| San Pablo Tijaltepec | 746.2 | 100.0 | 746.2 | 3137.8 | 4.2 | 1.6 | 2.7 |
| San Pedro Molinos | 273.4 | 100.0 | 273.4 | 1544.1 | 5.6 | 1.2 | 2.9 |
| San Pedro Teozacoalco | 373.1 | 100.0 | 373.1 | 1540.0 | 4.1 | 1.6 | 2 |
| San Pedro Tidaá | 141.3 | 100.0 | 141.3 | 1250.2 | 8.8 | 0.8 | 1.8 |
| San Pedro Topiltepec | 355.2 | 98.6 | 350.4 | 1341.8 | 3.8 | 1.7 | 1.9 |
| Santa Catarina Ticúa | 506.4 | 100.0 | 506.4 | 1723.2 | 3.4 | 2.0 | 2.3 |
| Santa Catarina Yosonotú | 310.6 | 100.0 | 310.6 | 1998.3 | 6.4 | 1.0 | 1.8 |
| Santa Cruz Itundujia | 2311.5 | 100.0 | 2311.5 | 8296.1 | 3.6 | 1.9 | 3.1 |
| Santa Inés de Zaragoza | 1201.7 | 99.9 | 1200.0 | 6189.2 | 5.2 | 1.3 | 2.1 |
| Santa María del Rosario | 350.7 | 30.8 | 107.9 | 212.6 | 2.0 | 3.4 | 3.2 |
| Santa María Nduayaco | 631.7 | 57.1 | 361.0 | 806.6 | 2.2 | 3.0 | 3.1 |
| Santa María Tataltepec | 46.2 | 100.0 | 46.2 | 1162.0 | 25.2 | 0.3 | 1.5 |
| Santa María Yosoyúa | 622.9 | 100.0 | 622.9 | 1093.7 | 1.8 | 3.8 | 4.3 |
| Santa María Yucuhiti | 560.6 | 92.9 | 520.8 | 973.9 | 1.9 | 3.6 | 4.1 |
| Santiago Amoltepec | 1187.3 | 62.3 | 739.9 | 2362.5 | 3.2 | 2.1 | 4.8 |
| Santiago Ixtayutla | 3937.6 | 55.5 | 2183.9 | 6791.1 | 3.1 | 2.1 | 3 |
| Santiago Nejapilla | 50.0 | 68.2 | 34.1 | 643.7 | 18.9 | 0.4 | 0.9 |
| Santiago Nuyoó | 340.2 | 97.6 | 332.2 | 383.8 | 1.2 | 5.8 | 5.2 |
| Santiago Tilantongo | 1939.5 | 100.0 | 1939.5 | 9885.1 | 5.1 | 1.3 | 1.4 |
| Santo Domingo Nuxaá | 1247.1 | 100.0 | 1247.1 | 4974.8 | 4.0 | 1.7 | 2.9 |
| Santo Domingo | 72.8 | 100.0 | 72.8 | 485.1 | 6.7 | 1.0 | 1.5 |
| Tlatayapam | | | | | | | |
| Villa Sola de Vega | 5974.4 | 12.8 | 767.7 | 1237.0 | 1.6 | 4.1 | 4.3 |
| Zimatlán de Álvarez | 2961.4 | 44.5 | 1317.3 | 2580.6 | 2.0 | 3.4 | 4 |
| Promedio | | | | | | 2.31 | 2.86 |

En la Figura 19 se muestra el análisis de regresión, a nivel municipal, entre la producción de forraje entre estimada con el censo (INEGI, 2007b) y la simulada con APEX con datos climáticos de 2007. La pendiente de la línea de regresión, con un coeficiente de determinación de 0.62, muestran (Figura 19) que APEX sobrestimó en 15.15% la producción de forraje. Para la cuenca, con base en el censo se obtuvo un rendimiento promedio estimado de forraje de 2.32 t ha⁻¹ (± 1.23) y con APEX un simulado de 2.85 t ha⁻¹ (±1.14).

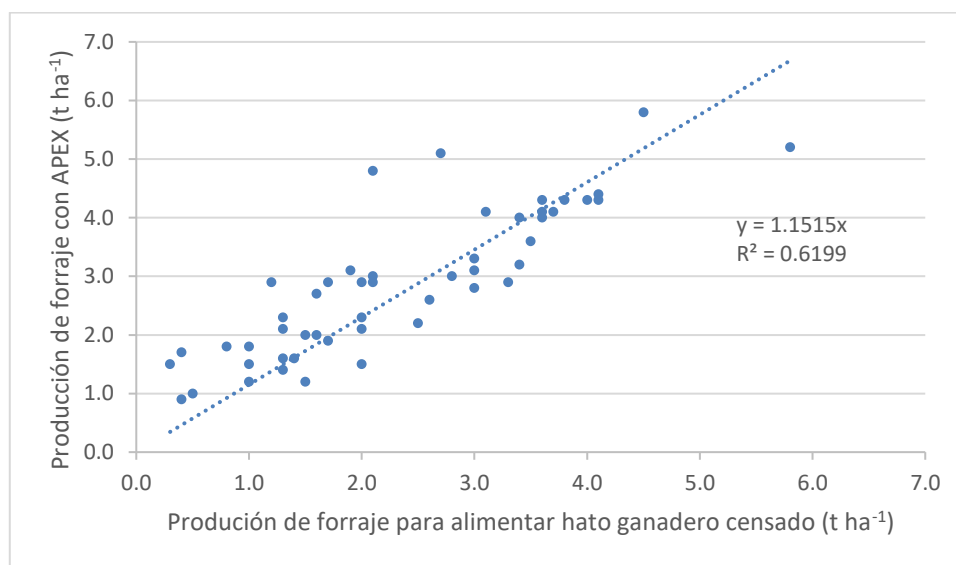


Figura 19. Producción de forraje media municipal entre estimado por INEGI (2007b) y simulado APEX.

A nivel de cuenca, APEX estimó un rendimiento de forraje (MS) medio de 2.85 t/ha, con un aprovechamiento de MS de: 2.0 t/ha (70% de eficiencia). Por otro lado, para un consumo anual de MS/UA de 4.65 toneladas se tendría una capacidad de carga de 0.43 UA/ha/año (MS aprovechada/consumo anual UA). Así, para una capacidad de carga de 0.43 UA/ha/año y una superficie del agostadero en la cuenca de 143,755.72 ha se podrían sostener teóricamente 61,676 UA. Si comparamos estas capacidades de carga simuladas con la equivalente al censo municipal del INEGI (53,355 UA), APEX estaría sobrestimando la producción de forraje o sobrepastoreando un 15.6%. En la región el sobrepastoreo se observa principalmente alrededor de los núcleos de población.

En la Figura 20 se muestra la producción de forraje simulada por APEX para un período de simulación de biomasa de 20 años, según el comportamiento estadístico del clima en la cuenca un factor de eficiencia de pastoreo o índice de cosecha dinámico del 70%. Los rendimientos de forraje por debajo de 2.0 t/ha (sin considerar la eficiencia de pastoreo), que reporta la Figura 21, se localizan básicamente en litosoles y rendzinas, los cuales tienen escasa capacidad del almacenamiento de humedad en el suelo; debido a lo delgado de su perfil (<15 cm) y la alta pedregosidad que los caracteriza.

Los suelos tipo regosol y feozem presentaron los mejores rendimientos. Estos últimos pueden alcanzar, por lo fino de su textura y profundidad del perfil, producto de procesos de arrastre/deposición, un rendimiento de biomasa (sin considerar la eficiencia de pastoreo) superior a 4.0 t/ha.

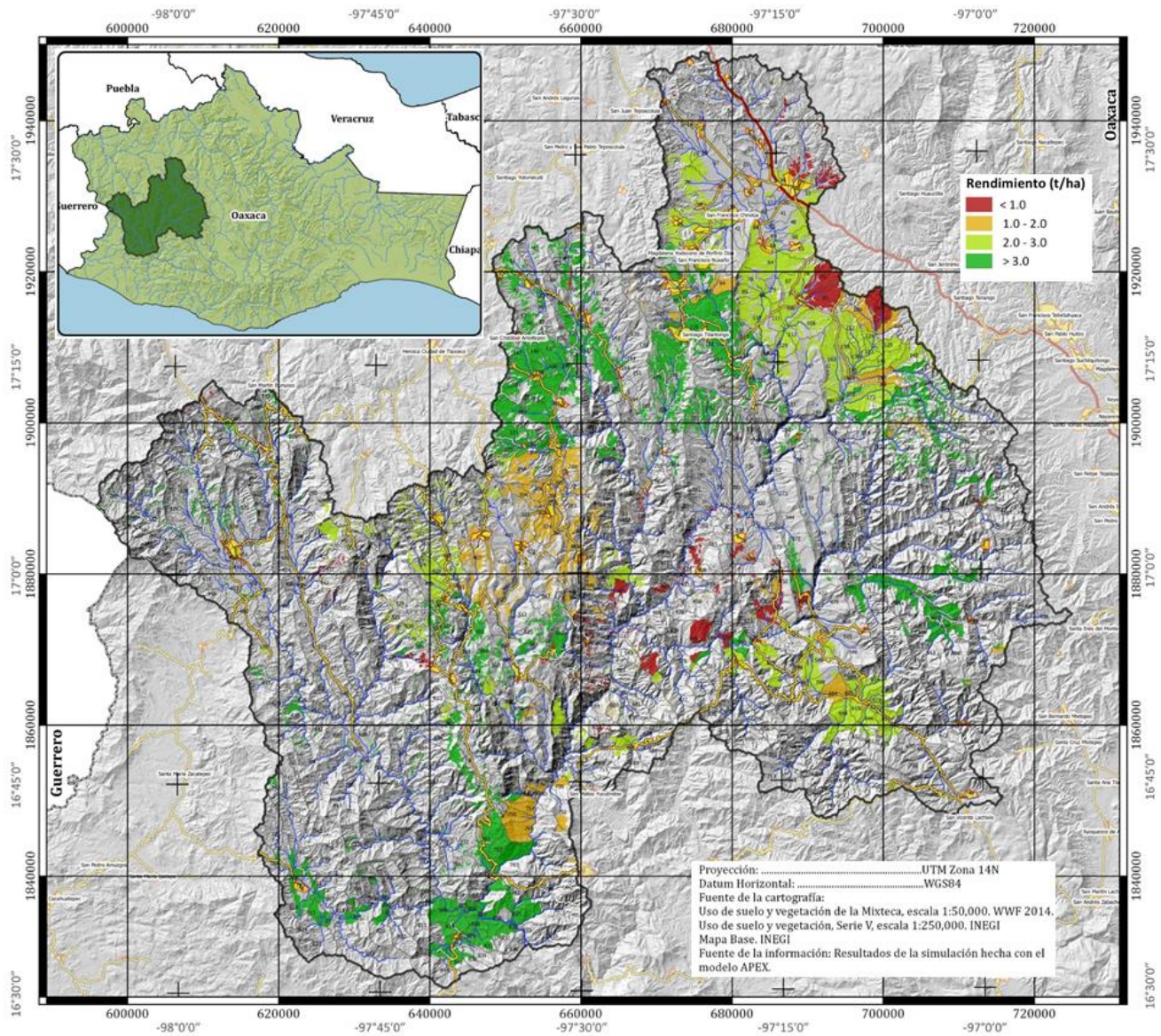


Figura 20. Rendimiento de forraje en agostaderos simulados con APEX, cuenca alta del río Verde.

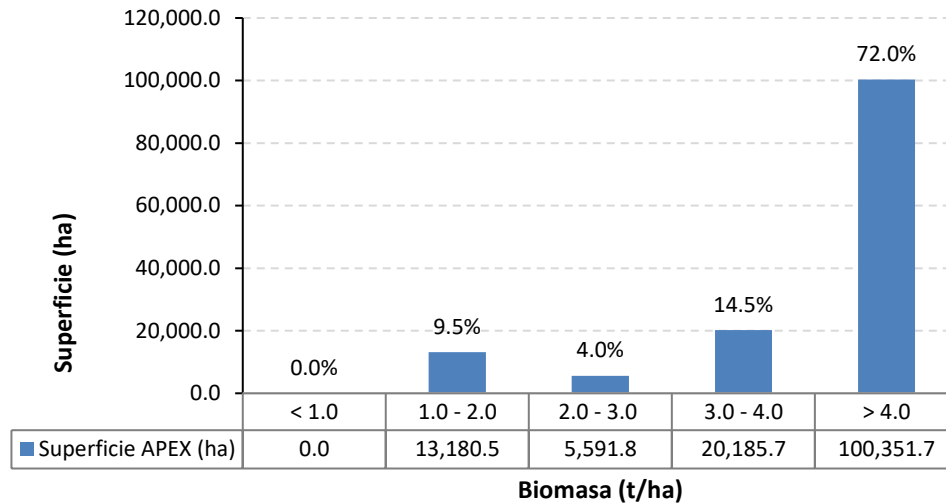


Figura 21. Distribución de la producción de biomasa en agostaderos simulada por APEX, cuenca alta del río Verde.

8. CONCLUSIONES

El rendimiento de grano en las áreas agrícolas de la cuenca APEX reporta un rendimiento medio de maíz en ladera de 1.02 t/ha, muy cercano al 0.98 t/ha que reporta el SIAP (2017), con una variación promedio, entre los distintos municipios, que oscila ± 0.47 t/ha. El 55.9%, según APEX, la superficie agrícola de ladera tiene rendimientos de maíz inferiores a 1.0 t/ha y la superficie restante presenta rendimientos de grano entre 1.0 a 2.75 t/ha.

El manejo del cultivo de maíz, principalmente en terrenos de ladera, y a pesar de las variaciones climáticas dentro de la cuenca, es básicamente homogéneo ya que su cultivo está sujeto al establecimiento de la temporada de lluvias.

A nivel de cuenca se observa un rendimiento promedio de forraje de 2.31 t/ha (± 1.23). Los rendimientos de forraje más bajos (<2.0 t/ha) ocurren en 24,851 ha y se localizan básicamente en suelos con escasa capacidad de almacenamiento de humedad, como son los litosoles y rendzinas; ambos conocidos como leptosoles. Los mejores rendimientos de forraje, superiores a 2.0 t/ha, abarcan el 82% de la superficie de los agostaderos, con pendientes superiores al 5%, y corresponden básicamente a suelos más profundos como los regosoles y el feozem.

En la cuenca, los agostaderos (143,775.72 ha, 18.5% de la superficie total) se caracterizan por su adaptación a suelos delgados con baja retención de humedad, producto de una topografía abrupta, alta pedregosidad y períodos prolongados de sequías interestivales.

La cuenca se encuentra en equilibrio dinámico entre su capacidad productiva y el número de animales que puede sostener.

Las tierras agrícolas de ladera, por lo delgado de sus suelos, presenta siniestros recurrentes debido a variaciones entre eventos de lluvia, conocido en casos críticos como sequía intraestival. Estas tierras de secano, dedicadas principalmente al cultivo de maíz, por su recurrente siniestralidad, forman parte de una estrategia del productor rural para el abastecimiento de rastrojos para alimentar pies de cría y animales de trabajo durante el estiaje.

El modelo APEX simuló satisfactoriamente la producción anual de biomasa para las áreas agrícolas y de pastoreo de la cuenca alta del río Verde. Estos resultados deben considerarse una aproximación a la realidad, confrontada con datos de rendimientos de biomasa y censos agropecuarios. Los resultados, así obtenidos, permiten entender el rendimiento de biomasa en función de las variables climáticas de suelo y manejo. De esta forma, los resultados obtenidos ayudan a priorizar áreas de manejo a nivel de comunidad o subcuenca.

9. RECOMENDACIONES

Ante el problema de degradación de suelo que sufre la cuenca, por el cultivo de maíz en ladera, resulta conveniente analizar alternativas tecnológicas para el uso sustentable del suelo garanticen la autosuficiencia alimentaria o, el mejor de los casos, la mejora de la productividad. Algunas de ellas pueden ser:

1. Manejo de las densidades de población, especialmente el arreglo topológico, tratando de mantener una distribución más uniforme de las plantas sobre el terreno; sobre todo especies de interés forrajero.
2. Manejo de sistemas de labranza de conservación que permitan mejorar la calidad del suelo, especialmente en lo relacionado con la retención de humedad y protección contra los factores erosivos.

En general se observa que la profundidad del suelo y su pedregosidad son factores críticos en la producción de materia seca (forrajes, rastrojos y maíz.) de la región; ya que son aspectos que determinan la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo. De este modo, los suelos pedregosos y/o escasa profundidad (<50 cm) afectan a las plantas por sus escasas reservas de humedad para esperar el siguiente evento de lluvia. Esta situación se hace crítica en los pastizales con sobre pastoreo. Pero en caso de cambios en los regímenes de lluvias, asociados a incrementos en el intervalo de lluvias, seguidos de lluvias intensas, que favorecen el escurrimiento superficial, afectan de manera importante la producción de grano y forraje; de ahí la importancia de establecer acciones de manejo que favorezcan la captación de agua en el suelo y reduzcan su pérdida.

Al ganado menor se le culpa de ser el principal causante de la degradación de los agostaderos de la Mixteca; sin embargo, esto obedece más al sistema de manejo practicado y la falta de una cultura orientada a la mejora del agostadero, la estabulación del ganado y la producción de forraje para ensilado.

10. BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

- Aguirre R., N. 1967. Metodología para determinar tipos vegetativos, sitios y productividad de sitios. Comisión Técnico Consultiva para la Determinación Regional de los Coeficientes de Agostadero (COTECOCA). México D.F.
- Arnold, J.G., Williams, J.R., Evapotranspiration in a Basin Scale Hydrologic. 1985. ASAE Publication pp. 405-413

- Arnold, J.G., Williams, J.R., Nicks, A.D., and Sammons, N.B. 1989. SWRRB, A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management, Texas A & M Press.
- ASAE (*American Society of Agricultural Engineers*). 1998. Manure Production and Characteristics. ASAE standard, ASAE Data: ASAE D384.1 St Joseph, Michigan: ASAE.
- Bagnold, R. A. 1977. Bed-load Transport by Natural Rivers. *Water Resources Research*. 13(2):303-312.
- Baier, W., and Robertson, G.W. 1965. Estimation of Latent Evaporation from Simple Weather Observations. *Canadian Journal of Plant Science*. 45:276-284.
- Benavides S., J. de D. 1998. Calibración y Validación del Modelo Hidrológico SWRRB en la Cuenca Forestal el Carrizal, Tapalpa, Jalisco. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de posgraduados. Especialidad Instituto de recursos naturales. Especialidad de ciencias forestales, montecillo, México. 261 pp.
- Benson, V.W., Rice, O.W., Dyke, P.T., Williams, J.R., and Jones, C.A. 1989. Conservation Impacts on Crop Productivity for the Life of a Soil. *J. Soil Water Cons.* 44(6):600-4.
- Bingner, R.L., 1996. Runoff simulated from Goodwin Creek Watershed using SWAT. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 39 (1):85–90.
- Bosch, A., Sánchez, G., Abbaszadegan, M., Carducci, A., Guix, S., Le Guyader, F.S., Netshikweta, R., Pimtó R.M., van der Poel, W.H.M., Rutjes, S. 2011. Analytical Methods for Virus Detection in Water and Food. *Food Anal. Methods*. 4:4-12.
- Buringh, P. 1989. Availability of Agriculture Land for Crop and Livestock Production. In D. Pimentel, & C. W. Hall (Eds.), *Food and Natural Resources*. San Diego: Academic Press.
- Cavero J., Barros R., Sellam F., Topcu S., Isidoro D., Hartani T., Lounis A., Ibrikci H., Cetin M., Williams J.R., Aragüés R. 2012. APEX Simulation of Best Irrigation and N Management Strategies for Off-Site N Pollution Control in Three Mediterranean Irrigated Watersheds. *Agricultural Water Management*. 103: 88-99.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad). 2010. Catálogo de metadatos geográficos. Grados de marginación municipal, 2010. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadatos/gis/marmun10gw.xml?_xsl=/db/metadatos/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no
- Contreras-Hinojosa, José Rafael; Volke-Haller, Víctor; Oropeza-Mota, José L.; Rodríguez-Franco, Carlos; Martínez-Saldaña, Tomás; Martínez-Garza, Ángel. 2003.

Estado actual y causas de la degradación de los agostaderos en el municipio de Yanhuitlán, Oaxaca. *Terra Latinoamericana*, vol. 21 (3): 427-435.

- COTECOCA (Comisión Técnico Consultiva para la determinación de los Coeficientes de Agostadero). 1980. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Oaxaca, Oax., México. Tomo I y II.
- COTECOCA (Comisión Técnico Consultiva para la determinación de los Coeficientes de Agostadero). 2002. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Oaxaca, Oax., México. Tomo I y II.
- Cruz C., E. 1988. Áreas de exclusión: una alternativa en la recuperación del suelo y vegetación en la Mixteca Oaxaqueña. Tesis profesional. Departamento de Fitotecnia, UACH. Chapingo, México. 93 p.
- De Groot, R., Wilson, M. y Boumans, R. 2002. A Typology for the Classification, Descriptions and Valuation of Ecosystem Functions, Goods and Services. *Ecological Economics*. 41: 393-408.
- Eliot, W.J., Liebenow, A. M., Laflen, J. M. and Kohl, K.D. 1989. A Compendium of Soil Erodibility Data from WEPP Cropland Soil Field Erodibility Experiments 1987 and 1988 Report No. 3. Ohio State University and USDA Agricultural Research Service. Available from USDA-ARS. National Soil Erosion Research. Laboratory, West Lafayette, Indiana.
- Eterovic, R. J. M. 2008. Aplicación de Modelos Hidrológicos con Fines de Prevención de Desastres Naturales en Cuencas de Venezuela. Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.
- Farrand, D.T., Udawatta, R.P., Garrett, H.E. 2002. Predicting Environmental Benefits of Agroforestry Practices in Northern Missouri Using APEX. *Agronomy Abstracts*. In: Annual Meetings Indianapolis, Indiana. American Society of agronomy, Madison, Wisconsin, 10–14, Nov 2002.
- Feng, O., Chaubey, I., Gu, H Y., Cibir, R., Engel, B., Volenec, J., Wang X. 2015. Hydrologic and Water Quality Impacts and Biomass Production Potential on Marginal Land. *Environmental Modelling & Software*. 72: 230-238.
- Francesconi W., Smith D.R., Flanagan D. C., Huang C., Wang X. 2015. Modeling Conservation Practices in APEX: From the Field to the Watershed. *Journal of Great Lakes Research*. 41: 760-769.
- Frere, M. H., Ross, J.D. and Lane, L. J. 1980. The Nutrient Sub Model. In *CREAMS: A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*; Knisel, W.G., Ed.; USDA-SEA-Conservation: Washington, DC, 1980; Res. Rep. No. 26, Chapter 4. 1: 65-86.

- Gaia, N. An Atlas of Planet Management. 1993. Anchor and Dumbleday. Garden City, New Yoyk.
- García, E. 1981. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Koeppen para Adaptarlo a las Condiciones de la República Mexicana. Offset Larios. México. 246 p.
- Gassman, P.W.; Williams, J.R.; Benson, V.W.; Izaurrealde, R.C.; Hauck, L.M.; Jones, C.A.; Atwood, J.D.; Kiniry, J.R.; and Flowers, J.D. 2005. Historical Development and Applications of the EPIC and APEX Models. Center for Agricultural and Rural Development Iowa State University. Working Paper 05-WP 397
- Gassman, P.W.; Williams J.R.; Wang, X.; Saleh, A.; Osei, E.; Hauck, L.M.; Izaurrealde, R.C.; Flowers, J.D. 2010. The Agricultural Policy/Environmental Extender (APEX) Model: An Emerging Tool for Landscape and Watershed Environmental Analyses. Transactions of the ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers, ISSN 2151-0032.
- Golmohammadi G., Prasher S., Madani A., Rudra R. 2014. Evaluating Three Hydrological Distributed Watershed Models: MIKE-SHE, APEX, SWAT. Journal of Hydrology 1(1): 20-39. ISSN 2306-5338 <http://www.mdpi.com/2306-5338/1/1/20/htm>
- Hargreaves, G.H., and Samani, Z.A. 1985. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. Applied Engineering in Agriculture. 1:96-99
- Harman WL, Wang E, Williams JR. 2004. Reducing Atrazine Losses: Water Quality Implications of Alternative Runoff Control Practices. J Environ Qual 33:7–12
- Hartkamp A.D., White, J. W., and Hoogenboom, G. 1999. Interfacing Geographic Information Systems with agronomic modeling: a review. Agronomy Journal. 91: 761-772.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua). 2016. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). Publicado en 1999. Disponibles en: ftp://ftp.conagua.gob.mx/Bandas/Bases_Datos_Bandas/21003.mdb. (Consulta: junio, 2016).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1994. VII Censo agrícola - ganadero. Cobertura municipal, resultados definitivos Estado de Oaxaca. Tomo I-VII. Aguascalientes, México. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/buscador/default.html?q=censo+agricola+ganadero+oaxaca>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática), 1998. Información básica del sector agropecuario. Cobertura temporal 1991. Estado de Oaxaca. Tomo 1-2. Aguascalientes, México. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825118617>

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática). 2006. Conjunto de datos vectoriales edafológicos escala 1:250 000 serie II (continuo nacional). Aguascalientes, México: INEGI. Recuperado de: http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reccat/edafologia/vectorial_serieii.aspx. (Consultado septiembre 19, 2016).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2007. Censo Agrícola, Ganadero y Forestal. México. www.inegi.org.mx.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2014. Conjunto de datos vectoriales climáticos. Escala 1:1 000 000. Aguascalientes, Aguascalientes, México. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reccat/clima/infoescala.aspx>. (Consulta: Junio, 2014).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2015. Continúo de Elevaciones Mexicano 3.0. Aguascalientes, Aguascalientes, México. <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/descarga.aspx>. (Consulta: mayo 25, 2015).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2016. Conjunto de Datos de Perfiles de Suelos Escala 1: 250 000 Serie II (Continuo Nacional). Aguascalientes, Aguascalientes, México. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reccat/edafologia/vectorial_serieii.aspx (Consulta: enero, 2017)
- INIFAP-CIMMYT. 1993. El potencial de la labranza de conservación en la Mixteca, Oaxaqueña. Reporte técnico. Oaxaca, México.
- IUSS (*International Union of Soil Sciences*). 2007. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Grupo de Trabajo WRB, Primera actualización. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103. FAO, Roma.
- Jaramillo V., V. 1969. Coeficientes de agostadero en México. Unidad de Enseñanza e Investigación de Fitotecnia. Chapingo, México.
- Jones, J. W. 1993. Decision Support Systems for Agricultural Development. In: Penning de Vries, F. W. T. (ed.) *Systems Approaches for Agricultural Development* Kluwer Academic Publishers, Netherlands. P. 459-471

- Junes, D.A. 1985. Modelo de Simulación para la Predicción de Escurrimientos Superficiales. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados, Chapingo, México.
- Kannan, R.S.; Santhi, C.; Williams, J.R.; and Arnold, J.G. 2007. Development of a Continuous Soil Moisture Accounting Procedure for Curve Number Methodology and its Behavior with Different Evapotranspiration Methods. Hydrological Processes. Published online in Wiley InterScience.
- Kiniry, J. R., Williams, J. R., Gassman, P. W., and Debaeke, P. 1992. A General, Process-Oriented Model for Two Competing Plant Species. Trans. ASAE 35(3): 801-810.
- Knisel, W. G. 1980. CREAMS: A Field-Scale Model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems. Conservation Research Report No. 26. Washington, D.C.: USDA National Resources Conservation Service.
- Kumar S, Anderson SH, Bricknell LG, Udawatta RP, Gantzer CJ. 2008. Soil Hydraulic Properties Influenced by Agroforestry and Grass Buffers for Grazed Pasture Systems. J. Soil Water Conserv. 63: 224-232
- Kumar, S; Udawatta, R.P., and Anderson, S.H., 2011. APEX Model Simulation of Runoff and Sediment Losses for Grazed Pasture Watersheds with Agroforestry Buffers. Agroforestry Systems. September 2011. 83(1): 51-62.
- Lal R. and Stewart B. A. 1990. Soil Degradation. Springer-Verlag. New York.
- Lane, L.J., and Nearing, M.A. 1989. Water Erosion Prediction Project Landscape Profile Model Documentation. NSERI. Rep. 2. National. Soil Erosion Res. Lab., USDA-ARS, Purdue University., West Lafayette, Indiana.
- Lane, L.J., Nearing, M.A., Laflen, J.M., Foster, G.R., Nichols. M.H. 1992. Description of Agriculture Water Erosion Prediction Project (WEPP) Model. In: Parsons, AJ, Abrahams AD (eds) Overland flow: Hydraulics and Erosion Mechanics. UCL Press Limited, London, 377-391
- Leonard, R. A., Knisel, W. G., and Still, D. A. 1987. GLEAMS: Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems. ASAE 30(5): 1403-1418.
- López R. E. 2009. Pueblos indígenas de México y agua: Mixtecos de Oaxaca. El pueblo de la lluvia. Atlas de culturas del agua en América Latina y el Caribe. México. 22p.
- Mass, J.M., V. Jaramillo, A. Martínez-Yrizar, F. García-Oliva, A. Pérez-Jiménez y J. Sarukhán. 2002. Aspectos Funcionales del Ecosistema de Selva Baja Caducifolia en Chamela, Jalisco. Historia Natural de Chamela. Instituto de Biología, UNAM. México. pp. 525-542.

- Meyer, C.R., Renschler, C.S., and Vining, R.C. 2008. Implementing Quality Control on a Random Number Stream to Improve a Stochastic Weather Generator. *Hydrol. Process.* 22(8): 1069- 1079.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and Environment. *Symposium of the Society for Experimental Biology.* 19: 205-234.
- Moriasi D.N., Bosch D.D., Bjerneberg D.L., and King K.W. 2014. A Literature Review of Current Parameterization, Calibration, and Validation Approaches of APEX to Support NTT. Report Submitted to USDA Office of Environmental Markets.
- National Centers for Environmental Prediction (2016). Global Weather Data for SWAT. Climate Forecast System Reanalysis. NCEP. Recuperado de: <https://globalweather.tamu.edu/>
- Narváez C., G. 1991. Las condiciones naturales para la producción agrícola en las Mixtecas Oaxaqueñas. *Revista Geografía Agrícola.* 15-16: 33-40.
- Nicks, A.D. 1974. Stochastic Generation of the Occurrence, Pattern, and Location of Maximum Amount of Daily Rainfall. pp. 154-171. *Proc. Symposium Statistical Hydrology, August-September. 1971, Tucson, AZ. U.S. Department of Agriculture, Miscellaneous. Publication. No. 1275.*
- Nicks, A. D., Lane, L. J., and Gander, G. A. 1995. Chapter 2: Weather Generator. In *USDA Water Erosion Prediction Project Hillslope and Watershed Model Documentation.* D. C. Flanagan and M. A. Nearing, eds. NSERL Report No. 10. West Lafayette, Ind.: USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory.
- Onstad, C.A. and Foster, G.R. 1975. Erosion Modeling on a Watershed. *Trans. ASAE* 18(2):288- 292.
- Penman, H.L. 1948. Natural Evaporation from Open, Bare Soil and Grass. *Royal Society, London Ser. A193:*120-145.
- Pimentel, D. and Wilson, C. 1997. Economic and Environmental Benefits of Biodiversity. *Bioscience.* 47(11): 747-758.
- Potter, K.N., Williams, J.R., Larney, F.J., and Bullock, M.S. 1998. Evaluation of EPIC's Wind Erosion Submodel Using Data from Southern Alberta. *Canadian Journal Soil Science.* 78: 485-492.
- Priestley, C.H.B., and Taylor, R.J. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review.* 100:81-92.
- PRODRIMO. 1989. Programa de Desarrollo Rural Integral de las Mixtecas Oaxaqueñas Alta y Baja 1984-1988. Gobierno del Estado de Oaxaca. Secretaría de Programación y Presupuesto. México.

- Putnam, J., Williams, J. and Sawyer, D. 1988. Using the Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) to Estimate the Impact of soil Erosion for the 1985 RCA appraisal. *J. Soil Water Conservation*. 43(4): 321-326
- RAN (Registro Agrario Nacional). 2014. Padrón e Historial de Núcleos Agrarios (PHINA). <http://phina.ran.gob.mx/phina2/>
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., and Yoder. D.C. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA, Agriculture Research Service. Agriculture Handbook Number 703.
- Richardson, C.W. 1981. Stochastic Simulation of Daily Precipitation, Temperature, and Solar Radiation. *Water Resources Research*. 17(1):182-190.
- Ritchie, J.T. 1972. A Model for Predicting Evaporation from a Row Crop with Incomplete Cover. *Water Resources Research*. 8:1204–1213.
- Romero P., J., L. García B., D. Martínez C., J.C. Ramírez G. y C. Ramírez M. 1986. Diagnóstico de la producción agrícola de las Mixtecas Oaxaqueñas Alta y Baja. *Revista Chapingo*. 50-51: 51-57.
- Salas, M. R. 2013. Modelado Hidrológico de la cuenca del Río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. Tesis de maestría. Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. 134 p.
- Salas, M. R., Ibáñez, C.L.A., Arteaga, R.R., Martínez, M.R.M., y Fernández, R.D.S. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del Río Mixteco en el Estado de Oaxaca, México. *México. Agrociencia*: 48(1), 1-15.
- Saleh A. and Gallego O. 2007. Application of SWAT and APEX Models Using the SWAPP (SWAT-APEX) program for the Upper North Bosque River watershed in Texas. *Transactions of the ASABE* 50: 1177-1187.
- Saleh, A.; Williams J.R.; Wood, J.C.; Hauck, L.M.; Blackburn W.H. 2004. Application of Apex for Forestry. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers*. 47(3): 751–765.
- Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Menes, M., Rubio-Granados, E., & Ríos-Berber, J. D. 2017. Modelo hidrológico de la Cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(5): 141-156.
- SEIDRUS (Sistema Estatal de Información para el Desarrollo Rural Sustentable). 2009. Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2008. Servicio de Información

Agroalimentaria y Pesquera de Oaxaca. Disponible en: http://www.oedrusportal.gob.mx/oedrus_oax/, consultada el 15 de octubre de 2013.

- Sharpley, A. N., and Williams, J. R. 1990. EPIC: Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model Documentation. Tech. Bulletin No. 1768. Washington, D.C.: USDA.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). 2017. Cierre de la producción agrícola por cultivo. Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación. México. <http://www.siap.gob.mx/>
- Silva, O. 1995. Ecuaciones Para Evaluar, Estimar y Predecir Erosión Hídrica. Revista Venesuelos, 31: 7-13.
- Silva O. 1995 Validación del Modelo de Simulación SWRRB es Una Cuenca Pequeña, de Altas Pendientes y Lluvia Estacional. Caso MACapo, Edo. Cojettes. Tesis M.sc, en Ciencia del Suelo. Facultad. Agronomía UCV. 106 pp.
- Singh, V.P. and Frevert, D.K. 2005, Watershed Models Boca Raton, Florida, CRC Press (Taylor & Francis) 245-272.
- SMN (Servicio Meteorológico Nacional). 2016. Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). México. <http://clicom-mex.cicese.mx/>
- Steglich, E. M., and Williams, J. R. 2008. Agricultural Policy/Environmental Extender Model: User's Manual. Version 0604 DOS and WINAPEX Interface. BREC Report 2008-16. Temple, Tex.: Texas AgriLife Blackland Research and Extension Center.
- Suárez De Castro, F. 1980. Conservación de Suelos. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Tripathi, C.N. and Gosain A.K. 2013. Comparative Study on the Performance of SWAT and APEX Model for Simulating Water Yield in Dudhi Micro Watershed in Madhya Pradesh, India. International Journal of Recent Scientific Research. 4(4): 371-375.
- Tuppad, P.; Santhi, C.; Wang, X., Williams, J.R.; Srinivasan, R. and Gowda, P.H. 2010. Simulation of Conservation Practices Using the APEX Model. Applied Engineering in Agriculture. 26(5): 779-794.
- USDA-ARS. 2005. Agricultural Land Management Alternative with Numerical Assessment Criteria (ALMANAC). United States Department of Agriculture-Agricultural Research Service. Temple, Texas.
- SCS (U.S. Soil Conservation Service). 1972. National Engineering Handbook: Section 4, Hydrology. Washington, D. C. 548 p.

- Velázquez, A.; Mas, J. F.; Díaz Gallegos, J. R.; Mayorga Saucedo, R.; Alcántara, P. C.; Castro, R.; Fernández, T.; Bocco, G.; Ezcurra, E.; Palacio, J. L. 2002. Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta Ecológica*, 62: 21-37.
- Villar, B., 1996. Erosionabilidad de Suelos y su Impacto en la Productividad del Maíz en el Trópico Mexicano. Tesis Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México, 215 pp.
- Wang (a), X., Mosley, C. T., Frankenberger, J. R., and Kladviko, E. J. 2006. Subsurface Drain Flow and Crop Yield Predictions for Different Drain Spacings Using DRAINMOD. *Agric. Water Management*. 79(2): 113-136.
- Wang (b), E.; Xin, C.; Williams, J.R. and Xu, C. 2006. Predicting Soil Erosion for Alternative Land Uses. *J. Environ. Qual.* 35:459–467.
- Wang, X.; Saleh, A.; McBroom, M.W.; Williams, J.R.; and Yin, L. 2007. Test of APEX for Nine Forested Watersheds in East Texas. *Journal of Environmental Quality* 36:983–995.
- Wang, X.; Gassman, P.W.; Williams, J.R.; Potter, S.; Kemanian, A.R. 2008. Modeling the Impacts of Soil Management Practices on Runoff, Sediment Yield, Maize Productivity, and Soil Organic Carbon Using APEX. *Soil & Tillage Research* 101: 78–88.
- Wang, X., Hoffman, D. W., Wolfe, J. E., Williams, J. R., and Fox, W. E. 2009. Modeling the Effectiveness of Conservation Practices at Shoal Creek watershed, Texas, Using APEX. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers*. 52(4): 1181-1192.
- Williams, J. R, Jones, and P.T Dyke. 1984. A Modeling Approach to Determining the Relationship between Erosion and Soil Productivity. *Trans ASAE* 27(1): 129-144
- Williams, J.R. 1975. Sediment Yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor. ARS-S-40. Washington, D.C.: USDA, Agricultural Research Service.
- Williams, J.R.; Jones, C.A.; Kiniry, J.R.; and Spanel, D.A. 1989. The EPIC Crop Growth Model. *Trans. ASAE* 32(2): 497-511.
- Williams, J. R. 1990. The Erosion Productivity Impact Calculator (EPIC) Model: A Case History. *Philosophical Transaction Royal Society London B* 329(1255): 421-428.
- Williams, J.R. 1995. The EPIC Model. pp 909-1000 In V. P. Singh, *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado.
- Williams, J. R., Jones, C. A., Gassman, P. W., and Hauck L. M. 1995. Simulation of Animal Waste Management with APEX. In *Innovations and New Horizons in Livestock and Poultry Manure Management*, 22-26. J. McFarland, ed. Austin, Tex. Texas A&M University, Texas Agricultural Extension Service

- Williams, J.R. Arnold, J.G., Srinivasan, R and Ramanarayanan. T.S. 1998. APEX: A New Tool for Predicting the Effects of Climate and CO₂ Change on Erosion and Water Quality In: Boardman, J. and Favis-Mortlock D (eds) Modeling Soil Erosion by Water Springer-Verlag, Berlin, 441-449
- Williams, J.R. 2002. The APEX Manure Management Component. In: Proceedings of the Total Maximum Daily Load (TMDL) Environmental Regulations, March 11-13, Forth Worth, TX, 44-51. A. Saleh, ed. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural Engineers.
- Williams, J. R., and Izaurralde, R. C. 2006. The Apex Model. Watershed Models. Chapter 18. Pp 437- 472.
- Williams, J.R., Harman, W.L., Magre, M., Kizil, U., Lindley, J.A., Padmanabhan, G. and Wang, E. 2006. Apex Feedlot Water Quality Simulation. Transactions of the ASAE 49(1): 61–73.
- Williams, J. R., Izaurralde, R. C. and Steglich, E. M. 2008. Agricultural Policy/Environmental eXtender Model: Theoretical Documentation, Version 0604. BREC Report 2008-17. Temple, Tex.: Texas AgriLife Blackland Research and Extension Center. Available at: <http://epicapex.brc.tamus.edu/media/53152/the%20apex%20theoretical%20documentation.pdf>. Accessed 26 April 2012
- Williams J.R., Izaurralde R.C. & Steglich E.M. 2012. Agricultural Policy/ Environmental EXTender Model: Theoretical Documentation version 0806. Blackland Research and Extension Center Temple, Texas
- Wischmeier, W.H., and Smith, D.D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses, a Guide to Conservation Planning. USDA, Agriculture. Handbook No. 537.
- WWF (*World Wildlife Fund*). 2014. Tasa de transformación de la vegetación en el área de intervención del proyecto Mixteca. Oficina de la WWF en Oaxaca. Sitio web: <http://www.proyectomixteca.org.mx/servidor-cartografico/> (consultado abril de 2017).
- Yeomans G. L. M. 2004. Modelos Hidrológicos en la Gestión Integrada de Cuencas. Civiltec No. 12. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, Nuevo León.

11. ANEXOS

Anexo 1. Generadores climáticos

Cuadro 19. Generadores climáticos para las estaciones climatológicas del SMN en la cuenca alta del río Verde, Oax.

| WID | LAT | LOX | ELEV | RAIN_YRS | OBMX1 | OBMX2 | OBMX3 | OBMX4 | OBMX5 | OBMX6 | OBMX7 | OBMX8 | OBMX9 |
|-------|----------|-----------|------|----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 20010 | 16.583 | -98.067 | 430 | 11 | 34.284 | 35.295 | 35.369 | 36.475 | 35.266 | 32.184 | 32.167 | 31.629 | 31.897 |
| 20026 | 17.033 | -97.583 | 2250 | 11 | 21.660 | 23.515 | 25.311 | 25.460 | 25.443 | 22.783 | 22.123 | 22.137 | 21.915 |
| 20038 | 16.567 | -97.667 | 510 | 11 | 32.925 | 33.856 | 35.069 | 36.271 | 35.194 | 31.918 | 31.240 | 31.210 | 30.259 |
| 20044 | 17.067 | -96.883 | 1650 | 11 | 25.459 | 26.595 | 29.418 | 30.665 | 30.141 | 27.172 | 26.054 | 26.506 | 25.833 |
| 20077 | 17.567 | -97.667 | 715 | 11 | 33.670 | 34.841 | 35.234 | 36.458 | 35.138 | 32.685 | 32.050 | 32.167 | 31.510 |
| 20094 | 17.1667 | -97.87305 | 1316 | 38 | 31.180 | 31.890 | 33.510 | 33.970 | 32.860 | 30.000 | 29.590 | 29.550 | 29.300 |
| 20102 | 17.2 | -97.51778 | 2018 | 28 | 23.990 | 24.330 | 25.770 | 26.490 | 27.070 | 25.770 | 25.090 | 25.290 | 25.110 |
| 20103 | 17.57211 | -97.52275 | 2296 | 55 | 22.192 | 23.742 | 24.951 | 26.337 | 25.772 | 23.919 | 22.561 | 22.857 | 22.218 |
| 20105 | 17.065 | -97.67917 | 2455 | 34 | 21.020 | 21.450 | 22.640 | 23.110 | 22.880 | 21.500 | 20.890 | 20.880 | 20.730 |
| 20108 | 17.74275 | -97.81784 | 1510 | 33 | 26.962 | 28.199 | 30.701 | 32.215 | 31.595 | 29.292 | 28.790 | 28.870 | 27.064 |
| 20110 | 17.633 | -98.083 | 1409 | 11 | 30.122 | 31.454 | 33.880 | 35.102 | 34.259 | 32.056 | 30.702 | 31.292 | 30.289 |
| 20115 | 17.3 | -98.067 | 1820 | 11 | 22.391 | 22.344 | 24.015 | 25.080 | 24.459 | 23.144 | 22.349 | 23.068 | 22.745 |
| 20121 | 17.517 | -97.1 | 2300 | 11 | 22.389 | 23.717 | 25.815 | 29.253 | 27.900 | 25.119 | 23.251 | 23.620 | 23.818 |
| 20125 | 17.5552 | -97.81423 | 1911 | 32 | 28.835 | 30.275 | 32.508 | 33.755 | 33.624 | 30.400 | 29.444 | 29.774 | 29.311 |
| 20126 | 16.533 | -97.483 | 970 | 11 | 29.494 | 29.916 | 30.825 | 31.730 | 30.316 | 27.730 | 27.993 | 28.533 | 27.897 |
| 20130 | 17.01667 | -97.79972 | 1876 | 40 | 25.130 | 25.370 | 26.460 | 27.210 | 26.190 | 24.310 | 24.680 | 24.550 | 24.090 |
| 20137 | 17.72211 | -97.53684 | 2079 | 34 | 21.749 | 23.410 | 25.588 | 26.544 | 25.977 | 23.690 | 22.603 | 22.518 | 22.350 |
| 20141 | 17.49756 | -98.14368 | 1684 | 59 | 28.164 | 29.426 | 32.100 | 33.826 | 33.274 | 30.837 | 28.865 | 28.420 | 28.149 |
| 20142 | 17.503 | -98.14 | 1684 | 19 | 27.380 | 28.610 | 30.817 | 31.340 | 31.237 | 28.851 | 27.894 | 27.888 | 27.286 |
| 20143 | 17.667 | -97.417 | 2120 | 11 | 20.941 | 22.402 | 25.795 | 26.786 | 26.431 | 22.886 | 21.518 | 21.906 | 21.671 |
| 20144 | 17.733 | -97.35 | 1875 | 11 | 20.909 | 22.389 | 25.793 | 26.768 | 26.425 | 22.868 | 21.490 | 21.790 | 21.665 |
| 20146 | 17.65 | -98.183 | 1782 | 11 | 23.170 | 24.453 | 27.333 | 28.892 | 27.796 | 24.459 | 23.177 | 23.356 | 22.911 |
| 20153 | 16.6 | -97.217 | 1300 | 11 | 26.051 | 28.147 | 29.913 | 30.144 | 29.361 | 27.279 | 27.445 | 27.293 | 26.483 |
| 20159 | 17.50131 | -97.48254 | 2183 | 32 | 23.844 | 24.744 | 25.963 | 26.813 | 26.219 | 23.933 | 23.161 | 23.620 | 23.183 |
| 20163 | 17.33328 | -97.8 | 2023 | 42 | 28.146 | 29.661 | 31.751 | 33.222 | 32.737 | 29.596 | 28.438 | 28.555 | 28.491 |
| 20178 | 17.03306 | -97.58305 | 2428 | 40 | 20.720 | 21.630 | 22.870 | 23.680 | 23.180 | 21.010 | 20.300 | 20.700 | 20.460 |
| 20259 | 16.75 | -97.783 | 900 | 11 | 32.529 | 33.694 | 36.113 | 37.662 | 37.234 | 35.372 | 34.445 | 33.788 | 33.421 |

Continuación del Cuadro 19

| OBMX10 | OBMX11 | OBMX12 | OBMN1 | OBMN2 | OBMN3 | OBMN4 | OBMN5 | OBMN6 | OBMN7 | OBMN8 | OBMN9 | OBMN10 | OBMN11 | OBMN12 | STDMX1 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 32.997 | 34.058 | 34.756 | 17.918 | 18.151 | 17.924 | 18.926 | 19.560 | 19.536 | 19.130 | 18.375 | 18.733 | 18.570 | 19.080 | 18.531 | 2.457 |
| 21.966 | 21.767 | 21.387 | 1.352 | 3.683 | 5.026 | 5.900 | 8.860 | 10.408 | 10.128 | 9.733 | 10.076 | 7.989 | 4.560 | 2.370 | 2.319 |
| 31.846 | 32.588 | 32.712 | 15.331 | 15.892 | 17.177 | 19.250 | 20.426 | 20.780 | 19.991 | 20.003 | 20.256 | 19.922 | 17.682 | 16.185 | 1.592 |
| 26.236 | 26.170 | 25.469 | 8.672 | 9.587 | 11.826 | 13.109 | 14.701 | 14.739 | 13.867 | 13.760 | 13.994 | 12.948 | 10.720 | 9.840 | 2.895 |
| 32.478 | 33.585 | 33.366 | 16.144 | 16.884 | 16.861 | 18.674 | 20.278 | 20.739 | 20.180 | 20.143 | 20.388 | 19.705 | 18.754 | 17.004 | 1.864 |
| 30.200 | 30.770 | 30.780 | 14.060 | 14.620 | 15.340 | 16.570 | 18.340 | 19.420 | 18.800 | 18.850 | 19.210 | 18.570 | 16.810 | 14.950 | 2.360 |
| 25.600 | 25.320 | 24.710 | 9.890 | 10.140 | 10.990 | 12.240 | 12.840 | 13.460 | 12.870 | 12.670 | 13.310 | 12.890 | 11.510 | 10.340 | 3.710 |
| 22.516 | 21.794 | 21.768 | 4.082 | 4.805 | 6.501 | 8.555 | 9.668 | 10.746 | 10.190 | 10.096 | 10.333 | 8.845 | 6.136 | 4.364 | 3.700 |
| 21.470 | 21.160 | 20.930 | 8.030 | 8.290 | 9.210 | 9.960 | 10.570 | 10.520 | 10.410 | 10.360 | 10.140 | 9.690 | 8.940 | 8.450 | 2.030 |
| 28.267 | 28.081 | 27.158 | 8.441 | 9.905 | 11.297 | 13.574 | 14.871 | 14.813 | 14.486 | 14.388 | 14.285 | 12.544 | 10.350 | 9.028 | 3.628 |
| 30.841 | 30.703 | 30.495 | 10.157 | 11.402 | 12.853 | 14.786 | 16.401 | 16.718 | 15.482 | 15.174 | 15.742 | 14.148 | 11.617 | 10.800 | 2.127 |
| 23.376 | 23.152 | 22.911 | 8.749 | 9.151 | 9.944 | 10.759 | 11.732 | 11.759 | 11.253 | 11.205 | 11.417 | 10.710 | 9.523 | 9.172 | 2.490 |
| 23.125 | 22.394 | 21.623 | 6.246 | 6.873 | 7.770 | 8.262 | 8.798 | 8.313 | 8.422 | 8.239 | 8.132 | 7.323 | 7.002 | 6.508 | 3.208 |
| 29.659 | 29.603 | 28.952 | 11.354 | 12.894 | 15.064 | 16.724 | 17.815 | 17.812 | 16.962 | 16.953 | 16.605 | 16.097 | 13.421 | 12.029 | 2.541 |
| 28.560 | 29.985 | 29.714 | 15.235 | 15.001 | 15.766 | 16.789 | 17.159 | 17.353 | 16.775 | 16.550 | 16.479 | 15.761 | 16.153 | 15.762 | 1.888 |
| 25.010 | 25.480 | 25.410 | 13.750 | 13.500 | 14.410 | 15.240 | 15.840 | 15.990 | 15.770 | 15.770 | 15.720 | 15.310 | 14.750 | 14.310 | 2.420 |
| 22.158 | 21.901 | 21.746 | 5.695 | 6.217 | 7.450 | 8.655 | 9.992 | 10.640 | 10.287 | 10.372 | 10.450 | 8.777 | 7.379 | 6.112 | 2.574 |
| 27.863 | 27.500 | 27.399 | 8.559 | 9.188 | 11.063 | 13.444 | 14.657 | 14.675 | 13.689 | 13.549 | 13.583 | 12.066 | 9.957 | 8.923 | 3.821 |
| 27.564 | 27.000 | 27.046 | 10.698 | 11.135 | 12.635 | 14.173 | 15.034 | 15.193 | 14.600 | 14.170 | 14.720 | 13.810 | 12.021 | 11.185 | 2.754 |
| 21.405 | 21.006 | 20.481 | 5.526 | 6.309 | 8.509 | 9.968 | 11.273 | 11.414 | 11.045 | 10.962 | 11.298 | 9.496 | 7.315 | 6.558 | 3.577 |
| 21.376 | 21.192 | 20.584 | 5.529 | 6.309 | 8.506 | 9.982 | 11.274 | 11.417 | 11.056 | 10.865 | 11.303 | 9.512 | 7.408 | 6.447 | 3.654 |
| 23.164 | 23.000 | 22.723 | 11.543 | 11.564 | 13.449 | 14.461 | 14.752 | 14.456 | 13.808 | 13.906 | 13.868 | 13.195 | 11.911 | 11.902 | 2.033 |
| 27.437 | 27.165 | 26.691 | 10.529 | 11.619 | 12.816 | 13.610 | 14.479 | 14.924 | 14.660 | 14.532 | 14.398 | 13.993 | 12.230 | 11.518 | 3.655 |
| 23.108 | 23.549 | 23.249 | 3.834 | 4.922 | 6.353 | 7.455 | 8.459 | 9.764 | 9.366 | 9.270 | 9.515 | 7.979 | 5.728 | 4.626 | 2.341 |
| 28.645 | 28.629 | 28.187 | 8.054 | 9.901 | 11.555 | 13.493 | 14.356 | 14.803 | 14.616 | 14.230 | 14.232 | 12.836 | 10.123 | 8.850 | 2.516 |
| 21.000 | 20.770 | 20.350 | 1.440 | 2.540 | 4.170 | 6.280 | 8.610 | 10.420 | 9.760 | 9.760 | 9.970 | 7.970 | 4.510 | 2.380 | 2.910 |
| 33.296 | 32.499 | 32.244 | 17.521 | 18.138 | 19.123 | 19.835 | 20.978 | 21.187 | 20.667 | 20.383 | 20.718 | 20.478 | 18.604 | 17.929 | 1.885 |

Continuación del Cuadro 19

| STDMX2 | STDMX3 | STDMX4 | STDMX5 | STDMX6 | STDMX7 | STDMX8 | STDMX9 | STDMX10 | STDMX11 | STDMX12 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| 2.754 | 3.998 | 3.548 | 4.185 | 3.584 | 3.605 | 4.151 | 3.905 | 3.239 | 2.163 | 2.201 |
| 3.950 | 3.804 | 2.304 | 3.365 | 1.894 | 2.036 | 1.779 | 2.105 | 1.879 | 2.033 | 2.177 |
| 1.955 | 1.884 | 1.395 | 2.108 | 2.236 | 1.800 | 1.847 | 1.879 | 1.550 | 1.526 | 1.766 |
| 2.829 | 2.924 | 2.393 | 2.624 | 2.285 | 2.065 | 1.964 | 2.359 | 2.375 | 2.422 | 2.513 |
| 2.144 | 3.921 | 3.400 | 4.269 | 4.033 | 4.012 | 3.908 | 4.126 | 3.829 | 1.788 | 1.957 |
| 2.400 | 2.110 | 2.100 | 2.290 | 2.340 | 1.750 | 1.820 | 1.860 | 1.930 | 2.250 | 2.400 |
| 4.050 | 4.320 | 4.430 | 3.910 | 3.400 | 3.720 | 3.260 | 3.540 | 3.390 | 3.590 | 3.830 |
| 3.385 | 3.665 | 3.466 | 3.589 | 3.340 | 3.052 | 3.132 | 3.083 | 3.269 | 3.445 | 3.554 |
| 1.940 | 2.050 | 2.130 | 2.070 | 2.320 | 1.790 | 1.940 | 2.000 | 2.230 | 1.730 | 1.690 |
| 4.033 | 3.849 | 2.866 | 3.464 | 4.386 | 4.355 | 4.197 | 3.537 | 4.247 | 4.155 | 3.893 |
| 1.823 | 2.014 | 2.180 | 2.906 | 2.734 | 2.068 | 2.214 | 2.077 | 1.755 | 1.643 | 1.532 |
| 2.089 | 2.169 | 2.453 | 2.293 | 2.070 | 1.995 | 1.925 | 2.524 | 2.301 | 2.446 | 2.664 |
| 4.298 | 3.972 | 4.466 | 4.583 | 4.342 | 3.220 | 3.897 | 4.060 | 4.296 | 2.706 | 3.111 |
| 2.420 | 2.226 | 2.120 | 2.100 | 3.013 | 2.321 | 2.327 | 2.181 | 1.974 | 2.264 | 2.165 |
| 2.150 | 2.046 | 1.546 | 2.446 | 2.464 | 2.276 | 2.256 | 2.452 | 2.513 | 1.757 | 1.955 |
| 1.850 | 1.830 | 1.880 | 2.110 | 2.130 | 1.990 | 1.980 | 2.140 | 1.880 | 1.780 | 1.690 |
| 3.018 | 3.114 | 2.962 | 2.900 | 2.394 | 1.911 | 2.042 | 2.287 | 2.312 | 2.472 | 2.499 |
| 3.387 | 3.515 | 3.705 | 4.052 | 3.991 | 5.407 | 5.162 | 5.326 | 5.201 | 5.064 | 5.720 |
| 2.276 | 2.733 | 3.068 | 2.553 | 2.490 | 2.189 | 2.245 | 2.481 | 2.378 | 2.269 | 2.271 |
| 3.547 | 3.186 | 2.942 | 2.891 | 2.744 | 2.060 | 2.212 | 2.191 | 2.985 | 3.291 | 3.539 |
| 3.569 | 3.270 | 2.987 | 2.912 | 2.729 | 2.007 | 2.165 | 2.174 | 3.020 | 3.243 | 3.669 |
| 2.458 | 2.820 | 2.430 | 2.942 | 2.703 | 1.896 | 1.739 | 1.613 | 1.976 | 2.005 | 1.888 |
| 3.009 | 2.324 | 2.490 | 2.751 | 2.122 | 1.968 | 2.442 | 2.547 | 2.458 | 2.310 | 2.682 |
| 2.576 | 2.429 | 2.752 | 2.822 | 2.483 | 1.999 | 2.115 | 2.085 | 2.236 | 2.630 | 2.186 |

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.522 | 2.155 | 2.153 | 2.267 | 2.635 | 1.741 | 1.754 | 2.079 | 2.135 | 2.618 | 2.423 |
| 3.190 | 3.380 | 3.270 | 3.300 | 2.890 | 2.440 | 2.380 | 2.590 | 2.910 | 2.910 | 2.910 |
| 2.104 | 2.630 | 2.700 | 2.806 | 2.457 | 2.149 | 2.365 | 1.950 | 1.835 | 2.003 | 1.862 |

Continuación del Cuadro 19

| STDMN1 | STDMN2 | STDMN3 | STDMN4 | STDMN5 | STDMN6 | STDMN7 | STDMN8 | STDMN9 | STDMN10 | STDMN11 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| 1.416 | 1.484 | 3.258 | 3.271 | 3.006 | 2.735 | 2.689 | 3.405 | 2.463 | 3.120 | 1.372 |
| 3.373 | 5.000 | 4.837 | 3.307 | 3.535 | 2.625 | 2.426 | 2.745 | 2.619 | 3.183 | 3.209 |
| 1.905 | 2.173 | 1.950 | 1.675 | 1.767 | 0.982 | 0.848 | 0.839 | 0.796 | 1.283 | 2.098 |
| 2.380 | 2.502 | 2.293 | 1.957 | 1.603 | 1.619 | 1.745 | 1.640 | 1.800 | 1.851 | 2.333 |
| 2.302 | 2.022 | 3.677 | 3.982 | 3.700 | 3.412 | 3.191 | 3.356 | 3.201 | 3.973 | 2.291 |
| 2.880 | 2.850 | 2.690 | 2.510 | 2.230 | 1.450 | 1.280 | 1.270 | 1.170 | 1.820 | 2.550 |
| 2.790 | 2.780 | 2.980 | 2.760 | 2.810 | 3.000 | 2.680 | 2.740 | 2.090 | 2.330 | 2.920 |
| 3.494 | 3.376 | 2.992 | 2.820 | 2.422 | 2.005 | 2.217 | 2.337 | 2.298 | 2.889 | 3.464 |
| 1.610 | 1.560 | 2.260 | 1.860 | 1.910 | 1.900 | 1.810 | 1.830 | 1.350 | 1.340 | 1.460 |
| 3.585 | 3.544 | 3.888 | 4.078 | 3.834 | 4.054 | 3.816 | 3.832 | 3.607 | 4.040 | 3.843 |
| 2.503 | 2.111 | 2.186 | 1.754 | 1.892 | 1.692 | 1.528 | 1.799 | 1.444 | 2.297 | 2.768 |
| 1.968 | 1.762 | 1.763 | 1.857 | 1.828 | 1.773 | 1.704 | 1.671 | 1.689 | 1.765 | 1.969 |
| 1.971 | 2.114 | 2.049 | 2.276 | 2.213 | 2.145 | 2.149 | 2.037 | 1.654 | 2.468 | 1.860 |
| 3.038 | 2.924 | 3.012 | 2.628 | 2.187 | 2.673 | 2.137 | 1.806 | 1.786 | 2.352 | 2.683 |
| 1.585 | 2.737 | 2.486 | 2.549 | 2.674 | 1.900 | 1.783 | 1.856 | 1.672 | 2.536 | 1.471 |
| 1.980 | 2.220 | 1.730 | 1.560 | 1.490 | 1.390 | 1.390 | 1.350 | 1.330 | 1.670 | 1.880 |
| 2.687 | 2.846 | 2.250 | 1.895 | 1.947 | 1.776 | 2.183 | 1.973 | 2.197 | 2.405 | 2.539 |
| 2.553 | 2.587 | 3.014 | 2.732 | 2.654 | 2.765 | 3.370 | 3.141 | 3.307 | 3.209 | 3.015 |
| 2.973 | 2.913 | 2.637 | 2.009 | 1.498 | 1.427 | 1.601 | 1.491 | 1.578 | 2.062 | 3.058 |
| 2.145 | 2.444 | 2.260 | 2.137 | 1.596 | 1.586 | 1.356 | 1.586 | 1.760 | 2.070 | 2.664 |
| 2.149 | 2.442 | 2.259 | 2.155 | 1.597 | 1.620 | 1.364 | 1.437 | 1.759 | 2.084 | 2.773 |

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.002 | 2.373 | 2.409 | 2.363 | 2.071 | 1.584 | 1.247 | 0.954 | 1.118 | 1.690 | 2.681 |
| 3.077 | 2.525 | 2.004 | 1.974 | 1.353 | 0.904 | 0.951 | 1.152 | 1.594 | 1.861 | 2.803 |
| 3.907 | 3.955 | 3.342 | 2.205 | 2.036 | 2.227 | 2.045 | 2.124 | 2.235 | 2.363 | 3.280 |
| 3.418 | 3.571 | 3.140 | 3.010 | 2.451 | 2.500 | 2.158 | 2.219 | 2.356 | 3.024 | 3.682 |
| 3.350 | 3.630 | 3.340 | 2.880 | 2.660 | 2.220 | 2.140 | 2.200 | 2.250 | 3.290 | 3.680 |
| 2.881 | 2.706 | 2.529 | 1.605 | 1.498 | 0.829 | 0.881 | 0.998 | 0.893 | 1.002 | 2.561 |

Continuación del Cuadro 19

| STDMN12 | RMO1 | RMO2 | RMO3 | RMO4 | RMO5 | RMO6 | RMO7 | RMO8 | RMO9 | RMO10 | RMO11 | RMO12 | RST2_1 |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 1.396 | 15.680 | 4.910 | 1.620 | 1.770 | 100.130 | 465.070 | 400.690 | 396.600 | 514.000 | 274.600 | 36.530 | 16.230 | 5.104 |
| 3.561 | 14.230 | 24.330 | 12.660 | 18.350 | 100.780 | 195.200 | 183.030 | 165.600 | 185.550 | 51.480 | 17.140 | 5.260 | 3.518 |
| 2.371 | 10.450 | 10.380 | 5.820 | 19.820 | 139.890 | 270.520 | 315.980 | 322.430 | 324.250 | 128.920 | 12.880 | 8.920 | 2.363 |
| 2.516 | 1.730 | 13.450 | 7.380 | 34.900 | 72.180 | 132.930 | 131.450 | 96.080 | 150.290 | 61.580 | 10.660 | 6.410 | 0.548 |
| 2.277 | 9.270 | 7.850 | 3.830 | 15.540 | 108.640 | 281.570 | 288.870 | 316.530 | 305.240 | 120.360 | 15.650 | 6.990 | 2.551 |
| 2.630 | 15.050 | 15.990 | 16.770 | 28.670 | 141.340 | 517.710 | 439.990 | 493.850 | 494.080 | 243.560 | 40.180 | 23.990 | 3.880 |
| 2.640 | 9.920 | 5.460 | 17.700 | 25.750 | 76.770 | 141.640 | 128.050 | 133.180 | 137.360 | 38.130 | 22.540 | 12.090 | 1.350 |
| 3.570 | 9.640 | 6.434 | 9.349 | 28.326 | 89.362 | 163.452 | 113.875 | 100.032 | 131.304 | 51.961 | 24.011 | 5.664 | 1.912 |
| 1.480 | 30.580 | 32.120 | 32.240 | 52.380 | 95.400 | 182.410 | 149.760 | 147.100 | 141.690 | 67.970 | 37.580 | 24.890 | 3.520 |
| 4.101 | 3.683 | 4.275 | 5.144 | 15.846 | 85.739 | 172.879 | 109.117 | 101.707 | 154.149 | 58.296 | 16.346 | 6.294 | 1.406 |
| 3.036 | 7.440 | 4.350 | 5.220 | 14.240 | 60.350 | 143.930 | 104.130 | 104.260 | 168.870 | 53.790 | 18.730 | 2.610 | 2.479 |
| 1.949 | 16.450 | 22.670 | 12.930 | 23.420 | 69.860 | 159.170 | 167.020 | 168.030 | 158.230 | 108.190 | 35.940 | 11.740 | 4.581 |
| 1.684 | 2.250 | 5.280 | 9.110 | 14.970 | 50.150 | 148.700 | 87.280 | 80.200 | 106.140 | 21.640 | 8.270 | 0.500 | 0.906 |
| 2.684 | 5.391 | 7.091 | 12.017 | 29.410 | 53.214 | 153.511 | 125.390 | 103.912 | 156.192 | 69.872 | 21.442 | 5.077 | 1.533 |
| 1.735 | 11.860 | 18.230 | 12.370 | 20.410 | 115.130 | 256.140 | 203.940 | 219.230 | 249.350 | 86.970 | 8.920 | 4.910 | 2.374 |
| 1.610 | 35.370 | 33.690 | 39.690 | 78.440 | 177.100 | 383.600 | 280.450 | 314.080 | 333.960 | 146.130 | 47.330 | 28.520 | 5.250 |
| 2.517 | 3.639 | 4.878 | 6.532 | 21.282 | 55.653 | 133.139 | 84.079 | 55.174 | 113.531 | 29.576 | 10.355 | 7.611 | 1.038 |
| 3.002 | 7.847 | 6.368 | 4.725 | 24.179 | 92.755 | 171.750 | 184.461 | 208.853 | 184.102 | 71.422 | 16.705 | 5.253 | 2.721 |
| 2.629 | 7.823 | 6.183 | 4.863 | 23.607 | 79.358 | 166.674 | 142.679 | 163.530 | 143.627 | 44.353 | 21.531 | 11.984 | 1.794 |
| 2.585 | 5.450 | 15.360 | 14.270 | 27.680 | 88.090 | 130.000 | 86.640 | 106.230 | 105.860 | 29.680 | 17.840 | 5.050 | 1.132 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|--------|-------|
| 2.692 | 5.450 | 15.360 | 14.270 | 27.680 | 88.090 | 129.250 | 89.360 | 82.500 | 105.910 | 29.590 | 16.750 | 5.140 | 1.132 |
| 1.864 | 7.240 | 10.450 | 8.610 | 33.650 | 93.860 | 200.270 | 175.280 | 154.200 | 204.970 | 80.460 | 11.380 | 7.750 | 2.594 |
| 2.588 | 15.450 | 28.490 | 18.790 | 64.680 | 306.350 | 421.850 | 384.220 | 386.640 | 373.380 | 171.200 | 42.450 | 12.230 | 3.803 |
| 3.519 | 5.555 | 12.936 | 14.002 | 34.634 | 71.439 | 134.597 | 114.864 | 93.775 | 107.445 | 33.775 | 14.816 | 6.650 | 1.630 |
| 3.555 | 4.128 | 4.277 | 6.053 | 21.453 | 62.705 | 155.449 | 102.480 | 84.860 | 137.192 | 49.597 | 15.894 | 0.936 | 1.113 |
| 3.420 | 11.090 | 10.990 | 13.920 | 29.700 | 86.270 | 183.550 | 180.120 | 151.460 | 142.210 | 63.440 | 16.880 | 7.280 | 2.280 |
| 2.886 | 4.690 | 11.690 | 8.690 | 6.430 | 48.150 | 247.070 | 286.520 | 306.720 | 309.980 | 91.810 | 10.660 | 6.290 | 1.104 |

Continuación del Cuadro 19

| RST2_2 | RST2_3 | RST2_4 | RST2_5 | RST2_6 | RST2_7 | RST2_8 | RST2_9 | RST2_10 | RST2_11 | RST2_12 | RST3_1 | RST3_2 | RST3_3 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 1.496 | 0.499 | 0.773 | 12.778 | 20.929 | 17.978 | 18.982 | 26.002 | 16.539 | 7.131 | 5.398 | 12.358 | 10.125 | 12.476 |
| 4.130 | 2.777 | 2.361 | 6.256 | 9.625 | 8.936 | 9.338 | 9.789 | 4.368 | 2.201 | 1.086 | 12.782 | 7.451 | 8.403 |
| 2.542 | 1.547 | 3.563 | 10.476 | 13.294 | 15.534 | 14.936 | 16.209 | 10.995 | 3.696 | 2.298 | 9.147 | 11.695 | 9.639 |
| 2.922 | 1.568 | 4.799 | 5.797 | 7.631 | 8.571 | 6.257 | 9.069 | 5.468 | 1.937 | 1.284 | 13.766 | 8.748 | 9.194 |
| 2.123 | 1.024 | 2.779 | 8.516 | 14.219 | 13.817 | 14.916 | 15.057 | 10.190 | 4.230 | 2.194 | 13.116 | 11.931 | 10.658 |
| 4.600 | 4.040 | 4.410 | 12.000 | 21.550 | 18.520 | 20.090 | 20.300 | 15.080 | 5.140 | 4.740 | 11.660 | 12.900 | 17.970 |
| 1.450 | 2.670 | 2.570 | 5.970 | 8.780 | 8.900 | 10.900 | 10.480 | 4.120 | 2.830 | 1.350 | 9.250 | 16.050 | 10.520 |
| 1.456 | 1.593 | 3.370 | 6.883 | 9.274 | 7.779 | 6.799 | 8.365 | 5.338 | 3.345 | 1.063 | 8.627 | 9.558 | 7.338 |
| 5.290 | 2.440 | 3.950 | 5.490 | 10.130 | 7.670 | 7.690 | 7.410 | 4.750 | 3.120 | 1.760 | 13.340 | 24.920 | 6.240 |
| 1.121 | 1.365 | 2.460 | 6.852 | 10.474 | 7.460 | 6.446 | 9.262 | 5.744 | 2.842 | 1.608 | 15.816 | 11.210 | 13.014 |
| 1.396 | 1.446 | 3.016 | 6.694 | 9.122 | 7.453 | 7.333 | 12.839 | 5.412 | 4.221 | 0.770 | 12.397 | 11.588 | 10.672 |
| 3.356 | 3.478 | 3.149 | 6.372 | 7.997 | 7.855 | 10.153 | 8.467 | 8.708 | 4.130 | 1.960 | 14.571 | 5.508 | 12.554 |
| 1.699 | 2.236 | 2.934 | 4.866 | 10.274 | 7.953 | 6.338 | 6.917 | 2.788 | 2.639 | 0.296 | 14.149 | 10.126 | 8.442 |
| 1.740 | 2.126 | 3.363 | 4.961 | 8.909 | 8.051 | 6.643 | 9.270 | 7.015 | 3.322 | 1.260 | 12.321 | 9.146 | 7.077 |
| 3.933 | 2.540 | 4.165 | 9.860 | 14.134 | 10.375 | 13.309 | 13.575 | 8.056 | 3.250 | 1.747 | 6.917 | 7.713 | 7.119 |
| 5.030 | 6.340 | 9.890 | 13.210 | 18.080 | 13.310 | 15.640 | 17.920 | 9.610 | 5.990 | 4.890 | 9.000 | 9.830 | 8.760 |
| 1.377 | 2.146 | 2.673 | 5.140 | 8.725 | 6.945 | 4.895 | 8.257 | 3.438 | 1.792 | 1.638 | 10.355 | 10.255 | 16.863 |
| 1.773 | 1.019 | 3.468 | 6.803 | 8.814 | 8.847 | 10.223 | 9.306 | 5.672 | 3.537 | 1.384 | 15.093 | 11.911 | 8.019 |
| 1.738 | 1.480 | 3.595 | 6.632 | 9.764 | 9.230 | 8.760 | 9.440 | 4.522 | 6.150 | 2.373 | 9.318 | 10.697 | 13.410 |
| 3.064 | 2.337 | 3.543 | 7.877 | 9.275 | 6.863 | 13.029 | 8.656 | 3.986 | 2.502 | 0.908 | 7.757 | 9.623 | 6.637 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 3.064 | 2.337 | 3.543 | 7.877 | 9.266 | 7.062 | 7.679 | 8.656 | 3.986 | 2.435 | 0.909 | 7.757 | 9.623 | 6.637 |
| 2.429 | 1.810 | 4.690 | 7.346 | 11.515 | 9.015 | 9.364 | 10.558 | 7.370 | 2.109 | 1.936 | 13.576 | 9.017 | 8.803 |
| 5.218 | 3.748 | 9.185 | 19.316 | 18.626 | 18.441 | 17.171 | 16.078 | 11.447 | 6.339 | 2.879 | 12.221 | 7.262 | 8.214 |
| 2.424 | 2.766 | 3.764 | 5.854 | 7.053 | 6.892 | 6.811 | 6.987 | 3.776 | 2.226 | 1.541 | 11.904 | 5.952 | 10.049 |
| 1.143 | 1.782 | 3.002 | 5.118 | 8.844 | 7.282 | 5.921 | 9.594 | 4.639 | 2.370 | 0.304 | 11.741 | 9.637 | 12.962 |
| 2.360 | 2.630 | 3.420 | 5.860 | 9.610 | 11.890 | 7.970 | 8.010 | 5.470 | 2.600 | 1.840 | 12.050 | 11.200 | 10.630 |
| 2.707 | 1.931 | 1.789 | 5.631 | 12.651 | 13.271 | 13.091 | 15.181 | 8.107 | 3.067 | 2.029 | 8.269 | 7.696 | 7.558 |

Continuación del Cuadro 19

| RST3_4 | RST3_5 | RST3_6 | RST3_7 | RST3_8 | RST3_9 | RST3_10 | RST3_11 | RST3_12 | PRW1_1 | PRW1_2 | PRW1_3 | PRW1_4 | PRW1_5 |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 16.370 | 5.458 | 1.753 | 1.751 | 2.015 | 3.073 | 2.279 | 7.988 | 13.051 | 0.021 | 0.016 | 0.012 | 0.009 | 0.110 |
| 4.497 | 2.493 | 2.360 | 2.112 | 3.355 | 2.172 | 3.705 | 5.126 | 7.665 | 0.050 | 0.060 | 0.031 | 0.074 | 0.210 |
| 6.336 | 2.721 | 1.901 | 2.343 | 2.175 | 2.146 | 4.186 | 14.783 | 9.498 | 0.027 | 0.051 | 0.015 | 0.039 | 0.221 |
| 5.960 | 4.128 | 2.399 | 2.983 | 3.008 | 2.397 | 3.103 | 8.058 | 6.921 | 0.012 | 0.055 | 0.027 | 0.079 | 0.229 |
| 6.758 | 3.401 | 2.309 | 2.278 | 2.138 | 2.313 | 3.467 | 14.492 | 13.850 | 0.027 | 0.033 | 0.018 | 0.036 | 0.206 |
| 7.230 | 4.290 | 1.900 | 2.050 | 1.890 | 1.850 | 2.930 | 6.090 | 11.030 | 0.030 | 0.040 | 0.020 | 0.040 | 0.170 |
| 4.410 | 3.780 | 3.020 | 4.570 | 4.880 | 4.480 | 4.990 | 7.190 | 9.410 | 0.010 | 0.020 | 0.040 | 0.070 | 0.170 |
| 5.309 | 4.060 | 2.668 | 3.204 | 3.055 | 2.675 | 5.151 | 6.455 | 8.061 | 0.033 | 0.034 | 0.052 | 0.088 | 0.143 |
| 4.560 | 2.670 | 3.790 | 2.690 | 2.690 | 2.300 | 3.980 | 5.510 | 6.650 | 0.030 | 0.050 | 0.040 | 0.080 | 0.190 |
| 8.787 | 3.745 | 3.185 | 2.907 | 2.870 | 2.866 | 4.978 | 6.480 | 9.859 | 0.016 | 0.024 | 0.019 | 0.069 | 0.152 |
| 8.716 | 5.100 | 2.775 | 3.146 | 2.983 | 5.234 | 4.096 | 9.776 | 12.011 | 0.015 | 0.020 | 0.015 | 0.029 | 0.119 |
| 5.163 | 4.358 | 2.040 | 2.087 | 3.596 | 2.856 | 5.149 | 4.047 | 6.215 | 0.034 | 0.086 | 0.018 | 0.071 | 0.175 |
| 8.806 | 3.741 | 3.002 | 3.882 | 3.498 | 2.429 | 4.912 | 13.285 | 18.466 | 0.009 | 0.010 | 0.009 | 0.032 | 0.109 |
| 4.561 | 4.029 | 2.945 | 2.969 | 3.178 | 2.795 | 4.522 | 7.007 | 11.903 | 0.014 | 0.032 | 0.037 | 0.098 | 0.143 |
| 7.191 | 4.289 | 2.710 | 2.357 | 3.232 | 2.806 | 5.946 | 15.745 | 13.867 | 0.028 | 0.034 | 0.018 | 0.041 | 0.183 |
| 6.180 | 4.260 | 2.690 | 2.340 | 2.410 | 3.540 | 2.970 | 5.800 | 9.000 | 0.060 | 0.060 | 0.050 | 0.090 | 0.220 |
| 5.224 | 4.188 | 2.842 | 3.522 | 3.972 | 2.978 | 4.951 | 7.514 | 8.895 | 0.011 | 0.019 | 0.019 | 0.082 | 0.122 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 6.528 | 2.992 | 2.092 | 1.857 | 2.033 | 1.893 | 3.103 | 9.234 | 10.198 | 0.014 | 0.022 | 0.025 | 0.067 | 0.130 |
| 5.853 | 3.352 | 2.376 | 2.984 | 2.295 | 2.827 | 3.768 | 13.937 | 6.874 | 0.029 | 0.026 | 0.020 | 0.072 | 0.115 |
| 5.764 | 3.752 | 3.629 | 3.447 | 9.879 | 3.834 | 6.020 | 6.651 | 8.642 | 0.027 | 0.063 | 0.047 | 0.101 | 0.165 |
| 5.764 | 3.752 | 3.646 | 3.370 | 5.303 | 3.834 | 6.021 | 7.027 | 8.604 | 0.027 | 0.063 | 0.047 | 0.101 | 0.165 |
| 6.684 | 3.332 | 2.459 | 1.960 | 3.364 | 2.125 | 4.969 | 6.739 | 10.123 | 0.027 | 0.034 | 0.031 | 0.076 | 0.222 |
| 5.903 | 2.731 | 2.020 | 2.572 | 1.734 | 1.984 | 2.689 | 6.310 | 9.387 | 0.037 | 0.063 | 0.031 | 0.069 | 0.255 |
| 4.394 | 3.544 | 1.931 | 2.374 | 2.821 | 2.404 | 4.734 | 5.628 | 9.257 | 0.013 | 0.035 | 0.030 | 0.095 | 0.128 |
| 6.329 | 3.654 | 2.325 | 3.479 | 3.691 | 4.043 | 3.854 | 5.518 | 12.419 | 0.016 | 0.020 | 0.022 | 0.071 | 0.118 |
| 5.380 | 2.830 | 2.760 | 7.580 | 2.840 | 2.510 | 4.630 | 6.620 | 15.910 | 0.030 | 0.040 | 0.040 | 0.110 | 0.180 |
| 8.804 | 4.663 | 1.722 | 1.820 | 1.454 | 1.906 | 4.395 | 10.926 | 11.511 | 0.024 | 0.027 | 0.015 | 0.012 | 0.055 |

Continuación del Cuadro 19

| | PRW1_6 | PRW1_7 | PRW1_8 | PRW1_9 | PRW1_10 | PRW1_11 | PRW1_12 | PRW2_1 | PRW2_2 | PRW2_3 | PRW2_4 | PRW2_5 | PRW2_6 | PRW2_7 | PRW2_8 |
|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.475 | 0.441 | 0.414 | 0.456 | 0.222 | 0.051 | 0.024 | 0.222 | 0.286 | 0.429 | 0.250 | 0.466 | 0.692 | 0.647 | 0.658 | |
| 0.403 | 0.515 | 0.401 | 0.381 | 0.153 | 0.093 | 0.037 | 0.200 | 0.414 | 0.154 | 0.324 | 0.649 | 0.749 | 0.645 | 0.694 | |
| 0.527 | 0.565 | 0.585 | 0.525 | 0.245 | 0.062 | 0.030 | 0.250 | 0.167 | 0.250 | 0.333 | 0.527 | 0.632 | 0.624 | 0.650 | |
| 0.330 | 0.319 | 0.295 | 0.284 | 0.113 | 0.049 | 0.012 | 0.333 | 0.191 | 0.231 | 0.359 | 0.348 | 0.618 | 0.567 | 0.489 | |
| 0.519 | 0.537 | 0.608 | 0.500 | 0.256 | 0.058 | 0.033 | 0.250 | 0.167 | 0.364 | 0.450 | 0.602 | 0.723 | 0.673 | 0.725 | |
| 0.540 | 0.590 | 0.630 | 0.610 | 0.280 | 0.080 | 0.040 | 0.200 | 0.260 | 0.640 | 0.610 | 0.610 | 0.810 | 0.780 | 0.790 | |
| 0.330 | 0.240 | 0.190 | 0.240 | 0.050 | 0.040 | 0.020 | 0.880 | 0.690 | 0.680 | 0.670 | 0.570 | 0.700 | 0.620 | 0.680 | |
| 0.158 | 0.148 | 0.144 | 0.144 | 0.097 | 0.062 | 0.030 | 0.015 | 0.014 | 0.012 | 0.053 | 0.157 | 0.332 | 0.221 | 0.209 | |
| 0.390 | 0.340 | 0.310 | 0.290 | 0.140 | 0.060 | 0.030 | 0.890 | 0.860 | 0.880 | 0.820 | 0.760 | 0.760 | 0.740 | 0.750 | |
| 0.152 | 0.131 | 0.148 | 0.146 | 0.103 | 0.053 | 0.021 | 0.002 | 0.004 | 0.007 | 0.030 | 0.160 | 0.354 | 0.256 | 0.249 | |
| 0.265 | 0.202 | 0.235 | 0.236 | 0.115 | 0.038 | 0.012 | 0.000 | 0.250 | 0.286 | 0.400 | 0.375 | 0.548 | 0.528 | 0.449 | |
| 0.361 | 0.426 | 0.430 | 0.400 | 0.253 | 0.083 | 0.037 | 0.353 | 0.188 | 0.571 | 0.371 | 0.547 | 0.694 | 0.660 | 0.635 | |
| 0.134 | 0.147 | 0.153 | 0.196 | 0.068 | 0.019 | 0.003 | 0.250 | 0.400 | 0.571 | 0.294 | 0.298 | 0.689 | 0.487 | 0.570 | |
| 0.154 | 0.166 | 0.162 | 0.165 | 0.092 | 0.057 | 0.022 | 0.011 | 0.008 | 0.025 | 0.038 | 0.091 | 0.357 | 0.255 | 0.256 | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0.432 | 0.343 | 0.379 | 0.403 | 0.192 | 0.031 | 0.018 | 0.357 | 0.375 | 0.364 | 0.188 | 0.585 | 0.636 | 0.596 | 0.599 |
| 0.510 | 0.440 | 0.390 | 0.390 | 0.220 | 0.090 | 0.060 | 0.590 | 0.540 | 0.590 | 0.580 | 0.690 | 0.790 | 0.690 | 0.740 |
| 0.132 | 0.091 | 0.102 | 0.099 | 0.062 | 0.036 | 0.025 | 0.005 | 0.007 | 0.008 | 0.032 | 0.097 | 0.258 | 0.181 | 0.133 |
| 0.169 | 0.190 | 0.176 | 0.173 | 0.106 | 0.038 | 0.017 | 0.005 | 0.004 | 0.009 | 0.023 | 0.138 | 0.309 | 0.304 | 0.342 |
| 0.147 | 0.180 | 0.195 | 0.126 | 0.046 | 0.046 | 0.031 | 0.014 | 0.006 | 0.000 | 0.019 | 0.104 | 0.289 | 0.209 | 0.277 |
| 0.216 | 0.219 | 0.205 | 0.190 | 0.102 | 0.061 | 0.054 | 0.250 | 0.200 | 0.250 | 0.286 | 0.517 | 0.635 | 0.519 | 0.542 |
| 0.222 | 0.219 | 0.192 | 0.190 | 0.102 | 0.060 | 0.057 | 0.250 | 0.200 | 0.250 | 0.286 | 0.517 | 0.630 | 0.519 | 0.570 |
| 0.335 | 0.349 | 0.335 | 0.353 | 0.133 | 0.042 | 0.021 | 0.250 | 0.267 | 0.154 | 0.463 | 0.480 | 0.669 | 0.640 | 0.637 |
| 0.518 | 0.442 | 0.372 | 0.404 | 0.204 | 0.095 | 0.030 | 0.200 | 0.208 | 0.353 | 0.487 | 0.631 | 0.714 | 0.698 | 0.736 |
| 0.159 | 0.148 | 0.120 | 0.142 | 0.054 | 0.046 | 0.020 | 0.006 | 0.011 | 0.025 | 0.046 | 0.101 | 0.311 | 0.208 | 0.151 |
| 0.144 | 0.136 | 0.156 | 0.137 | 0.088 | 0.038 | 0.014 | 0.010 | 0.009 | 0.004 | 0.035 | 0.157 | 0.341 | 0.243 | 0.225 |
| 0.440 | 0.470 | 0.420 | 0.410 | 0.170 | 0.070 | 0.040 | 0.520 | 0.320 | 0.500 | 0.460 | 0.650 | 0.710 | 0.660 | 0.680 |
| 0.283 | 0.425 | 0.395 | 0.389 | 0.130 | 0.015 | 0.012 | 0.200 | 0.111 | 0.125 | 0.200 | 0.485 | 0.597 | 0.475 | 0.614 |

Continuación del Cuadro 19

| PRW2_9 | PRW2_10 | PRW2_11 | PRW2_12 | DAYP1 | DAYP2 | DAYP3 | DAYP4 | DAYP5 | DAYP6 | DAYP7 | DAYP8 | DAYP9 | DAYP10 | DAYP11 | DAYP12 |
|--------|---------|---------|---------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.688 | 0.589 | 0.000 | 0.111 | 0.820 | 0.640 | 0.640 | 0.360 | 5.270 | 18.910 | 18.000 | 17.820 | 18.640 | 11.730 | 1.640 | 0.820 |
| 0.681 | 0.535 | 0.263 | 0.071 | 1.820 | 2.640 | 1.180 | 3.090 | 11.910 | 19.180 | 19.180 | 18.090 | 17.360 | 7.820 | 3.450 | 1.270 |
| 0.667 | 0.473 | 0.095 | 0.000 | 1.090 | 1.640 | 0.730 | 1.640 | 10.000 | 18.270 | 19.090 | 20.270 | 19.090 | 10.180 | 1.910 | 0.910 |
| 0.566 | 0.485 | 0.238 | 0.364 | 0.550 | 1.910 | 1.180 | 3.550 | 8.360 | 14.270 | 13.640 | 11.910 | 12.360 | 6.000 | 1.910 | 1.000 |
| 0.754 | 0.456 | 0.050 | 0.000 | 1.090 | 1.090 | 1.000 | 1.820 | 10.730 | 20.360 | 20.000 | 22.180 | 21.090 | 10.360 | 1.820 | 1.000 |
| 0.780 | 0.640 | 0.460 | 0.470 | 1.290 | 1.320 | 1.740 | 2.870 | 9.340 | 22.970 | 23.420 | 24.130 | 23.000 | 14.680 | 4.260 | 2.180 |
| 0.700 | 0.760 | 0.790 | 0.880 | 3.570 | 1.750 | 4.000 | 5.890 | 9.290 | 16.250 | 12.790 | 12.140 | 14.250 | 6.640 | 5.680 | 4.930 |
| 0.285 | 0.096 | 0.061 | 0.016 | 2.000 | 1.000 | 2.000 | 4.000 | 9.000 | 15.000 | 11.000 | 11.000 | 13.000 | 6.000 | 4.000 | 1.000 |
| 0.780 | 0.750 | 0.820 | 0.880 | 8.210 | 8.850 | 9.320 | 10.970 | 14.940 | 19.470 | 18.820 | 18.000 | 18.290 | 12.210 | 9.120 | 8.120 |
| 0.348 | 0.113 | 0.028 | 0.008 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 10.000 | 15.000 | 12.000 | 12.000 | 15.000 | 7.000 | 2.000 | 1.000 |
| 0.603 | 0.364 | 0.200 | 0.167 | 0.450 | 0.730 | 0.640 | 1.360 | 5.090 | 11.450 | 9.820 | 9.730 | 11.910 | 5.000 | 1.360 | 0.550 |

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| 0.649 | 0.466 | 0.350 | 0.300 | 1.550 | 2.910 | 1.270 | 3.180 | 8.640 | 16.640 | 18.180 | 17.450 | 16.820 | 10.550 | 3.640 | 1.820 |
| 0.595 | 0.344 | 0.143 | 0.000 | 0.360 | 0.450 | 0.640 | 1.550 | 4.270 | 9.640 | 6.910 | 8.450 | 10.090 | 2.910 | 0.640 | 0.090 |
| 0.370 | 0.124 | 0.047 | 0.011 | 1.000 | 1.000 | 2.000 | 4.000 | 7.000 | 15.000 | 13.000 | 13.000 | 16.000 | 7.000 | 3.000 | 1.000 |
| 0.661 | 0.547 | 0.091 | 0.000 | 1.270 | 1.450 | 1.000 | 1.450 | 9.640 | 16.730 | 15.090 | 15.640 | 16.910 | 9.640 | 1.000 | 0.550 |
| 0.770 | 0.640 | 0.420 | 0.240 | 4.100 | 3.880 | 3.750 | 5.470 | 13.130 | 22.130 | 19.230 | 19.600 | 19.850 | 12.880 | 4.550 | 2.470 |
| 0.231 | 0.072 | 0.033 | 0.012 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 7.000 | 12.000 | 8.000 | 7.000 | 10.000 | 4.000 | 2.000 | 1.000 |
| 0.333 | 0.116 | 0.014 | 0.006 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 8.000 | 14.000 | 15.000 | 16.000 | 15.000 | 7.000 | 2.000 | 1.000 |
| 0.253 | 0.085 | 0.005 | 0.002 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 7.000 | 13.000 | 12.000 | 15.000 | 11.000 | 4.000 | 2.000 | 1.000 |
| 0.623 | 0.319 | 0.412 | 0.250 | 1.090 | 2.270 | 1.820 | 3.820 | 7.910 | 11.450 | 9.820 | 9.730 | 10.360 | 4.270 | 3.090 | 2.180 |
| 0.623 | 0.304 | 0.375 | 0.240 | 1.090 | 2.270 | 1.820 | 3.820 | 7.910 | 11.550 | 9.820 | 9.730 | 10.360 | 4.180 | 2.910 | 2.200 |
| 0.667 | 0.602 | 0.364 | 0.200 | 1.090 | 1.360 | 1.180 | 3.730 | 9.270 | 15.360 | 15.910 | 15.550 | 16.360 | 8.450 | 2.000 | 0.910 |
| 0.774 | 0.592 | 0.194 | 0.167 | 1.360 | 2.180 | 1.550 | 3.550 | 12.820 | 20.000 | 19.270 | 19.270 | 20.550 | 10.910 | 3.270 | 1.090 |
| 0.199 | 0.079 | 0.030 | 0.008 | 1.000 | 1.000 | 2.000 | 4.000 | 7.000 | 14.000 | 11.000 | 8.000 | 10.000 | 4.000 | 2.000 | 1.000 |
| 0.275 | 0.102 | 0.038 | 0.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 3.000 | 9.000 | 15.000 | 12.000 | 12.000 | 12.000 | 6.000 | 2.000 | 0.000 |
| 0.670 | 0.590 | 0.260 | 0.210 | 2.200 | 1.850 | 2.450 | 5.050 | 11.250 | 18.700 | 18.880 | 18.480 | 17.500 | 9.730 | 2.750 | 1.520 |
| 0.564 | 0.391 | 0.167 | 0.000 | 0.910 | 0.820 | 0.730 | 0.450 | 3.000 | 12.640 | 14.550 | 16.730 | 14.820 | 5.820 | 0.550 | 0.360 |

Continuación del Cuadro 19

| WT1 | WT2 | WT3 | WT4 | WT5 | WT6 | WT7 | WT8 | WT9 | WT10 | WT11 |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 3.588 | 1.196 | 0.598 | 0.598 | 16.744 | 34.685 | 32.891 | 31.096 | 37.077 | 23.322 | 7.774 |
| 2.392 | 2.990 | 2.392 | 1.794 | 9.568 | 19.734 | 18.538 | 19.136 | 17.342 | 5.382 | 2.990 |
| 1.196 | 1.196 | 0.598 | 3.588 | 14.950 | 22.126 | 30.498 | 34.685 | 33.489 | 20.332 | 2.392 |
| 0.598 | 1.794 | 2.033 | 5.382 | 9.568 | 14.352 | 14.950 | 10.166 | 11.960 | 8.372 | 2.392 |
| 1.196 | 1.794 | 0.598 | 1.435 | 13.156 | 31.694 | 31.096 | 32.891 | 34.685 | 17.342 | 2.990 |
| 1.010 | 1.010 | 1.230 | 3.430 | 11.020 | 23.530 | 19.100 | 17.250 | 21.050 | 8.500 | 2.080 |
| 1.010 | 1.010 | 1.230 | 3.430 | 11.020 | 23.530 | 19.100 | 17.250 | 21.050 | 8.500 | 2.080 |
| 1.446 | 0.965 | 1.402 | 4.248 | 13.403 | 24.515 | 17.079 | 15.003 | 19.694 | 7.793 | 3.601 |

| | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 1.010 | 1.010 | 1.230 | 3.430 | 11.020 | 23.530 | 19.100 | 17.250 | 21.050 | 8.500 | 2.080 |
| 0.552 | 0.641 | 0.771 | 2.376 | 12.858 | 25.927 | 16.364 | 15.253 | 23.118 | 8.743 | 2.451 |
| 1.196 | 0.598 | 0.718 | 1.435 | 7.176 | 13.156 | 10.764 | 11.482 | 17.940 | 7.176 | 3.588 |
| 2.392 | 2.990 | 1.794 | 2.033 | 8.970 | 16.146 | 16.744 | 19.734 | 14.950 | 13.156 | 2.990 |
| 0.359 | 0.478 | 0.718 | 1.794 | 7.176 | 16.146 | 6.578 | 7.176 | 9.568 | 2.990 | 1.196 |
| 0.799 | 1.050 | 1.780 | 4.357 | 7.883 | 22.742 | 18.576 | 15.394 | 23.139 | 10.351 | 3.176 |
| 1.794 | 1.914 | 1.435 | 4.186 | 17.342 | 25.714 | 19.734 | 23.920 | 26.312 | 10.764 | 1.435 |
| 1.010 | 1.010 | 1.230 | 3.430 | 11.020 | 23.530 | 19.100 | 17.250 | 21.050 | 8.500 | 2.080 |
| 0.762 | 1.021 | 1.367 | 4.455 | 11.651 | 27.872 | 17.601 | 11.550 | 23.767 | 6.192 | 2.168 |
| 0.882 | 0.716 | 0.531 | 2.718 | 10.428 | 19.309 | 20.738 | 23.481 | 20.698 | 8.030 | 1.878 |
| 1.054 | 0.833 | 0.655 | 3.181 | 10.695 | 22.462 | 19.229 | 22.039 | 19.356 | 5.977 | 2.902 |
| 1.196 | 2.392 | 1.794 | 3.588 | 11.960 | 9.568 | 10.166 | 16.744 | 13.156 | 4.784 | 2.990 |
| 1.196 | 2.392 | 1.914 | 2.990 | 9.568 | 14.352 | 11.960 | 13.156 | 13.754 | 4.784 | 2.990 |
| 1.435 | 1.555 | 1.196 | 4.784 | 11.362 | 25.116 | 17.940 | 19.136 | 25.116 | 10.166 | 1.794 |
| 2.751 | 5.382 | 3.229 | 8.970 | 30.498 | 38.273 | 35.881 | 33.489 | 34.685 | 19.136 | 5.980 |
| 0.948 | 2.208 | 2.390 | 5.911 | 12.193 | 22.973 | 19.605 | 16.005 | 18.338 | 5.765 | 2.529 |
| 0.704 | 0.729 | 1.032 | 3.659 | 10.693 | 26.510 | 17.477 | 14.472 | 23.396 | 8.458 | 2.710 |
| 1.010 | 1.010 | 1.230 | 3.430 | 11.020 | 23.530 | 19.100 | 17.250 | 21.050 | 8.500 | 2.080 |
| 1.196 | 1.794 | 1.196 | 0.359 | 2.751 | 19.734 | 23.920 | 25.116 | 28.704 | 9.568 | 1.196 |

Continuación del Cuadro 19

| WT12 | OBSL1 | OBSL2 | OBSL3 | OBSL4 | OBSL5 | OBSL6 | OBSL7 | OBSL8 | OBSL9 | OBSL10 | OBSL11 | OBSL12 |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 2.392 | 18.543 | 21.086 | 23.701 | 25.397 | 24.473 | 21.955 | 22.238 | 22.066 | 20.854 | 19.887 | 18.079 | 17.750 |
| 0.598 | 18.961 | 21.342 | 24.733 | 26.643 | 25.473 | 22.157 | 21.682 | 21.342 | 19.289 | 18.466 | 17.865 | 17.466 |
| 1.196 | 19.266 | 21.627 | 24.027 | 25.037 | 23.720 | 20.576 | 20.627 | 20.263 | 18.175 | 18.045 | 18.046 | 17.905 |
| 1.196 | 18.630 | 20.899 | 23.738 | 25.411 | 24.330 | 21.786 | 21.526 | 21.623 | 19.699 | 18.921 | 18.203 | 17.230 |
| 1.196 | 18.856 | 21.349 | 24.196 | 25.575 | 23.903 | 21.435 | 21.300 | 21.027 | 19.083 | 18.442 | 17.680 | 17.455 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0.770 | 18.710 | 21.010 | 23.420 | 23.150 | 20.520 | 17.750 | 18.920 | 18.110 | 16.680 | 18.680 | 18.980 | 18.250 | 18.250 |
| 0.770 | 18.490 | 20.840 | 23.100 | 22.560 | 20.040 | 17.280 | 18.740 | 18.000 | 16.110 | 18.150 | 18.420 | 17.840 | 17.840 |
| 0.850 | 18.186 | 20.880 | 23.574 | 23.815 | 22.374 | 19.204 | 19.950 | 19.344 | 17.658 | 18.598 | 18.295 | 17.444 | 17.444 |
| 0.770 | 18.890 | 21.210 | 23.550 | 23.190 | 20.510 | 17.910 | 19.120 | 18.230 | 16.780 | 18.740 | 19.060 | 18.370 | 18.370 |
| 0.944 | 18.725 | 21.361 | 24.192 | 25.087 | 24.278 | 21.941 | 23.103 | 22.579 | 20.585 | 20.663 | 19.528 | 18.259 | 18.259 |
| 1.196 | 20.129 | 22.585 | 25.905 | 27.345 | 26.239 | 24.330 | 24.149 | 24.348 | 21.859 | 21.121 | 20.068 | 19.156 | 19.156 |
| 1.794 | 16.667 | 18.323 | 21.171 | 22.878 | 22.059 | 20.836 | 20.492 | 20.832 | 19.184 | 18.389 | 16.988 | 16.035 | 16.035 |
| 0.179 | 18.107 | 20.595 | 23.882 | 27.719 | 26.996 | 25.266 | 23.707 | 23.638 | 22.620 | 20.453 | 18.019 | 16.758 | 16.758 |
| 0.752 | 18.888 | 21.451 | 24.127 | 24.647 | 23.129 | 20.786 | 22.028 | 21.355 | 19.577 | 20.159 | 19.519 | 18.430 | 18.430 |
| 1.196 | 17.340 | 19.731 | 22.045 | 23.441 | 22.353 | 19.740 | 20.566 | 20.955 | 19.452 | 18.668 | 17.410 | 16.473 | 16.473 |
| 0.770 | 18.950 | 21.250 | 23.630 | 23.300 | 20.550 | 17.930 | 19.080 | 18.190 | 16.870 | 18.850 | 19.190 | 18.460 | 18.460 |
| 1.593 | 18.135 | 20.897 | 23.723 | 24.321 | 23.405 | 20.377 | 21.131 | 20.668 | 18.739 | 19.187 | 18.407 | 17.402 | 17.402 |
| 0.591 | 18.706 | 21.237 | 24.154 | 25.062 | 23.802 | 21.269 | 22.180 | 21.627 | 20.154 | 20.488 | 19.552 | 18.320 | 18.320 |
| 1.615 | 18.712 | 21.244 | 24.159 | 25.068 | 23.813 | 21.290 | 22.205 | 21.651 | 20.173 | 20.500 | 19.561 | 18.327 | 18.327 |
| 1.196 | 17.556 | 20.091 | 23.399 | 24.829 | 24.125 | 20.915 | 19.956 | 19.973 | 18.357 | 17.648 | 16.787 | 15.908 | 15.908 |
| 1.794 | 17.503 | 20.061 | 23.382 | 24.800 | 24.121 | 20.902 | 19.929 | 19.963 | 18.343 | 17.591 | 16.814 | 15.991 | 15.991 |
| 1.196 | 15.332 | 18.053 | 20.976 | 23.018 | 22.396 | 19.592 | 18.908 | 18.647 | 17.224 | 16.268 | 15.225 | 14.157 | 14.157 |
| 1.196 | 18.058 | 20.719 | 23.488 | 24.650 | 23.826 | 21.694 | 22.007 | 21.636 | 19.975 | 19.150 | 18.074 | 17.146 | 17.146 |
| 1.135 | 18.169 | 20.836 | 23.464 | 23.549 | 21.951 | 18.700 | 19.422 | 18.777 | 17.184 | 18.324 | 18.197 | 17.411 | 17.411 |
| 0.160 | 18.901 | 21.374 | 23.892 | 24.035 | 21.962 | 19.506 | 20.710 | 19.927 | 18.448 | 19.566 | 19.401 | 18.461 | 18.461 |
| 0.770 | 19.030 | 21.340 | 23.590 | 23.090 | 20.330 | 17.900 | 19.300 | 18.320 | 16.800 | 18.770 | 19.120 | 18.480 | 18.480 |
| 0.598 | 16.307 | 18.915 | 22.571 | 25.438 | 25.259 | 23.821 | 23.300 | 22.272 | 20.097 | 17.805 | 16.103 | 15.192 | 15.192 |

Continuación del Cuadro 19

| UAV01 | UAV02 | UAV03 | UAV04 | UAV05 | UAV06 | UAV07 | UAV08 | UAV09 | UAV010 | UAV011 | UAV012 |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|
| 2.160 | 2.225 | 2.274 | 2.216 | 1.959 | 1.625 | 1.790 | 1.759 | 1.596 | 1.839 | 2.040 | 2.096 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2.457 | 2.385 | 2.332 | 2.161 | 1.857 | 1.738 | 1.983 | 1.938 | 1.815 | 2.130 | 2.422 | 2.451 |
| 2.420 | 2.442 | 2.466 | 2.353 | 2.032 | 1.675 | 1.825 | 1.801 | 1.666 | 1.965 | 2.256 | 2.343 |
| 2.348 | 2.253 | 2.180 | 1.978 | 1.668 | 1.793 | 2.266 | 2.200 | 1.997 | 2.277 | 2.451 | 2.391 |
| 2.637 | 2.558 | 2.485 | 2.363 | 2.083 | 2.164 | 2.698 | 2.613 | 2.322 | 2.578 | 2.764 | 2.697 |
| 2.410 | 1.980 | 1.770 | 1.940 | 1.930 | 1.790 | 2.090 | 2.360 | 2.380 | 2.370 | 2.380 | 2.270 |
| 2.320 | 1.820 | 1.830 | 2.130 | 2.110 | 1.930 | 2.180 | 2.380 | 2.350 | 2.250 | 2.220 | 2.080 |
| 2.500 | 2.700 | 2.700 | 2.200 | 2.100 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 1.900 | 2.400 | 2.500 | 2.400 |
| 2.400 | 1.920 | 1.760 | 1.970 | 1.950 | 1.810 | 2.100 | 2.360 | 2.380 | 2.350 | 2.340 | 2.210 |
| 2.400 | 2.700 | 2.700 | 2.200 | 2.100 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 1.900 | 2.300 | 2.300 | 2.200 |
| 2.438 | 2.386 | 2.398 | 2.362 | 2.109 | 1.944 | 2.229 | 2.164 | 1.957 | 2.283 | 2.521 | 2.481 |
| 2.164 | 2.158 | 2.188 | 2.134 | 1.907 | 1.758 | 1.853 | 1.833 | 1.740 | 1.995 | 2.192 | 2.138 |
| 2.493 | 2.559 | 2.575 | 2.437 | 2.223 | 2.274 | 2.653 | 2.579 | 2.352 | 2.501 | 2.542 | 2.451 |
| 2.300 | 2.600 | 2.700 | 2.100 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 1.900 | 2.200 | 2.300 | 2.200 |
| 2.395 | 2.388 | 2.394 | 2.257 | 1.922 | 1.602 | 1.744 | 1.721 | 1.603 | 1.910 | 2.233 | 2.322 |
| 2.520 | 2.050 | 1.760 | 1.890 | 1.880 | 1.770 | 2.100 | 2.410 | 2.480 | 2.480 | 2.500 | 2.370 |
| 2.500 | 2.800 | 2.700 | 2.200 | 2.100 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.000 | 2.400 | 2.500 | 2.400 |
| 2.200 | 2.500 | 2.500 | 2.000 | 2.000 | 1.900 | 1.900 | 1.900 | 1.800 | 2.100 | 2.100 | 2.000 |
| 2.200 | 2.500 | 2.500 | 2.000 | 2.000 | 1.900 | 1.900 | 1.900 | 1.800 | 2.100 | 2.100 | 2.000 |
| 2.767 | 2.752 | 2.678 | 2.529 | 2.303 | 2.471 | 3.039 | 2.948 | 2.616 | 2.789 | 2.873 | 2.792 |
| 2.799 | 2.830 | 2.788 | 2.635 | 2.415 | 2.526 | 3.023 | 2.936 | 2.621 | 2.789 | 2.864 | 2.792 |
| 2.360 | 2.324 | 2.356 | 2.340 | 2.110 | 1.911 | 2.145 | 2.086 | 1.895 | 2.215 | 2.439 | 2.398 |
| 2.390 | 2.315 | 2.264 | 2.081 | 1.733 | 1.540 | 1.773 | 1.724 | 1.599 | 1.945 | 2.299 | 2.364 |
| 2.500 | 2.700 | 2.700 | 2.100 | 2.000 | 1.900 | 2.000 | 2.000 | 1.900 | 2.300 | 2.400 | 2.400 |
| 2.300 | 2.600 | 2.600 | 2.000 | 2.000 | 1.900 | 1.900 | 1.900 | 1.800 | 2.200 | 2.300 | 2.200 |
| 2.380 | 1.840 | 1.730 | 1.960 | 1.940 | 1.800 | 2.100 | 2.360 | 2.380 | 2.310 | 2.280 | 2.130 |
| 2.557 | 2.577 | 2.597 | 2.478 | 2.136 | 1.751 | 1.911 | 1.886 | 1.746 | 2.073 | 2.388 | 2.484 |

Datos

temperatura

y

lluvia

para

1994.

| Código | CVI | UM | Nombre | Área (km²) | Coord. Lat | Coord. Lon | Altura (m) | Temperatura (°C) | Humedad (%) | Lluvia (mm) | Velocidad (km/h) | Presión (hPa) | Visibilidad (km) | OPC |
|--------|-----|--------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------------|-------------|-------------|------------------|---------------|------------------|--------|
| 130975 | 521 | 130975 | Santa Ana | 130975 | 130975 | 130975 | 130975 | 130975 | 130975 | 130975 | 130975 | 130975 | 130975 | 130975 |
| 130976 | 522 | 130976 | Santa Ana | 130976 | 130976 | 130976 | 130976 | 130976 | 130976 | 130976 | 130976 | 130976 | 130976 | 130976 |
| 130977 | 523 | 130977 | Santa Ana | 130977 | 130977 | 130977 | 130977 | 130977 | 130977 | 130977 | 130977 | 130977 | 130977 | 130977 |
| 130978 | 524 | 130978 | Santa Ana | 130978 | 130978 | 130978 | 130978 | 130978 | 130978 | 130978 | 130978 | 130978 | 130978 | 130978 |
| 130979 | 525 | 130979 | Santa Ana | 130979 | 130979 | 130979 | 130979 | 130979 | 130979 | 130979 | 130979 | 130979 | 130979 | 130979 |
| 130980 | 526 | 130980 | Santa Ana | 130980 | 130980 | 130980 | 130980 | 130980 | 130980 | 130980 | 130980 | 130980 | 130980 | 130980 |
| 130981 | 527 | 130981 | Santa Ana | 130981 | 130981 | 130981 | 130981 | 130981 | 130981 | 130981 | 130981 | 130981 | 130981 | 130981 |
| 130982 | 528 | 130982 | Santa Ana | 130982 | 130982 | 130982 | 130982 | 130982 | 130982 | 130982 | 130982 | 130982 | 130982 | 130982 |
| 130983 | 529 | 130983 | Santa Ana | 130983 | 130983 | 130983 | 130983 | 130983 | 130983 | 130983 | 130983 | 130983 | 130983 | 130983 |
| 130984 | 530 | 130984 | Santa Ana | 130984 | 130984 | 130984 | 130984 | 130984 | 130984 | 130984 | 130984 | 130984 | 130984 | 130984 |
| 130985 | 531 | 130985 | Santa Ana | 130985 | 130985 | 130985 | 130985 | 130985 | 130985 | 130985 | 130985 | 130985 | 130985 | 130985 |
| 130986 | 532 | 130986 | Santa Ana | 130986 | 130986 | 130986 | 130986 | 130986 | 130986 | 130986 | 130986 | 130986 | 130986 | 130986 |
| 130987 | 533 | 130987 | Santa Ana | 130987 | 130987 | 130987 | 130987 | 130987 | 130987 | 130987 | 130987 | 130987 | 130987 | 130987 |
| 130988 | 534 | 130988 | Santa Ana | 130988 | 130988 | 130988 | 130988 | 130988 | 130988 | 130988 | 130988 | 130988 | 130988 | 130988 |
| 130989 | 535 | 130989 | Santa Ana | 130989 | 130989 | 130989 | 130989 | 130989 | 130989 | 130989 | 130989 | 130989 | 130989 | 130989 |
| 130990 | 536 | 130990 | Santa Ana | 130990 | 130990 | 130990 | 130990 | 130990 | 130990 | 130990 | 130990 | 130990 | 130990 | 130990 |
| 130991 | 537 | 130991 | Santa Ana | 130991 | 130991 | 130991 | 130991 | 130991 | 130991 | 130991 | 130991 | 130991 | 130991 | 130991 |
| 130992 | 538 | 130992 | Santa Ana | 130992 | 130992 | 130992 | 130992 | 130992 | 130992 | 130992 | 130992 | 130992 | 130992 | 130992 |
| 130993 | 539 | 130993 | Santa Ana | 130993 | 130993 | 130993 | 130993 | 130993 | 130993 | 130993 | 130993 | 130993 | 130993 | 130993 |
| 130994 | 540 | 130994 | Santa Ana | 130994 | 130994 | 130994 | 130994 | 130994 | 130994 | 130994 | 130994 | 130994 | 130994 | 130994 |
| 130995 | 541 | 130995 | Santa Ana | 130995 | 130995 | 130995 | 130995 | 130995 | 130995 | 130995 | 130995 | 130995 | 130995 | 130995 |
| 130996 | 542 | 130996 | Santa Ana | 130996 | 130996 | 130996 | 130996 | 130996 | 130996 | 130996 | 130996 | 130996 | 130996 | 130996 |
| 130997 | 543 | 130997 | Santa Ana | 130997 | 130997 | 130997 | 130997 | 130997 | 130997 | 130997 | 130997 | 130997 | 130997 | 130997 |
| 130998 | 544 | 130998 | Santa Ana | 130998 | 130998 | 130998 | 130998 | 130998 | 130998 | 130998 | 130998 | 130998 | 130998 | 130998 |
| 130999 | 545 | 130999 | Santa Ana | 130999 | 130999 | 130999 | 130999 | 130999 | 130999 | 130999 | 130999 | 130999 | 130999 | 130999 |
| 131000 | 546 | 131000 | Santa Ana | 131000 | 131000 | 131000 | 131000 | 131000 | 131000 | 131000 | 131000 | 131000 | 131000 | 131000 |