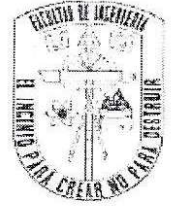




UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA



“Modelación de la cuenca hidrológica Bernal mediante el modelo SHETRAN”

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado

de Ingeniero Civil Presenta:

Rodrigo Sánchez Alaníz

Dirigido por:

Dr. Enrique González Sosa

SINODALES

Dr. Enrique González Sosa
Presidente

Dra.ª Mónica Cervantes Jiménez
Secretaria

M. en I. C. Javier Villa Alvarado
Vocal

Dra. N. Maricela Ramos Salinas
Suplente

M. en I. Pablo Talamantes Contreras
Suplente

Dr. Omar Chávez Alegría
Coordinador de Ingeniería Civil

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Dr. Manuel Toledano Ayala
Director de la Facultad

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Noviembre, 2018. México

RESUMEN

Los cambios de uso de suelo no son exclusivos los centros urbanos, sino también está presente en las zonas rurales, donde también impacta en la repartición de los componentes del balance hídrico. Por lo que es necesario evaluar los efectos de los cambios de uso de suelo en ambas situaciones. En el presente trabajo analiza la evolución hidrológica de la cuenca de la zona de Bernal, municipio perteneciente al estado de Querétaro, mediante el cambio de uso de suelo que presenta en un periodo de 26 años (1989 -2015). El análisis fue llevado a cabo con el modelo SHETRAN, el cual es un modelo de base física que permite desagregar los diferentes componentes del ciclo hidrológico, el cual integra la parte superficial y la subsuperficial dividiéndolos en una cuadrícula regular donde cada elemento puede tener propiedades diferentes. Los parámetros fueron determinados para las condiciones del año 2015 y fueron conservados para el año 1986. Los parámetros de cobertura utilizados en el modelo fueron obtenidos mediante la clasificación supervisada de imágenes satelitales de los años de 1986 y 2015. A diferencia de la zona urbana el suelo desnudo es el que más ha tenido impacto en los cambios de uso de suelo ya que ha habido un aumento del casi 15%, del que había en 1989. Los resultados de la modelación ayudaron a comprender los cambios en la repartición de los componentes del balance hídrico, como: de los años en la evapotranspiración, escurrimiento e infiltración debidos principalmente al cambio de uso de suelo de condiciones naturales a urbanización. Esto también permitió identifica cómo la urbanización afecta diferentes zonas en la cuenca, modifica el gasto máximo y aumenta el tiempo de concentración, en la capacidad de infiltración y en la conservación de la humedad en el ambiente. Por lo que, de seguir con la tendencia actual de un crecimiento desordenado puede modificar los escurrimientos y en consecuencia favorecer el riesgo de más inundaciones y pérdida de humedad del ambiente.

Palabras clave: cuenca de Bernal, modelo de base físico, balance hídrico, uso de suelo

AGRADECIMIENTOS

Como todo en la vida lo primero que se debe de hacer es agradecer a Dios por todas las oportunidades que nos pone delante de cada uno de nosotros, el aprovecharlas y sacar el máximo de ellas es tarea de cada uno, es por eso por lo que mi primer agradecimiento es hacia El quien me ha dado la oportunidad de realizar este trabajo y hacerlo de la mejor manera posible.

Quiero agradecer a CONACYT ya que fue un gran apoyo el que proporcionaron, no solo económico sino una gran motivación al formar parte de un proyecto grande y de un organismo tan importante como ha sido durante mucho tiempo.

Uno de mis pilares es mi familia a la que agradezco todo el apoyo que han mostrado durante estos 8 meses de redacción e incontables durante mis etapas de estudiante, mis padres quienes muestran un apoyo incondicional y siempre me impulsan a seguir adelante y superarme a mí mismo y mis hermanos quienes a través de nuestras pláticas y risas se ve el cariño y soporte que me brindan para no darme por vencido y cumplir todo lo que me proponga. También quiero agradecer a Fernanda quien siempre me hizo ir adelante y no rendirme, sus palabras de aliento y cariño fueron un gran motor.

Por último, pero no menos importante agradecer a mi director de tesis el Dr. Enrique Gonzáles Sosa quien nunca se rindió y continuo su apoyo incondicional ante cualquier duda que se presentara siempre teniendo claro el objetivo, lograr titularme, pero sobre todo aprender durante el camino. A la Dra. Mónica Jiménez quien aguantó todas mis dudas e inquietudes resolviéndolas de la mejor manera para continuar esta investigación.

Y por supuesto agradecer a esta institución quien me dio una oportunidad para mostrar mis aptitudes y habilidades siempre ofreciendo la mejor educación que se pueda otorgar

ÍNDICE

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	iii
TABLAS	v
FIGURAS	vi
INTRODUCCIÓN.....	1
I. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.	8
1.1 Hipótesis.....	8
1.2 Objetivo General	8
1.3 Objetivos particulares	9
II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	10
2.1 Estructura de SHETRAN (V 2.101)	10
2.2. Espectro electromagnético e imágenes satelitales	11
2.3 Módulo de evapotranspiración / interceptación (ET).....	13
2.4 La evapotranspiración.....	14
2.5 Interceptación de la precipitación	17
2.6 Módulo subsuperficial.	19
III. Metodología.....	20
3.1 Descripción de la zona de estudio.	20
3.2 Población.....	22
3.3 Imágenes satelitales.....	24
3.4 Proyección de las Imágenes	25
3.5 Recorte de las Imágenes Satelitales.....	29
3.6 NDVI	30
3.7 Segmentación	32
3.8 Parámetros de clasificación de vegetación.....	33
3.9 Clasificación del uso de suelo	34
3.10 Similitud entre píxeles.....	36
IV. SHETRAN	37
4.1 Parámetros de entrada Shetran.....	37

4.2 Vegetación	41
4.3 Suelo.....	41
4.4 Precipitación	42
V. Resultados.....	43
5.1 Año 2015.....	44
5.2 Año 1989.....	47
5.3. Comparación entre 1989 y 2015.....	50
5.4. Cambio de Uso de Suelo	53
VI. Conclusiones Y Recomendaciones.....	58
VII. Bibliografía	60

TABLAS

Tabla 1. Clasificación esquemática de los diferentes modelos según Willems (2000).....	4
Tabla 2. Tabla comparativa de modelos hidrológicos	6
Tabla 3: Bandas, espectros electromagnéticos.....	12
Tabla 4: Macros para proyectar imágenes.....	28
Tabla 5: Macros para recortar imágenes	29
Tabla 6: parámetros de suelo SHETRAN	34
Tabla 7: Vegetation	41
Tabla 8: Soils 1.....	41
Tabla 9: Soils 2.....	42
Tabla 10: Precipitación SHETRAN.....	42
Tabla 11. Resultados Shetran vs escurrimiento ideal año 1989 y 2015, así como comprobación de coeficiente escurrimiento anual.	52
Tabla 12: Porcentajes de cambio de uso de suelo 1989 vs 2015.....	54

FIGURAS

Figura 1. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos Refsgaard y Abbott (1996)	5
Figura 2. Diagrama esquemático de los componentes de SHETRAN.....	7
Figura 3. Cuenca Río Moctezuma	9
Figura 4. Principales componentes que intervienen en los conceptos de evapotranspiración e interceptación	14
Figura 5. Dependencia de la relación entre evaporación real y potencial en la tensión de humedad de suelo (Feddes et al, 1976).....	16
Figura 6: Modelo de Rutter esquematizado (R. Pérez Arellano et al. 2015)	17
Figura 7. Diagrama del modelo de transpiración.....	18
Figura 8. El modelo de procesos en el módulo del subsuelo.....	20
Figura 9: Ubicación de la cuenca Bernal perteneciente a la Cuenca Río Moctezuma con una altura de ojo de 1228.15km	21
Figura 10. Mapa de ubicación de la cuenca de Bernal en estudio. (Plano de localización respecto al país) con una altura de ojo de 47.45km.	21
Figura 11. Mapa poblacional del Municipio de Ezequiel montes (incluir cuenca de estudio)	23
Figura 12. Acercamiento a la localidad de Bernal.....	23
Figura 13: Imagen Landsat ETM5+ del 27/12/1989.....	26
Figura 14:Imagen Landsat ETM5+ del 22/05/2015.....	27
Figura 15: NDVI 2015 (22/05/2015).....	30
Figura 16: NDVI 1989 (27/12/1989).....	31
Figura 17: Segmentación 1989.....	32
Figura 18: Segmentación 2015.....	33
Figura 19: Clasificación 1989.....	35
Figura 20: Clasificación 2017.....	35
Figura 21: Uso de suelo 1989.....	36
Figura 22: Uso de suelo 2015.....	37
Figura 23: DEM en SHETRAN.....	39
Figura 24: Mask en SHETRAN 2015.....	39

Figura 25: Veg Map en SHETRAN 2015	40
Figura 26: SoilMap en SHETRAN 2015	40
Figura 27: Evaporación VS Precipitación 2015.....	45
Figura 28: Evaporación Acumulada VS Precipitación Acumulada 2015	46
Figura 29: Precipitación VS Evaporación 1989.....	48
Figura 30: Precipitación acumulada VS Evaporación acumulada 1989	49
Figura 31: Acumulados 1989 vs 2015	50
Figura 32: Ganancias y pérdidas 1989 vs 2015	53
Figura 34: Arable a Urbano	55
Figura 35 Matorral a Urbano	56
Figura 36: Cambio de uso de suelo a urbano 1989 a 2015 (simbología)	57

ACRÓNIMOS

LULC: Land Use, Land Cover

LANDSAT: Sistema de satélites

ArcGIS: Software en el campo de Sistemas de Información Geográfica

SUGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos

OLI: Operational Land Imager

TIRS: Thermal Infrared Sensor

IDRISI: Software en el campo de Sistemas de Información Geográfica

WGS 84: World Geodetic System 84

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

DEM: Modelo de elevación digital por sus siglas en inglés

INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

EXCEL: Software básico de Microsoft para el análisis y representación gráfica de datos.

SIGMAPLOT: software de análisis y representación gráfica de información avanzada

INTRODUCCIÓN

El crecimiento de la población y la migración hacia las áreas urbanas está cambiando el uso de suelo a lo largo de todo el mundo, y se espera que para el 2050 aproximadamente el 70% de la población mundial viva en áreas urbanas (Unfpa 2009). Esta expansión urbana inevitablemente conduce al desarrollo de áreas naturales o agrícolas sobre la periferia de centros urbanos (Mejía y Moglen, 2010), denominándolas áreas periurbanas. Las áreas periurbanas se refieren a zonas con una mezcla de áreas urbanas con tierras de cultivo y coberturas naturales. Las áreas urbanas y periurbanas tienen la característica de presentar diferentes tiempos de respuesta hidrológica, la pérdida de la cobertura permeable reduce la infiltración en el suelo, mientras que la introducción de drenaje artificial reemplaza los senderos naturales (Miller *et al.*, 2014). Esta combinación generalmente tiene efectos importantes en la respuesta hidrológica, tales como: una respuesta rápida, mayores magnitudes de flujo de ríos (Hawley y Bledsoe, 2011), mayor recurrencia de inundaciones (Braud *et al.*, 2013a), reducción del escurrimiento base y la recarga de acuíferos (Simmons y Reynolds, 1982). Debido a la necesidad de una buena comprensión de los efectos producidos por los cambios del uso de suelo para establecer políticas públicas y planes de desarrollo sustentables, es necesario llevar a cabo estudios para crear políticas públicas y planes de desarrollo científicamente soportados.

Si bien las cuencas hidrográficas se pueden clasificar, por su magnitud en “micro” (menos de 50km²), “meso” (de 50 a 20 000 km²) y “macro” (más de 20 000 km²). Si bien son arbitrarios los límites superior e inferior de estas tres categorías, la clasificación sirve para evaluar en el ámbito de una cuenca las repercusiones potenciales de las actividades humanas (como la agricultura, la explotación forestal, el pastoreo, etc.) en comparación con los efectos de los fenómenos naturales (como los movimientos geológicos o fenómenos meteorológicos extremos). La investigación revela que en las unidades de escala micro los efectos de las actividades humanas en los procesos de las cuencas tienden a ser mayores que los de los fenómenos naturales (Ives y Messerli, 1989).

La distribución espacial de la tierra es necesaria para el progreso humano, pero su urbanización genera cambios de uso de suelo que impactan en la degeneración de los ecosistemas no solo a nivel local y regional, sino también a nivel global (Mitsuda e Ito, 2011). Para asegurar la eficacia de las estrategias políticas es importante el entender cómo se encuentra actualmente la distribución espacial de los usos de suelo y como inciden en los cambios de uso de suelo, en el riesgo de inundaciones, tanto en zonas urbanas como periurbanas.

El uso de suelo / cobertura vegetal, conocido como Land Use / Land Cover (LULCⁱ) y los efectos del cambio climático provocan un impacto más significativo en los procesos de superficie e hidrológicos. Los Cambios en LULC de una cuenca hidrológica tendrán como resultado la alteración de la interceptación, infiltración y recarga de aguas subterráneas, que afectan significativamente el escurrimiento, así como el gasto base, alteración asociada directamente con la urbanización (White y Greer, 2006). La evaluación del impacto de LULC y los efectos del cambio climático en los recursos hídricos es un reto importante en las investigaciones hidrológicas, debido a que las condiciones de contorno modificadas y la parametrización de los modelos son complicadas. Dichas evaluaciones se hacen típicamente mediante la creación de un modelo de cuenca para el escenario actual. Después se establecen comparaciones temporales para establecer escenarios para poder tener una comparación y analizar las diferencias entre estas simulaciones.

Actualmente existen avances significativos en la valoración de inundaciones, tanto en la medición, clasificación, análisis remoto y en la predicción de áreas urbanas y periurbanas, así como con tecnologías de imágenes de alta y media resolución y con modelos de lluvia escurrimiento. Sin embargo, es fundamental seleccionar el modelo que pueda representar en forma pertinente la contribución de las zonas permeables e impermeables periurbanas, originadas por el cambio de uso de suelo. También la capacidad de predecir el comportamiento hidrológico y cómo ha evolucionado para ofrecer modelos adaptados a las pequeñas escalas temporales y espaciales típicas de las zonas urbanas y periurbanas. La capacidad de evaluar y modelar apropiadamente depende de la precisión con que se mide y se predice la lluvia, este requisito es incluso mayor para las ciudades (Braud et al, 2013a).

La base de la hidrología es la comprensión del ciclo hidrológico, de sus procesos e interrelaciones tanto superficiales como subterráneas, y para lograr esta comprensión como todo proceso implica la medición como herramienta. El tiempo nos ha ayudado a desarrollar herramientas para la modelación y medición de caudales

y precipitaciones, dejando a un lado y un poco rezagados los demás componentes del ciclo hidrológico que se presentan en la subsuperficie. Procesos como el de la infiltración son medidos de manera indirecta lo cual ocasiona una gran incertidumbre respecto a su lugar e impacto en el ciclo hidrológico.

Es por eso por lo que surgió la necesidad de los modelos hidrológicos para responder a la incertidumbre de los demás componentes del ciclo hidrológico, llegar a mejorar la comprensión de su funcionamiento y comportamiento. Los modelos hidrológicos se utilizan:

- Para una mejor comprensión de los componentes del ciclo hidrológico en una cuenca determinada.
- Como base para la modelación de otros procesos como calidad del agua, la erosión, entre otros
- Para simular condiciones futuras a partir de las actuales.

Modelar una cuenca implica la modelación hidrológica, es decir es la respuesta de la cuenca en el tiempo y en el espacio por lo que es necesario analizar y entender esta respuesta, y el modelo es un reflejo de ello. La capacidad predictiva va a depender de cómo se construye dicho modelo, la calidad de una predicción generalmente proviene de la calidad con la que comprendemos el sistema y el modelo que lo representa. Por lo mismo es que no existe el modelo perfecto que se puede aplicar a todas las cuencas ya que cada una tiene condiciones específicas de clima, geología, etc. que condicionan nuestro modelo.

Para poder comenzar a modelar es necesario primero que nada observar las características de la zona es decir conocer los principales procesos variables que intervienen como son las características del suelo, subsuelo y clima, como principales elementos que intervienen en la formación de escorrentía: evaporación, evapotranspiración, infiltración, humedad de suelo, flujo subterráneo, entre otros.

Una vez observados y reconocidos estos procesos, se deben relacionar con variables principales por medio de ecuaciones, si estas llegan a ser demasiado complejas como es el caso de las diferenciales, hay que simplificarlas para que sean procesadas por un sistema de cómputo.

Por último, es necesario calibrar los parámetros de nuestro modelo mediante valores que nos den como resultado lo más aproximado a los valores reales históricos y así poder ser validado.

Para seleccionar un modelo es fundamental conocer los datos que tenemos a nuestro alcance. Si tenemos escasos datos en un modelo complejo no nos ayudará en la predicción ya que será pobre también.

Es así como podemos definir que, para datos de baja resolución o pobres, es recomendable utilizar modelos poco complejos, y para datos de alta resolución o ricos, es recomendable utilizar modelos más complejos.

Actualmente contamos con una gran variedad de modelos y de formas para clasificarlos, sin embargo, podemos enfocarnos en 3 características claves para la modelación hidrológica:

1. De acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos; pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos. “caja negra”
2. De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos; pueden ser determinísticos o estocásticos. “Caja gris”
3. De acuerdo a su representación espacial; pueden ser agrupados o distribuidos. “Caja blanca”

Tabla 1. Clasificación esquemática de los diferentes modelos según Willems (2000).

Clasificación de modelos		
Modelos de base física detallados	Caja blanca	La mayoría de los parámetros de los modelos pueden ser medidos
Modelos conceptuales	Caja gris	Los parámetros del modelo necesitan calibración
Modelos empíricos	Caja negra	Incluso la estructura del modelo depende de las mediciones de las variables de salida
La base física de los modelos disminuye en orden decreciente		

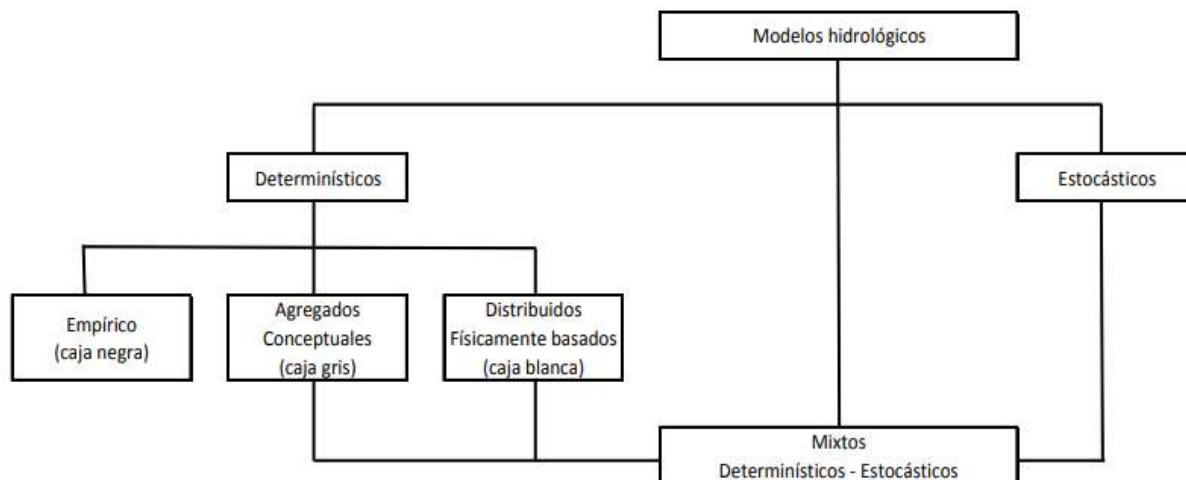


Figura 1. Clasificación de modelos hidrológicos de acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos Refsgaard y Abbott (1996)

Los modelos determinísticos suelen presentar tres tipos de elementos:

1. Variable de entrada; series espacio-temporales de precipitación, temperatura, etc.
2. Parámetros; parámetros asumidos constantes en el modelo, por ejemplo, la conductividad hidráulica, la velocidad de infiltración, etc.
3. Variables de estado; series espacio-temporales de humedad de suelo, etc., las cuales permiten establecer condiciones iniciales.

Asimismo, suele hablarse de variables de salidas, que usualmente son las descargas.

Tabla 2. Tabla comparativa de modelos hidrológicos

Modelo	Tipo de modelación	¿Qué modela?	Libre
ANSWER	Distribuido	El flujo superficial y el subsuelo	Si
TREX	Bidimensional	Escurrimiento, erosión, transporte de sedimentos y contaminantes	Si
TOPMODEL	Distribuido y Continuo	La dinámica de la zona saturada puede ser aproximada mediante una sucesión de estados estacionarios en un área drenada a un punto en la ladera	Si
ATHYS	Distribuido	Discretización espacial de la cuenca en celdas regulares cuadradas para la simulación de escurrimientos principalmente superficiales	Si
AQUA	Bidimensional	Simula el flujo superficial mediante técnicas numéricas	Si
SHE	Modular	La ase terrestre del ciclo hidrológico o cualquier fracción de la misma, la distribución espacial de los parámetros, las lluvias y la respuesta hidrológica es lograda horizontalmente mediante una grilla ortogonal y cada celda es representada mediante una columna con distintas capas horizontales	Si
JAMS	Modelación física modular	Intercepción y evapotranspiración, agua en el suelo, agua subterránea, tránsito lateral y tránsito en el cauce. La cuenca se representa como una serie de reservorios interconectados.	Si
SHETRAN	Físico, distribuido, determinístico, de superficie y subsuelo integrado	El flujo de agua, transporte de sedimentos y transporte de contaminantes a escala de cuenca	Si

En el caso de SHETRAN, es un modelo de base física, distribuido, determinístico, de superficie y subsuelo integrado, el cual simula el flujo de agua, el transporte de los sedimentos y el transporte de contaminantes en una cuenca (Ewen y Parkin, 2000).

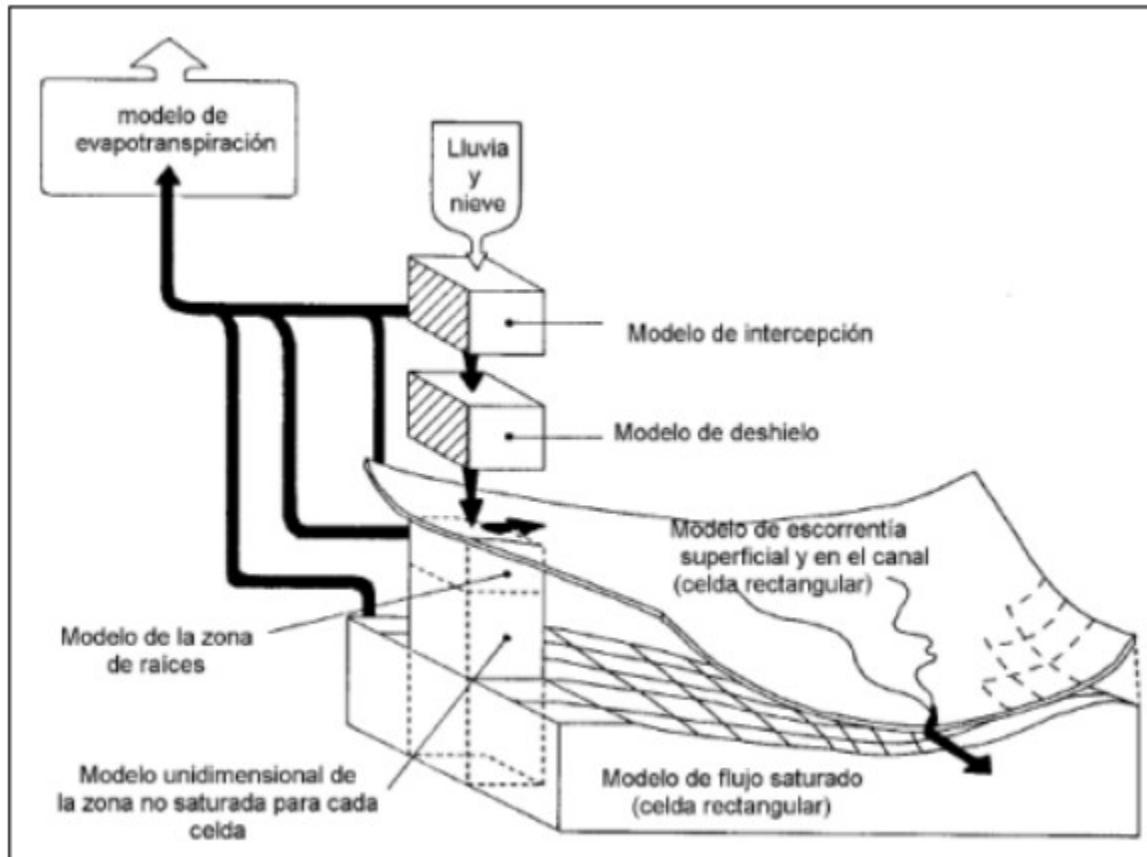


Figura 2. Diagrama esquemático de los componentes de SHETRAN.

SHETRAN simula toda la fase terrestre del ciclo hidrológico o cualquier fracción de la misma con una arquitectura modular. El intercambio de datos entre módulos, así como la coordinación de la ejecución simultánea de los mismos, que pueden tener pasos de tiempo independientes, es coordinado por un proceso central. La distribución espacial de los parámetros, las lluvias y las respuestas hidrológicas es lograda horizontalmente mediante una grilla ortogonal y verticalmente cada una de las celdas es representada mediante una columna con distintas capas horizontalmente.

Este modelo simula con un gran nivel de detalle los componentes del ciclo hidrológico, posee una fuerte base física, con lo cual los parámetros surgidos de la aplicación del mismo no requerirían calibración y

serían extrapolables a cuencas con características similares. La importancia de este tipo de modelo (SHETRAN) es relacionado para lugares en el mundo donde no se tengan datos medidos con una buena cantidad y calidad o en su caso que presente falta de datos (Villa et al., 2014).

En contexto, conociendo las diferencias respuestas hidrológicas debidas al cambio de suelo podremos abordar las cuestiones de como el continuo uso del suelo y los cambios climáticos pueden tener influencia en el ciclo hidrológico estacional y anual, esencialmente el riesgo de inundación. Y así mejorar la previsibilidad de las consecuencias hidrológicas de estos cambios que directamente influyen en la vida diaria de un gran número de la población aguas debajo de la cuenca. Por esto se requiere el conocimiento de cómo los recursos hídricos son afectados por los cambios de varios aspectos del ciclo hidrológico regional (Neupane y Kumar, 2015), principalmente el cambio de uso de suelo y cobertura vegetal simulando futuros escenarios.

I. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.

1.1 Hipótesis

Los cambios de usos de suelo también afectan las zonas semiáridas, donde la precipitación puede ser estacional o distribuida a lo largo del año. De igual manera la infiltración y la escorrentía en zonas áridas y semiáridas dependen de una serie de factores tales como la cobertura vegetal, la intensidad y duración de precipitación, la humedad del suelo, la pendiente, la forma del terreno, la evaporación, el tipo de suelo y roca y el uso de la tierra, es por esto la comparación de los cambios de uso del suelo deja ver cómo es que han cambiado los procesos hidrológicos (escorrentía, infiltración, precipitación, etc.).

1.2 Objetivo General

Investigar el impacto del cambio de uso de suelo a través de los años en la cuenca que denominaremos Bernal la cual pertenece a la cuenca Río Moctezuma según datos de la CONABIO. Investigar los procesos de superficie para tener una mejor visión de las razones de cambio de los procesos hidrológicos dentro de la cuenca de Bernal (Figura 3).

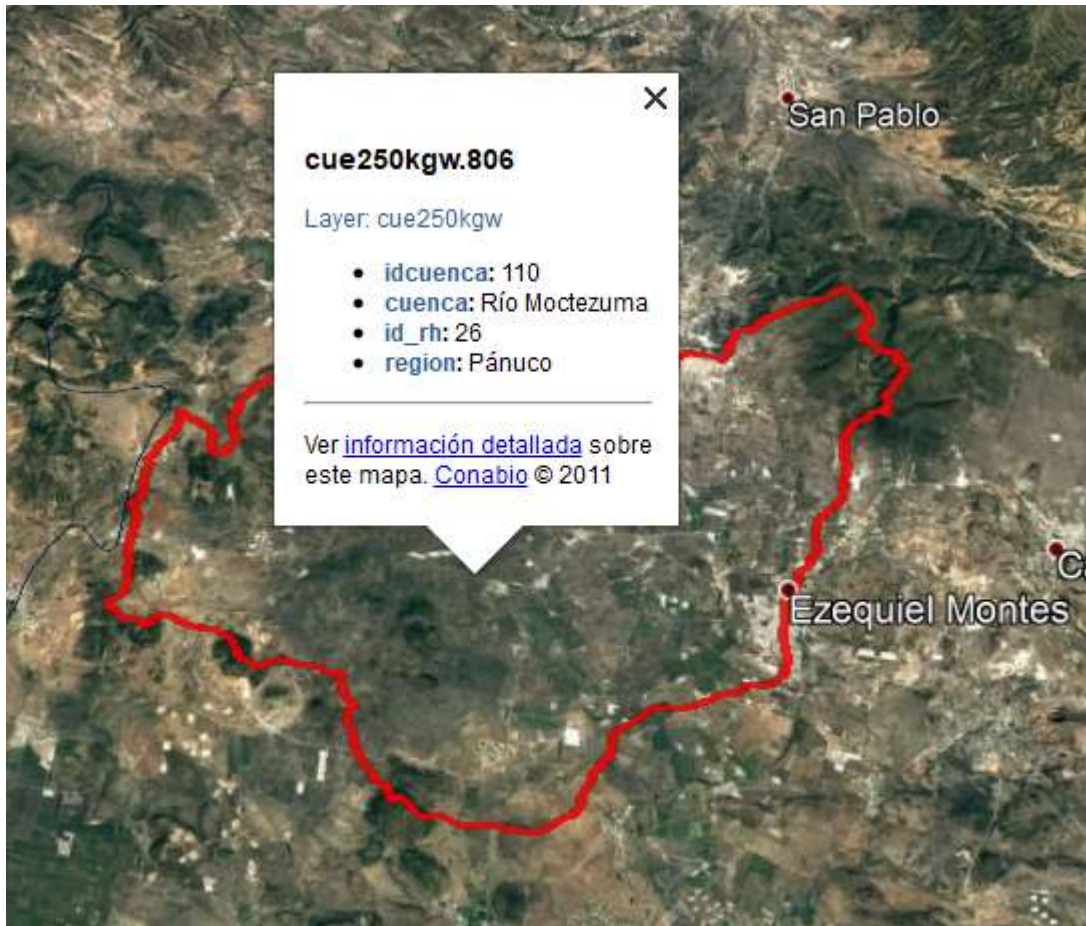


Figura 3. Cuenca Río Moctezuma tomada de Google Earth con la capa de cuencas del INEGI

1.3 Objetivos particulares

- Colectar datos de precipitación en la cuenca con la estación micro meteorológica que se encuentra en la zona de investigación Bernal para validar la modelación.
- Clasificar imágenes de satélite LANDSAT ⁱⁱ5 y 7 por medio del software ArcGIS ⁱⁱⁱpara medir la razón de cambio de uso de suelo de la cuenca en los últimos años.
- Clasificar el uso de suelo y vegetación de la cuenca de Bernal para medir la razón de cambio de uso de suelo de la cuenca en los últimos años.

- Caracterizar las condiciones biofísicas del sitio (geológicas, geomorfológicas, edafológicas y de vegetación) para obtener parámetros necesarios en la modelación.
- Modelar el escurrimiento de la cuenca con un modelo de base física espacialmente distribuido para modelar el escurrimiento de la cuenca.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

En este estudio se decidió utilizar el modelo SHETRAN porque es un modelo distribuido y de base física que enfatiza en los procesos hidrológicos superficiales, que permite simular y evaluar escenarios de los posibles impactos del manejo y cambio de uso de suelo o cobertura, con una interfaz gráfica para la representación de los resultados y además que los intervalos de tiempo puedan ir desde 1 minuto hasta días, la representación está dividida en nodos donde cada uno puede tener diferentes propiedades hidráulicas. Otro aspecto importante es que el modelo es de libre acceso y es un referente nacional para la modelación hidrológica en el Reino Unido.

2.1 Estructura de SHETRAN (V 2.101)

SHETRAN tiene un diseño modular, en el cual cada módulo o componente es usado para representar los diferentes procesos físicos del ciclo hidrológico dentro del espacio o en cada parte de la cuenca, así como del transporte de sedimentos o el transporte de contaminantes.

Las variables de entrada o forcing (en inglés) del modelo son: la precipitación (P), evaporación de referencia medida o calculada (ETR), la precipitación neta que llega a la superficie es calculada tomando en cuenta la intercepción (EI) y la evaporación debido a la intercepción del dosel de la vegetación. Las tasas reales de evapotranspiración se calculan en función de las condiciones dinámicas de la humedad del suelo. Se calculan las tasas de evaporación de la vegetación, del suelo y los cuerpos de agua.

La infiltración es evaluada ya sea de la precipitación neta o el escurrimiento de las aguas superficiales. La distribución del contenido de humedad del suelo en la zona no saturada, igualmente la tensión en la zona no saturada y la recarga a la zona saturada. Los flujos de la zona saturada se calculan para un acuífero

anisotrópico, libre y heterogéneo. El cambio de flujo entre el acuífero y las corrientes se calculan, con o sin revestimiento de canales de baja permeabilidad.

El agua superficial se genera por el exceso de infiltración o por el exceso en los mecanismos de saturación (respuesta Hortoniana), y fluye hacia el canal como flujo superficial. El confinamiento de los escurrimientos se lleva a cabo a través de la red de canales, SHETRAN no es un modelo hidráulico detallado del comportamiento del flujo del canal.

Procesos modelados de SHETRAN

- Intercepción de lluvia por el dosel de la vegetación (Modelo de Rutter).
- Evaporación, agua superficial y agua en canales; transpiración de agua extraída por las raíces (ecuación de Penman-Monteith o la relación entre evapotranspiración real y potencial en función de la tensión de humedad del suelo).
- Desarrollo de la capa de nieve y el deshielo (métodos basados en la temperatura del agua o métodos supuestos de energía).
- Flujo en una dirección en la zona no saturada (ecuación de Richards).
- Flujo en dos direcciones en la zona saturada (ecuación de Bussinesq).
- Flujo superficial en dos direcciones, flujo en canales en una dirección (ecuaciones de Saint Venant).
- Zona saturada en interacción con canales, incluyendo una tolerancia para la zona no saturada debajo del canal.
- Interacción entre la zona saturada y el agua superficial.

2.2. Espectro electromagnético e imágenes satelitales

El espectro electromagnético es la distribución energética que tienen las ondas electromagnéticas en función de su frecuencia o longitud. Cuando nos referimos a un objeto el espectro es la radiación electromagnética que emite o absorbe una sustancia.

Dicho espectro se extiende desde las bajas frecuencias utilizadas en cosas convencionales como la radio hasta algo tan complejo como los rayos Gamma. Los espectroscopios nos permiten visualizar dicho espectro además de permitir realizar medidas como son de la longitud de onda, la frecuencia y la intensidad de radiación.

Para facilitar de alguna manera el estudio de los espectros electromagnéticos estos se dividen en bandas por más inexacta que pueda llegar a ser es una herramienta para poder clasificar y utilizarlas en investigaciones.

Tabla 3. Bandas, espectros electromagnéticos Tomada de la página https://es.wikipedia.org/wiki/Espectro_electromagn%C3%A9tico

Banda	Longitud de onda (m)	Frecuencia (Hz)	Energía (J)
Rayos gamma	$< 10 \times 10^{-12} \text{m}$	$> 30,0 \times 10^{18} \text{Hz}$	$> 20 \cdot 10^{-15} \text{ J}$
Rayos X	$< 10 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 30,0 \times 10^{15} \text{Hz}$	$> 20 \cdot 10^{-18} \text{ J}$
Ultravioleta extremo	$< 200 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 1,5 \times 10^{15} \text{Hz}$	$> 993 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Ultravioleta cercano	$< 380 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 7,89 \times 10^{14} \text{Hz}$	$> 523 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Espectro Visible	$< 780 \times 10^{-9} \text{m}$	$> 384 \times 10^{12} \text{Hz}$	$> 255 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo cercano	$< 2,5 \times 10^{-6} \text{m}$	$> 120 \times 10^{12} \text{Hz}$	$> 79 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo medio	$< 50 \times 10^{-6} \text{m}$	$> 6,00 \times 10^{12} \text{Hz}$	$> 4 \cdot 10^{-21} \text{ J}$
Infrarrojo lejano/submilimétrico	$< 1 \times 10^{-3} \text{m}$	$> 300 \times 10^9 \text{Hz}$	$> 200 \cdot 10^{-24} \text{ J}$
Microondas	$< 10^{-2} \text{m}$	$> 3 \times 10^8 \text{Hz}^{\text{n. 1}}$	$> 2 \cdot 10^{-24} \text{ J}$
Ultra Alta Frecuencia-Radio	$< 1 \text{ m}$	$> 300 \times 10^6 \text{Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-26} \text{ J}$
Muy Alta Frecuencia-Radio	$< 10 \text{ m}$	$> 30 \times 10^6 \text{Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-28} \text{ J}$
Onda Corta - Radio	$< 180 \text{ m}$	$> 1,7 \times 10^6 \text{Hz}$	$> 11,22 \cdot 10^{-28} \text{ J}$
Onda Media - Radio	$< 650 \text{ m}$	$> 650 \times 10^3 \text{Hz}$	$> 42,9 \cdot 10^{-29} \text{ J}$
Onda Larga - Radio	$< 10 \times 10^3 \text{m}$	$> 30 \times 10^3 \text{Hz}$	$> 19,8 \cdot 10^{-30} \text{ J}$
Muy Baja Frecuencia - Radio	$> 10 \times 10^3 \text{m}$	$< 30 \times 10^3 \text{Hz}$	$< 19,8 \cdot 10^{-30} \text{ J}$

Es de crucial importancia conocer los espectros electromagnéticos ya que nos permiten aislar elementos visuales en imágenes satélites y de esta manera lograr una clasificación del uso de suelo lo más cercana posible a la realidad. Esto se logra jugando con dichos espectros formando una combinación para

lograr los resultados visuales deseados. Para realizar esto es necesario conocer un poco más de las imágenes satelitales.

Una imagen satelital es una representación visual de los datos reflejados por la superficie de la tierra que captura un sensor montado en un satélite artificial. Los datos son enviados a una estación en tierra donde se procesan y se convierten en imágenes, favoreciendo así nuestro conocimiento de las características de la Tierra en diferentes escalas espaciales.

Los satélites de observación de la Tierra obtienen datos en el menor tiempo posible para dar seguimiento a la evolución de un fenómeno. El avance de las imágenes satelitales nos ha acercado a información a la que nunca habíamos tenido acceso anteriormente y sobre todo en un tiempo muy corto entre que se obtiene la información del satélite y cuando llega a la Tierra.

Cada vez tenemos imágenes de mayor resolución, con mayor cantidad de bandas en el espectro electromagnético y mayor disponibilidad para los usuarios, lo que amplía su potencial de aprovechamiento para fines diversos.

Las imágenes utilizadas en esta investigación fueron obtenidas por el Servicio Geológico de los Estados Unidos por sus siglas en inglés USGS ^{iv}la cual es una agencia científica del gobierno de los Estados Unidos conformada por científicos que estudian el terreno y los recursos naturales.

2.3 Módulo de evapotranspiración / intercepción (ET)

Ahora vamos a hablar de cómo es que obtenemos con este módulo la evapotranspiración de la vegetación, el suelo y superficies de agua libre, la evaporación del dosel, la evaporación del suelo desnudo, la evaporación de una superficie completamente libre de agua, la transpiración de las plantas, la absorción de las mismas, el almacenamiento del dosel, el drenaje de este y la precipitación bajo el mismo.

El modelo incluye también las aportaciones dadas por el deshielo sin embargo nuestra temperatura está siempre por encima de los 0 °C por lo que ignoramos cualquier presencia de hielo.

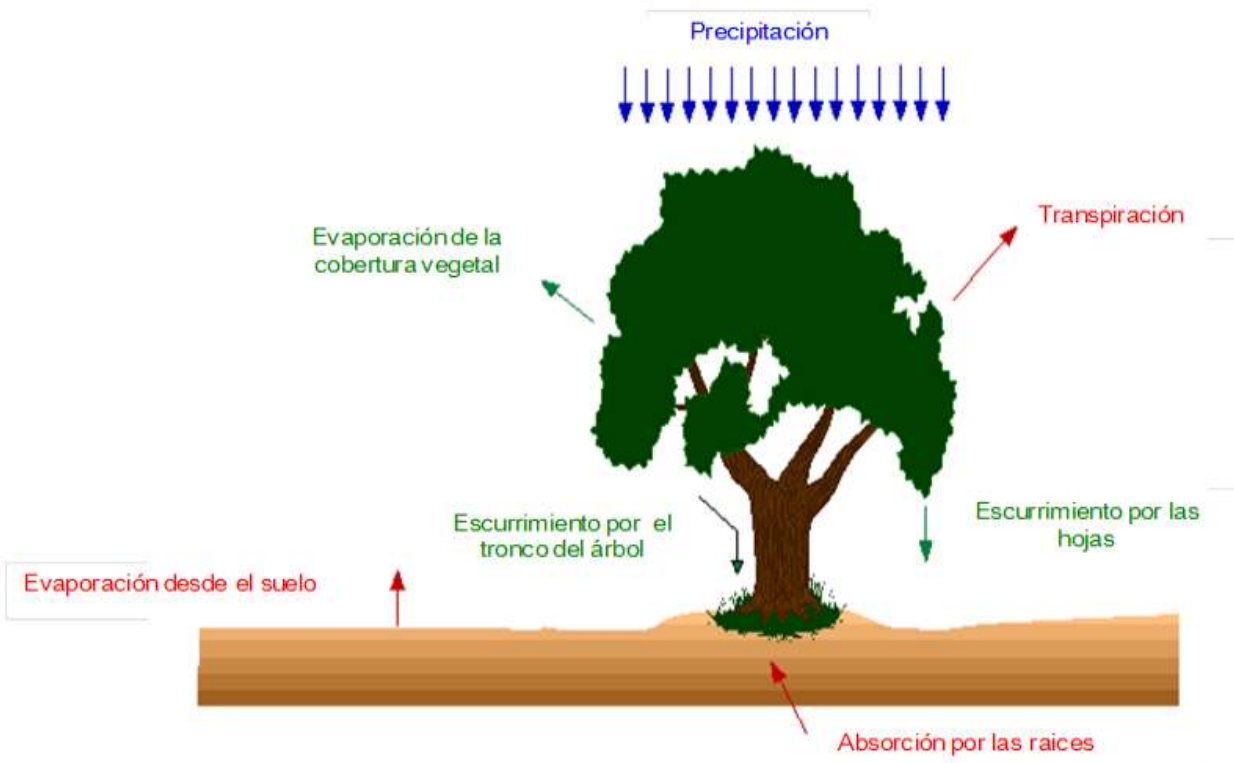


Figura 4. Principales componentes que intervienen en los conceptos de evapotranspiración e interceptación

2.4 La evapotranspiración

Es el total de agua convertido en vapor por una cobertura vegetal; incluye la evaporación del agua interceptada y la transpiración por las estomas de las hojas o en pocas palabras el dosel.

La evapotranspiración es la combinación de dos procesos separados que originan pérdida de agua:

- Evaporación
- Transpiración

El modelo que utilizamos calcula esta evapotranspiración y la convierte en una pérdida que señala la absorción de agua por las raíces de las plantas y su transpiración para condiciones parcialmente húmedas y húmedas en su totalidad. Esta pérdida es utilizada por el módulo de subsuelo para calcular cambios de humedad del suelo

Se calculan tanto la evapotranspiración potencial como la actual. Cuando nos referimos a la evapotranspiración potencial hablamos de un escenario donde el suministro de agua a una planta con un dosel seco es ilimitado. Se calcula con la ecuación de balance de energía de Penman (Penman, 1984).

$$E_p = \frac{\Delta R_n + \rho C_p (\delta_e) / r_a}{\lambda (\Delta + \gamma)} \quad (1)$$

donde E_p es la evapotranspiración potencial; R_n radiación neta; Δ pendiente de la curva de presión de vapor; ρ densidad del aire; C_p calor específico del aire húmedo; δ_e déficit de presión de vapor en el aire; r_a resistencia aerodinámica; λ calor latente de vaporización y γ constante psicrométrica.

$$\gamma = \frac{P C_p}{\sigma \lambda} \quad (2)$$

P presión atmosférica; σ relación de la densidad del vapor de agua y densidad del aire (aproximadamente 0.622).

En SHETRAN se deben de utilizar dos enfoques para poder lograr una buena adaptación a las condiciones locales del sitio en cuestión. En el primero, la evapotranspiración actual y la tasa subpotencial están limitadas por factores de vegetación, en particular la resistencia dentro de la planta al paso de agua. El segundo enfoque se centra en la limitación del movimiento de agua condicionando la resistencia del suelo no saturado

Considerando el primer enfoque, Monteith (1965) modificó la ecuación de Penman (1) para predecir la evapotranspiración potencial incluyendo un factor que representa la resistencia al movimiento de agua en el cuerpo superficial de la planta o superficie de evaporación.

La ecuación usada en el modelo es:

$$E_a = \frac{\Delta R_n + \rho C_p (\delta_e) / r_a}{\lambda (\Delta + \gamma (1 + r_c / r_a))} \quad (3)$$

donde; E_a evapotranspiración actual y r_c resistencia de la cubierta.

Para el segundo enfoque, fue Feddes (et al. 1976) quien propuso un enfoque simplificado en el que las complejidades del sistema suelo, planta, atmósfera están representadas por la siguiente analogía: en condiciones más secas, en el punto de marchitamiento ψ_w y más húmedo que algún punto anaeróbico ψ_s (donde ψ = tensión de humedad del suelo), las plantas no absorben agua del suelo así que la evapotranspiración real es cero. Entre ψ_s y alguna presión arbitraria ψ_t en el que el agua del suelo comienza a limitar el crecimiento de la planta, la absorción de agua es considerada como la tasa potencial, es decir, la evapotranspiración real es igual a la potencial calculada por la ecuación (1)

Se supone que evapotranspiración real varía linealmente como una proporción de la evapotranspiración potencial de acuerdo con la tensión de humedad del suelo ψ . (Figura 5).



Figura 5. Dependencia de la relación entre evaporación real y potencial en la tensión de humedad de suelo (Feddes et al, 1976).

La relación entre la evapotranspiración potencial y real y la tensión del suelo se especifica en SHETRAN en forma tabular E_a / E_p contra ψ , lo que permite una relación más funcional y flexible que la que se muestra en la figura anterior.

2.5 Intercepción de la precipitación

En SHETRAN el módulo de la intercepción nos proporciona la precipitación neta del suelo al sumar la precipitación del dosel, la cantidad de agua almacenada en el dosel y la evaporación desde el mismo dosel dejando de lado solamente la nieve o el goteo de niebla.

Se considera el modelo de Rutter et al. (1971) el cual representa el proceso de intercepción mediante un balance de agua, de tal forma que hay una entrada de lluvia, un posterior almacenamiento y una salida final en forma de drenaje y evaporación (Figura 6). Las intensidades de la salida final es decir del drenaje y la evaporación dependen de la cantidad de agua almacenada en el dosel, que varía a lo largo de todo el evento, y se estiman a partir de variables y parámetros tanto meteorológicos como de la cantidad de flora o masa forestal.

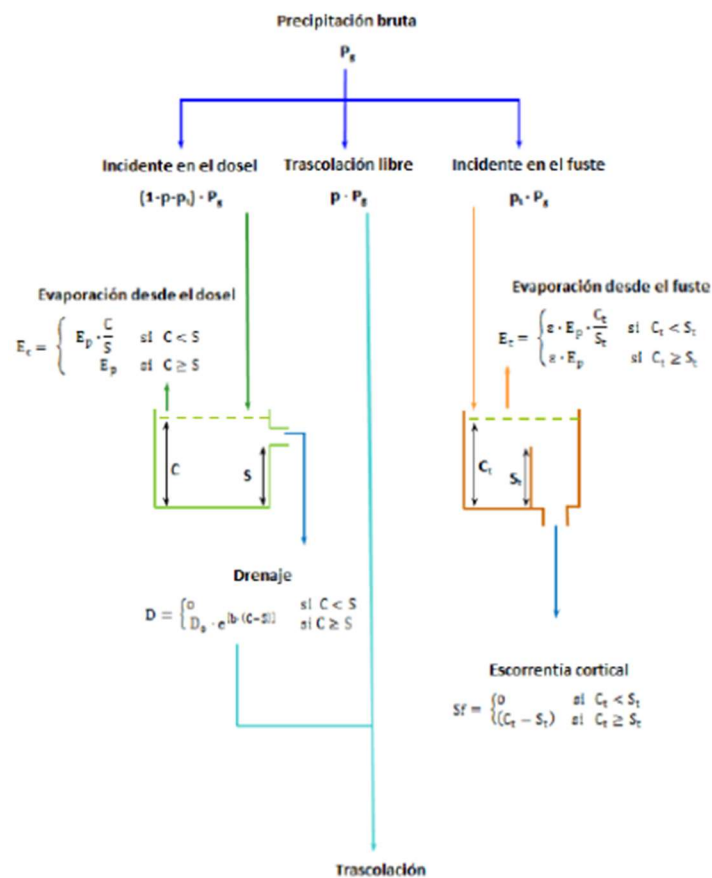


Figura 6. Modelo de Rutter esquematizado (R. Pérez Arellano et al. 2015)

La lluvia interceptada depende de la parte proporcional de tierra que está oculta por la vegetación viéndola en planta, esta varía según la temporada de crecimiento de la vegetación.

Las ecuaciones en el módulo ET son evaluadas en secuencia, para cada elemento en la cuenca (no hay interacción entre elementos, flujo unidimensional). La secuencia de cálculo es la siguiente:

1. Inicia con el módulo de deshielo, si es requerido.
2. Cálculo de evapotranspiración potencial.
3. Cálculo de la evaporación interceptada y almacenada, almacenamiento de dosel y drenaje desde el dosel.
4. Cálculo de la precipitación neta, siendo la que cae directamente sobre el suelo además de la que escurre del dosel, ponderado en función de la proporción de terreno cubierto de vegetación.
5. Se calcula la pérdida de humedad de suelo, en la zona radical de cada pixel, basada en uno de los métodos opcionales para calcular evapotranspiración actual. Suma las pérdidas de todos los pixeles para determinar la transpiración total. La Figura 7 da una representación esquemática del modelo de la transpiración.
6. Se calcula la evaporación de la superficie del suelo.
- 7.

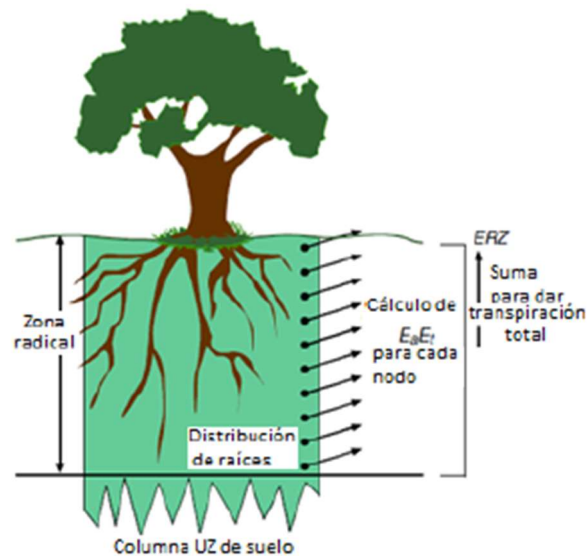


Figura 7. Diagrama del modelo de transpiración.

2.6 Módulo subsuperficial.

El modelado de procesos en el módulo del subsuelo saturado se puede ver en la Figura 8. Una especificación funcional descriptiva para el modelo es la siguiente:

El modelo simula el flujo completamente tridimensional en saturado y no saturado. El flujo a través de múltiples capas de medios porosos de diferentes características puede ser simulado; las capas pueden ser lateralmente extensa, discontinua, o de extensión lateral limitada (por ejemplo, lentes de arcilla).

Pueden ser representados acuíferos confinados, semi-confinados y acuíferos libres. O pueden representarse las aguas subterráneas que sobreponen encima de las lentes de baja permeabilidad.

Las condiciones de frontera son inferiores: a) un flujo prescrito (variable en el tiempo) en el modelo, o b) un drenaje de flujo libre fuera del modelo. El valor predeterminado es una condición de frontera de falta de caudal.

Condiciones de contorno son: a) Carga constante en el tiempo, o b) de flujo variable en el tiempo, para cada capa. El valor predeterminado es una condición de frontera de falta de caudal.

Las condiciones de frontera superiores son: a) una carga constante, cuando el agua de superficie estancada está presente, o b) una condición de frontera de tipo mixto, cuando no hay agua presente en la superficie, y hay precipitación y evaporación en la superficie del suelo. Los flujos evaporativos se calculan en el módulo de evapotranspiración / interceptación, y son una función del potencial de presión. El modelo cambia automáticamente entre dos tipos de condición de frontera.

Las condiciones de frontera en el fondo del canal son idénticas a los de la superficie de suelo (incluso con flujo constante, cuando la corriente de agua está presente, o un flujo que representa la precipitación y evaporación, cuando el canal es seco).

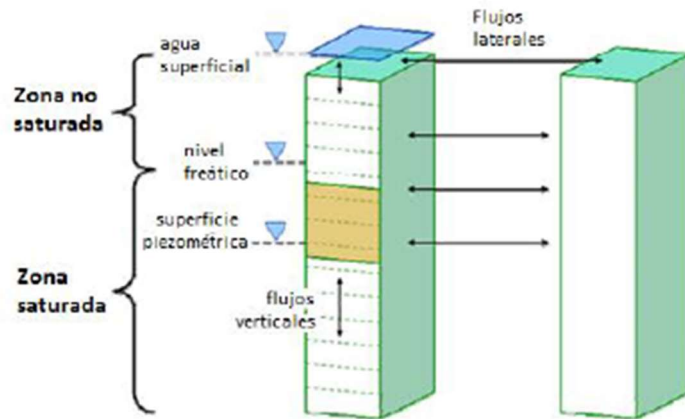


Figura 8. El modelo de procesos en el módulo del subsuelo.

III. Metodología

3.1 Descripción de la zona de estudio.

Para el estudio en cuestión se eligió la cuenca de Bernal la cual ha tenido un crecimiento considerable en cuanto a urbanización se refiere y a su vez se prestó para una clasificación de cobertura vegetal precisa. Según la clasificación mencionada nuestra cuenca es una meso cuenca ya que cuenta con un área de 236.27795km².

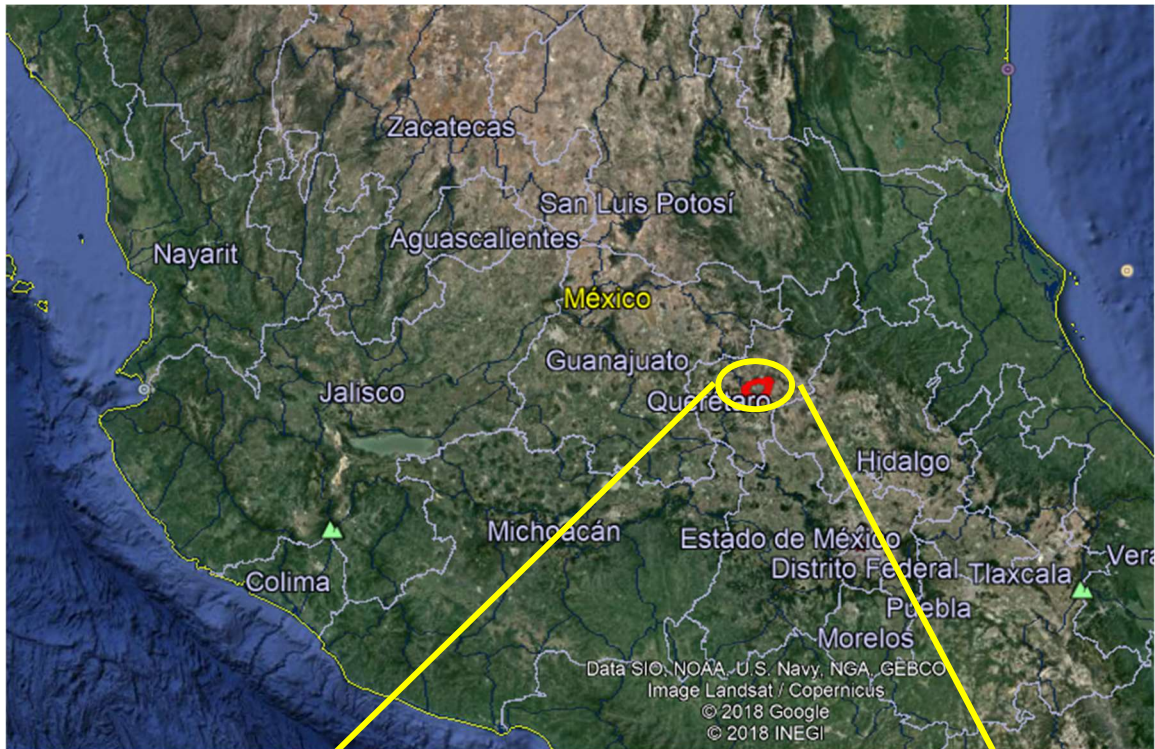


Figura 9: Ubicación de la cuenca Bernal perteneciente a la Cuenca Río Moctezuma con una altura de ojo de 1228.15km tomada desde Google Earth Pro

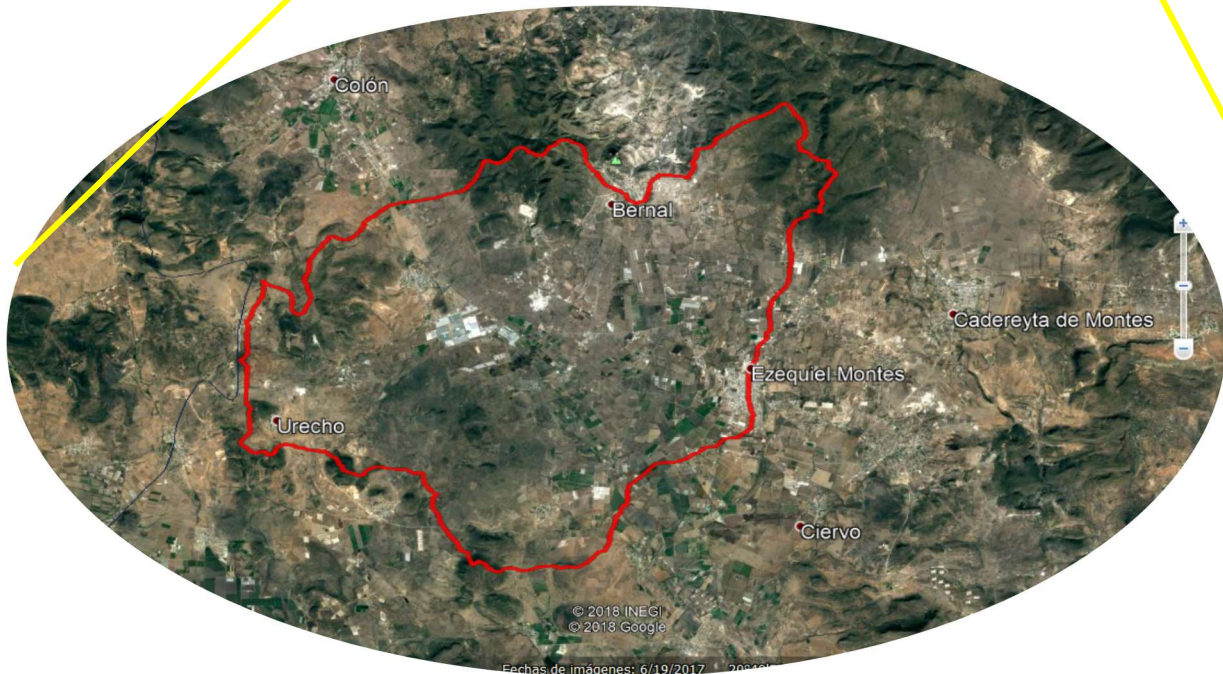


Figura 10. Mapa de ubicación de la cuenca de Bernal en estudio. (Plano de localización respecto al país) con una altura de ojo de 47.45km. Tomada de Google Earth Pro

3.2 Población

Para poder conocer mejor la cuenca de Bernal que está en estudio es necesario conocer la localidad a la que pertenece, la población que tiene, a que se dedica la gente y de esta manera lograremos comprender el desarrollo urbano que ha tenido y de esta forma el impacto que se genera a la cuenca en cuestión.

Bernal pertenece al municipio de Ezequiel Montes que cuenta con una población total de 38, 123 habitantes datos del INEGI en el 2010 de los cuales 3, 965 habitantes pertenecen a la localidad de Bernal, donde 1, 919 son hombres y 2, 064 habitantes son mujeres y cuentan con 1, 001 viviendas particulares habitadas, observando los datos de porcentaje de habitantes menores de 15 años o más analfabetas, sin primaria completa, viviendas particulares habitadas sin excusado, sin energía eléctrica, sin agua entubada, ocupantes por cuarto en viviendas particulares habitadas, viviendas particulares habitadas con piso de tierra y viviendas particulares habitadas que no disponen de refrigerador obtenemos un grado de marginación medio y un grado de rezago social muy bajo.

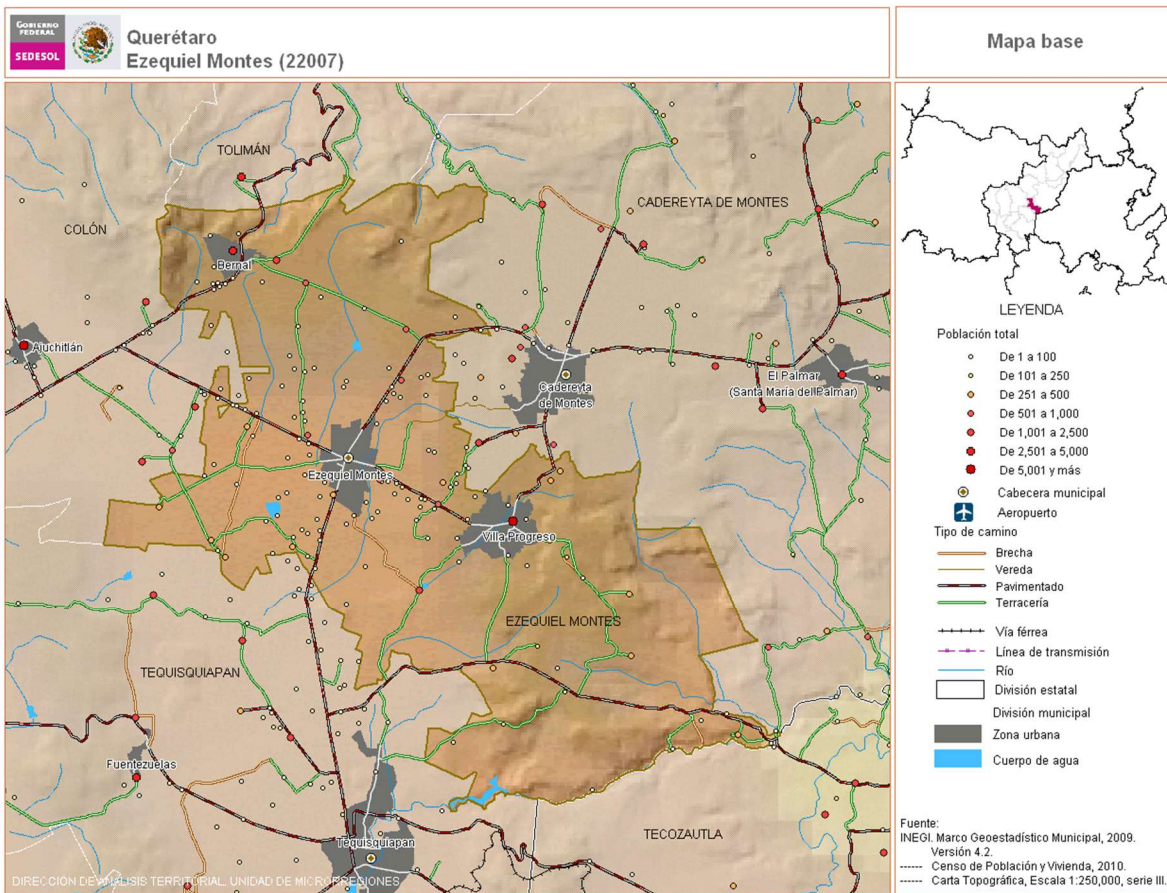


Figura 11. Mapa poblacional del Municipio de Ezequiel Montes tomada de la página del INEGI

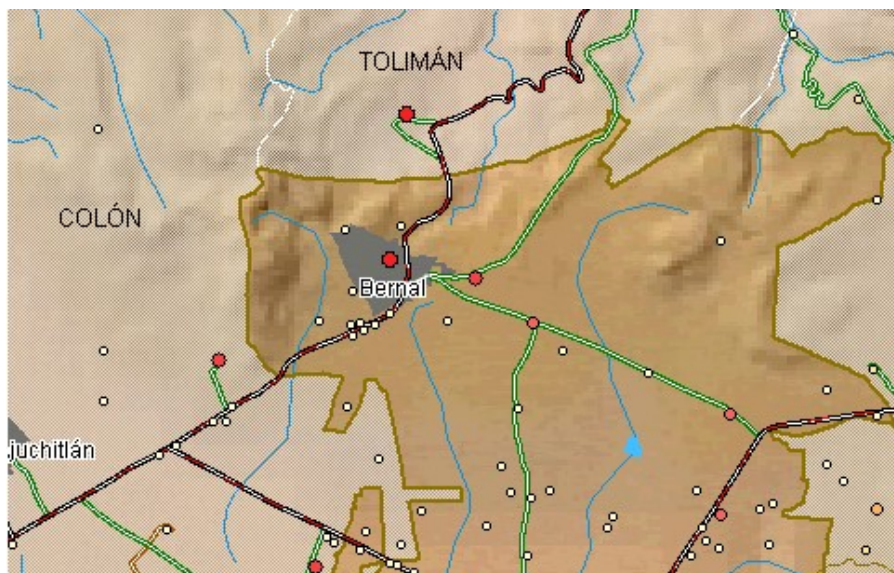


Figura 12. Acercamiento a la localidad de Bernal de la imagen tomada de la página del INEGI

En Bernal como en todas las localidades, la urbanización desordenada incrementa la heterogeneidad de las propiedades hidrológicas de la tierra y la fragmentación de la superficie que agota los recursos naturales y el abastecimiento del agua. Teniendo repercusiones en los tiempos de concentración, disminución en las infiltraciones e incremento de la escorrentía superficial. La regulación de la propagación de las regiones metropolitanas y las zonas urbanas crea un nuevo paradigma acerca de los cambios de uso de suelo y la comprensión de las relaciones de los procesos hidrológicos generados en y por cuencas periurbanas. Debido a que los asentamientos alrededor de las grandes ciudades producen cambios en las cuencas periurbanas es crucial y necesaria la comprensión de su evolución, para el correcto manejo de los recursos hídricos y la planeación de uso de suelo en las regiones altamente pobladas.

La comprensión de las cuencas periurbanas es un elemento clave para el control de inundaciones, la gestión de los recursos hídricos, contaminación y medio ambiente alrededor de las grandes ciudades. Identificar el grado de cambio que se tiene en los procesos alrededor de las grandes ciudades. Identificar el grado de cambio que se tiene en los procesos y la repartición de los componentes del balance hídrico, así como los cambios de uso de suelo puede ser la respuesta para identificar y mejorar la comprensión de las principales alteraciones que sufren los componentes de los procesos hidrológicos que han sido alterados por las actividades humanas (Pickett et al., 1997).

3.3 Imágenes satelitales.

La clasificación de la cobertura vegetal se realizó con imágenes satelitales de diversos periodos y de varios años, a fin de identificar los cambios de uso de suelo. Fueron las imágenes satelitales de LANDSAT 8 descargadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) las cuales proveen una resolución de 15m, útil para identificar las áreas urbanas y periurbanas con densidad de la población moderada.

LANDSAT captura imágenes desde el año 1972 hasta la actualidad, para el caso de LANDSAT 8 incorpora dos instrumentos de barrido: Operational Land Imager (OLI^v), y un sensor térmico infrarrojo llamado Thermal Infrared Sensor (TIRS^{vi}). Las imágenes LANDSAT 8 obtenidas por el sensor (OLI) y (TIRS) constan de nueve bandas espectrales con una resolución de 30 metros para las bandas 1 a 7 y 9. Una

banda nueva (1) (azul profundo) es útil para estudios costeros. La nueva banda (9) es útil para la detección de cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Dos bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas más precisas de la superficie y se toman a 100 metros de resolución. El tamaño aproximado es de 170 kilómetros de norte a sur por 183 kilómetros de este a oeste.

Para efectos del presente estudio se llevó a cabo la utilización de cartografía de LANDSAT comprendida *en un periodo de 28 años, y la combinación* de bandas utilizadas fueron las siguientes:

- 1,2,3 Color Natural
- 2,3,4 Falso Color

3.4 Proyección de las Imágenes

Para la clasificación de uso de suelo se utilizó el software IDRISI ^{vii}(Clark Labs) donde se manipularon las imágenes de satélite LANDSAT ETM7+ y LandSat ETM5+ cuya resolución original era de 30X30 pixeles, 7811 columnas X 6981 filas y cuyas fechas datan de 27/12/1989 y del 22/05/2015 teniendo así un periodo de cambio de 28 años.



Figura 13: Imagen Landsat ETM5+ del 27/12/1989



Figura 14. Imagen Landsat ETM5+ del 22/05/2015

Ya que descargamos las imágenes había que proyectarlas ya que vienen en un sistema de coordenadas diferente al que requerimos y en el cual manejaremos toda la información, las imágenes originales son descargadas en el sistema de coordenadas WGS 84^{viii} (World Geodetic System 84) el cual es un sistema de coordenadas geográfico mundial que consiste en un patrón matemático de tres dimensiones que representa a la tierra por medio de un elipsoide, un cuerpo geométrico más regular que la Tierra, se expresan las coordenadas en grados, minutos y segundos y se proyectan en metros para facilitar sus cálculos. Las imágenes se proyectaron a la proyección conforme cónica de Lambert, la cual superpone un cono sobre la Tierra con dos paralelos de referencia secantes al globo, esto minimiza la distorsión proveniente de proyectar una superficie tridimensional a una bidimensional.

Esta proyección se realizó en IDRISI (Clark Labs) con el comando Project, cabe mencionar que se deben de proyectar todas las Bandas que nos incluye cada imagen satelital por lo que se utilizó la función macros dentro del software quedando de la siguiente manera:

Tabla 4. Macros para proyectar imágenes

Project	x	1	*	B1_17.rst	*	utm-14n	*	B1_17ccl.rst	*	mex27ccl	*	2558548	*	2791798	*	795795	*	1033395	*	7775	*	7920	*	0	*	1
Project	x	1	*	B2_17.rst	*	utm-14n	*	B2_17ccl.rst	*	mex27ccl	*	2558548	*	2791798	*	795795	*	1033395	*	7775	*	7920	*	0	*	1
Project	x	1	*	B3_17.rst	*	utm-14n	*	B3_17ccl.rst	*	mex27ccl	*	2558548	*	2791798	*	795795	*	1033395	*	7775	*	7920	*	0	*	1
Project	x	1	*	B4_17.rst	*	utm-14n	*	B4_17ccl.rst	*	mex27ccl	*	2558548	*	2791798	*	795795	*	1033395	*	7775	*	7920	*	0	*	1
Project	x	1	*	B5_17.rst	*	utm-14n	*	B5_17ccl.rst	*	mex27ccl	*	2558548	*	2791798	*	795795	*	1033395	*	7775	*	7920	*	0	*	1
Project	x	1	*	B6_17.rst	*	utm-14n	*	B6_17ccl.rst	*	mex27ccl	*	2558548	*	2791798	*	795795	*	1033395	*	7775	*	7920	*	0	*	1
Project	x	1	*	B7_17.rst	*	utm-14n	*	B7_17ccl.rst	*	mex27ccl	*	2558548	*	2791798	*	795795	*	1033395	*	7775	*	7920	*	0	*	1
Project	x	1	*	B8_17.rst	*	utm-14n	*	B8_17ccl.rst	*	mex27ccl	*	2558548	*	2791798	*	795795	*	1033395	*	7775	*	7920	*	0	*	1

- 1era columna: la función que se va a ejecutar
- 2da columna: se coloca una “x” para indicar que estamos corriendo un macro
- 3era columna: se coloca un 1 ya que estamos trabajando con un raster y no un vector
- 4ta columna: el nombre del archivo que tenemos en IDRISI que queremos proyectar
- 5ta columna: el nombre de la coordenada geográfica de origen
- 6ta columna: el nombre del archivo de salida que llevara ahora.
- 7ma columna: el nombre de la coordenada geográfica de salida.
- 8va columna: el valor mínimo de X
- 9na columna: el valor máximo de X
- 10ma columna: el valor mínimo de Y
- 11era columna: el valor máximo de Y
- 12da columna: número de columnas de la imagen de salida
- 13era columna: el número de filas de la imagen de salida
- 14ta columna: valor usado para áreas de fondo en donde se coloca un cero “0”
- 15ta columna: el resamplado de la imagen en donde colocamos un 1 para decir que queremos que obtenga dichos valores de la imagen vecina en vez de bilineal

De esta manera se tienen proyectadas todas las bandas para las imágenes de ambos años, de 1989 y de 2015.

3.5 Recorte de las Imágenes Satelitales

Una vez proyectadas las imágenes es necesario cortarlas para poder hacer que coincidan con nuestras imágenes de precipitación que obtuvimos de la estación hidrometeorológica con la cual se pudo estudiar la distribución espacial de la precipitación por eventos, el tamaño de las imágenes originales proyectadas es de 30X30 pixeles y de 7811 columnas X 6981 filas.

Para cortarlas de la misma manera se utilizó en IDRISI la función macros, pero ahora del módulo Window, el cual nos otorga la imagen origen recortada a un número de columnas y filas igual a la imagen que nosotros escojamos en este caso el de la precipitación y quedó de la siguiente manera:

Tabla 5. Macros para recortar imágenes

window	x	B1_17ccl.rst	*	B1_17C_	*	3	*	1980_1ccl
window	x	B2_17ccl.rst	*	B2_17C_	*	3	*	1980_1ccl
window	x	B3_17ccl.rst	*	B3_17C_	*	3	*	1980_1ccl
window	x	B4_17ccl.rst	*	B4_17C_	*	3	*	1980_1ccl
window	x	B5_17ccl.rst	*	B5_17C_	*	3	*	1980_1ccl
window	x	B6_17ccl.rst	*	B6_17C_	*	3	*	1980_1ccl
window	x	B7_17ccl.rst	*	B7_17C_	*	3	*	1980_1ccl
window	x	B8_17ccl.rst	*	B8_17C_	*	3	*	1980_1ccl

- 1era columna: función a ejecutar
- 2da columna: se coloca la “x” para indicar que estamos corriendo un macro
- 3era columna el nombre de la imagen de entrada
- 4ta columna: el nombre de la imagen de salida
- 5ta columna: se pone un 3 para indicar que se utilizará una imagen de referencia para realizar el recorte
- 6ta columna: nombre de la imagen de referencia para realizar el recorte

De esta manera se tienen recortadas las imágenes con los mismos parámetros que las imágenes de la precipitación quedando de 30X30 pixeles y de 1000 columnas X 833 filas.

3.6 NDVI

Como parámetro de las condiciones de la vegetación obtuvimos el NDVI ^{ix}(Normalized Difference Vegetation Index) por sus siglas en ingles es el índice de vegetación de diferencia normalizada el cual se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base a la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja.

Para el cálculo de los índices de vegetación es necesaria la información que se encuentra en las bandas roja e infrarroja de ese espectro electromagnético. El NDVI se calcula mediante la diferencia entre la reflectancia de las bandas 4 y 5 dividido por la suma de estas dos mismas bandas de reflectancia.

Para obtener dicho parámetro fue directamente con el software IDRISI donde se utiliza el comando VegIndex y seleccionamos la casilla del NDVI y colocamos la banda roja y la infrarroja y el nombre de salida que queremos para cada imagen:

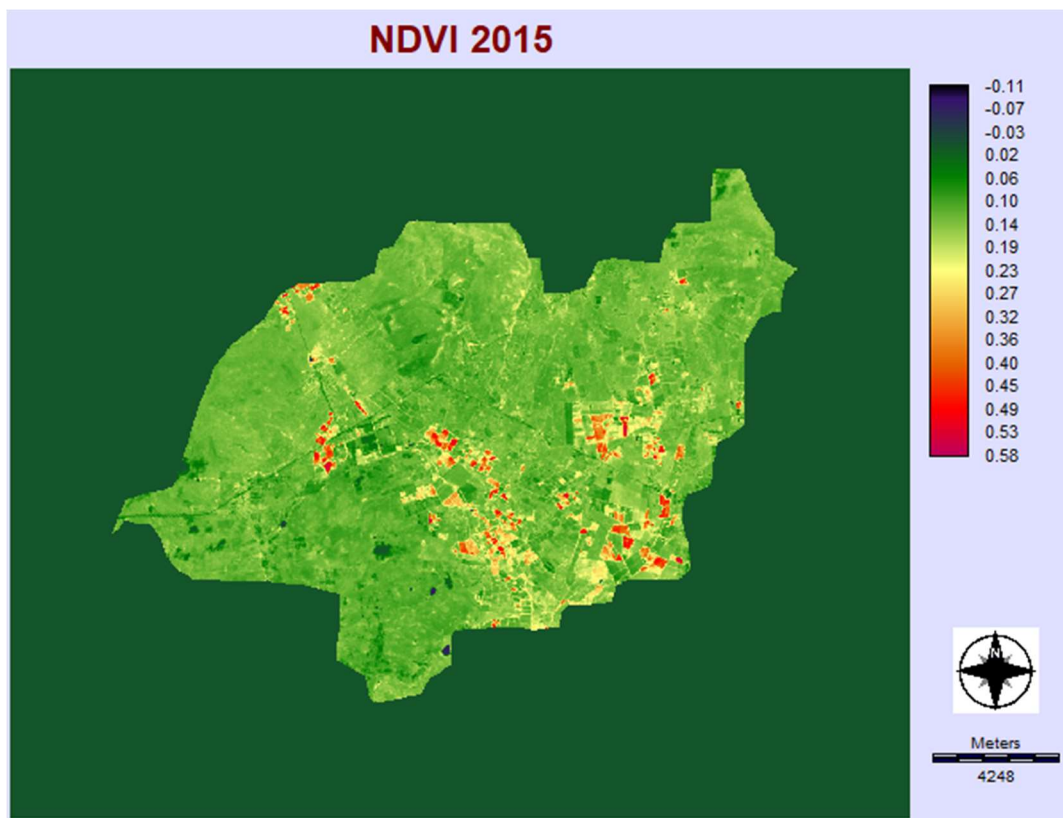


Figura 15. NDVI 2015 (22/05/2015)

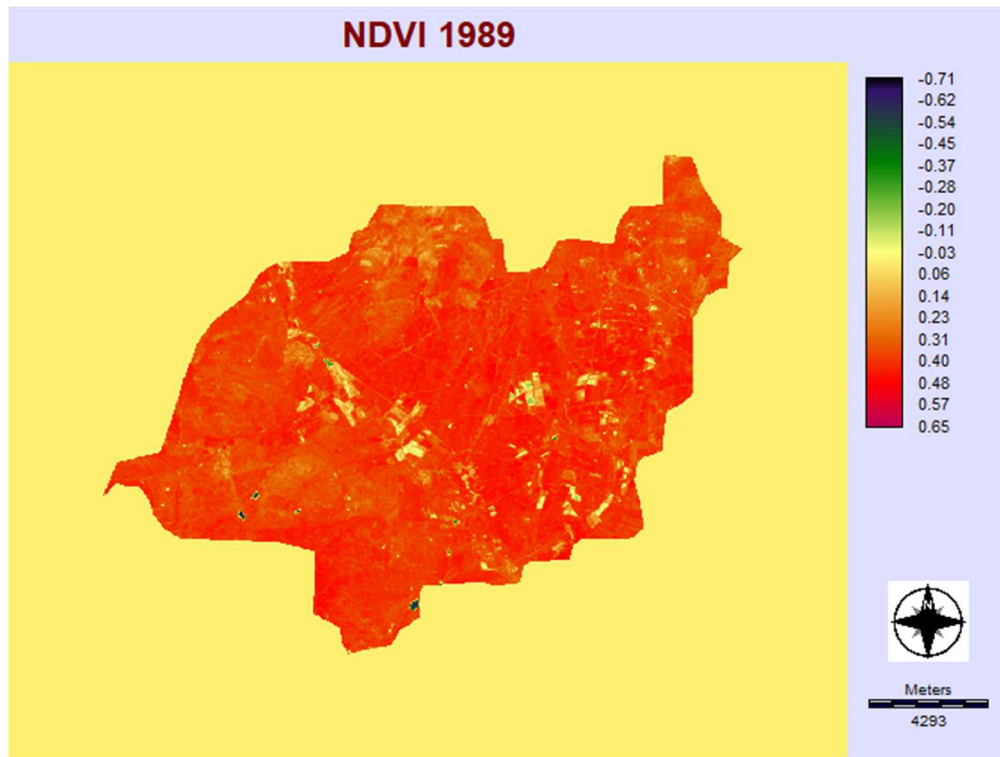


Figura 16. NDVI 1989 (27/12/1989)

Al observar ambas imágenes encontramos un estimado del cambio de uso de suelo en base a este parámetro exclusivamente, ya que sin analizar las imágenes satelitales en su totalidad y solamente interactuando con el espectro electromagnético y la radiación de ambas imágenes podemos darnos una idea del cambio entre ambas.

En el caso de 1989 cuya imagen esta en matices de rojos, la parte urbana es la parte más clara que se encuentra en el rango de -0.20 a -0.03 con un color verdoso amarillento, se puede apreciar en la imagen como una pequeña porción comparado con lo demás rojo fuerte anaranjado que equivale a las zonas de vegetación sin poder desglosar más en este concepto.

Para la imagen del 2015, lo urbano esta entre los rangos altos de color con valores entre 0.27 y 0.58 siendo lo demás en matices de verde lo correspondiente a la zona de vegetación de la cuenca, otra vez sin poder desglosar más en este tema.

3.7 Segmentación

La segmentación agrupa píxeles adyacentes en segmentos de imagen de acuerdo con su similitud espectral. La segmentación emplea un enfoque de delineación de cuencas para dividir las imágenes de entrada en función de su varianza.

En el software IDRISI se utilizó el comando Segmentation donde se agregan el número de bandas a utilizar, en este caso utilizamos todas las georreferenciadas y recortadas más el NDVI de cada año y utilizamos una tolerancia de similitud de 30 para obtener las siguientes imágenes:

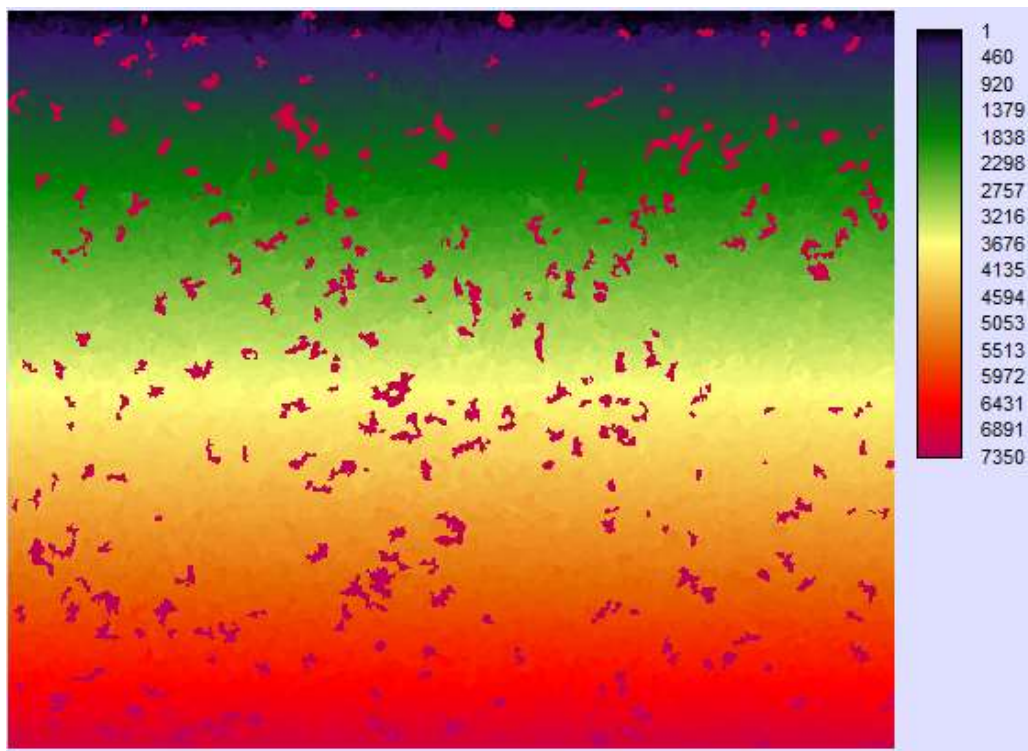


Figura 17. Segmentación 1989 Captura de pantalla de IDRISI al usar el módulo segmentation

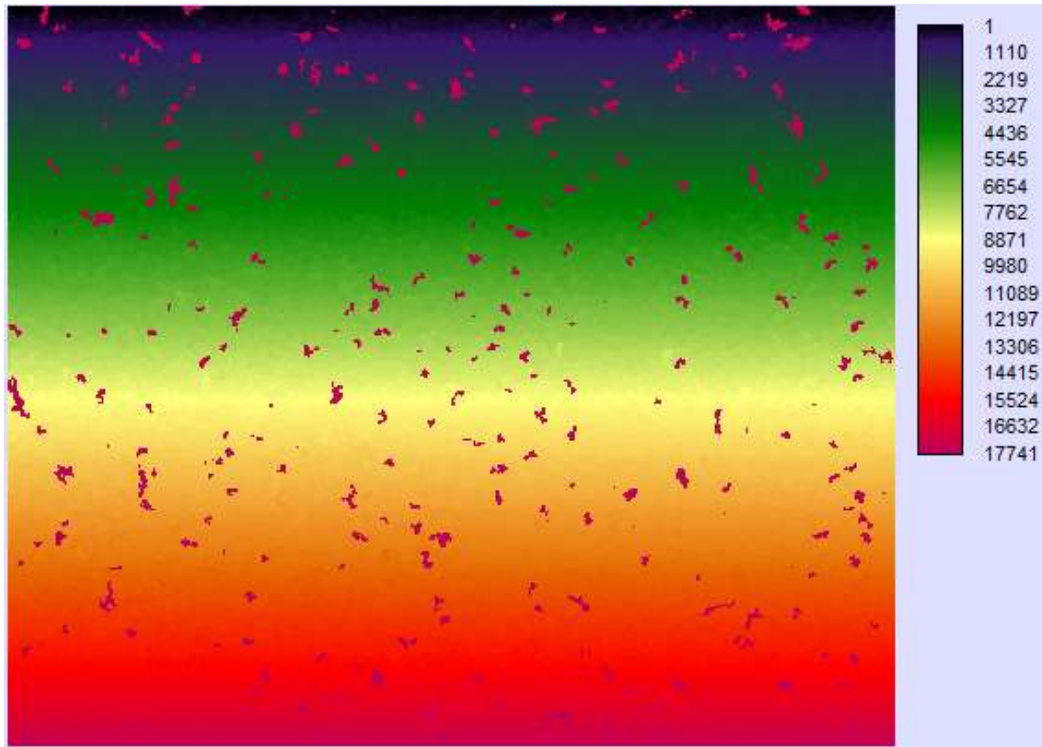


Figura 18. Segmentación 2015 Captura de pantalla de IDRISI al usar el módulo segmentation

3.8 Parámetros de clasificación de vegetación

Para poder clasificar las imágenes de LANDSAT es necesario establecer los parámetros de vegetación a utilizar los cuales están regidos por el programa SHETRAN que solo incluye un número limitado de tipos de vegetación:

- Suelo desnudo
- Arable
- Pasto
- Bosque caducifolio
- Bosque siempre verde
- Arbusto
- Urbano

Una vez conociendo los tipos de vegetación que ofrece el programa procedemos a clasificar nuestro suelo según dichos parámetros

Tabla 6. parámetros de suelo SHETRAN

Vegetation Type	Canopy Storage Capacity (mm)	leaf area Index	maximum rooting depth (m)	AE/PE at field Capacity
Grass	1.5	1	1	0.6
Urban	0.1	0.1	0.1	0.5
bare ground	0	0	0	0
shrub	1.5	1.5	1.5	0.75

Nota: Grass corresponde a pasto verde, Urban corresponde a suelo de uso urbano, bare ground corresponde a suelo desnudo y shrub corresponde a matorrales.

Estos son los tipos de suelo que buscamos en nuestras imágenes y que procedimos a clasificar tanto para el año 1989 y el 2015

3.9 Clasificación del uso de suelo

Para clasificar el suelo utilizamos el software IDRISI nuevamente con el comando SegTrain el cual crea archivos de entrenamiento y de firma a partir del archivo de segmentación que creamos previamente. Con este módulo podemos crear firmas interactivamente y asignar nombres de clases e ID directamente desde el archivo de segmentación. Los resultados se pueden utilizar como entrada en cualquiera de los clasificadores de píxeles.

Necesitamos el archivo de segmentación, así como la imagen que creamos de las bandas del LANDSAT para facilitar la identificación de ciertos tipos de suelo. Con ayuda de Google Earth comenzamos a identificar cada uno de los tipos de suelo en nuestras imágenes cabe aclarar que mientras más segmentos clasifiquemos es más precisa la clasificación de los píxeles.

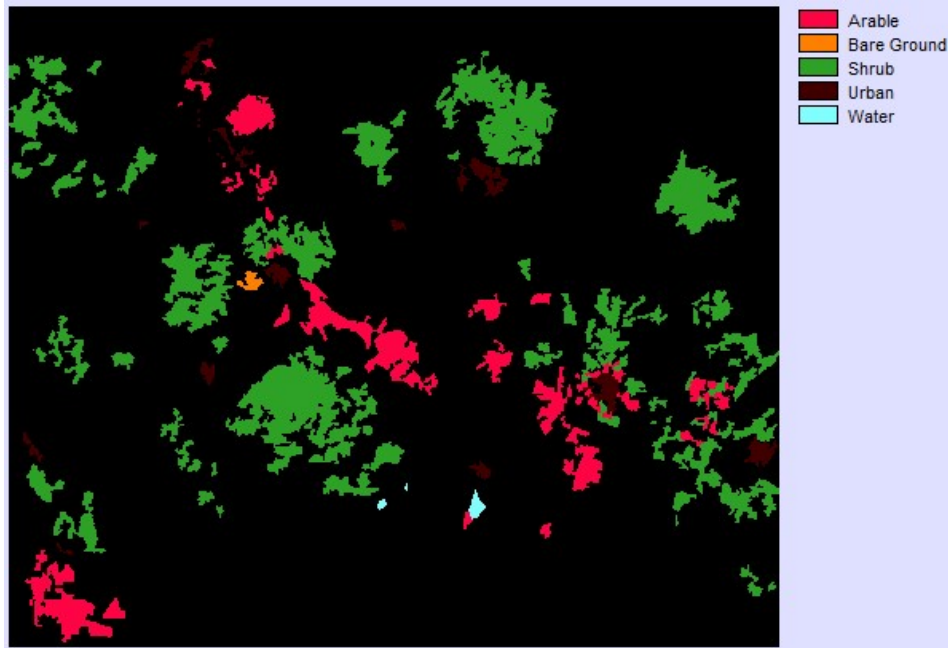


Figura 19. Clasificación 1989. Captura de pantalla de IDRISI al usar el módulo SegTrain

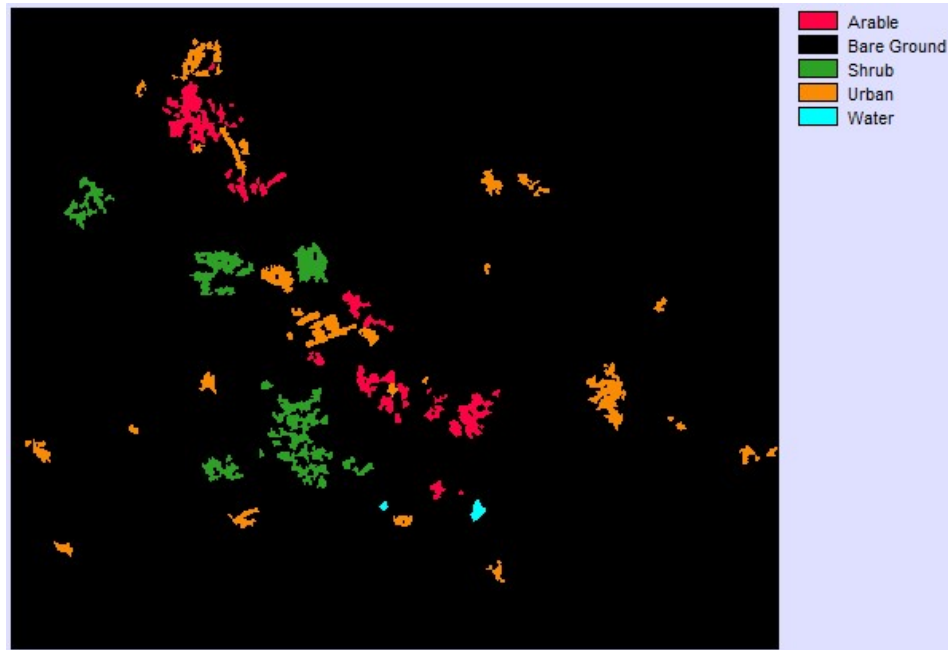


Figura 20. Clasificación 2017. Captura de pantalla de IDRISI al usar el módulo SegTrain

3.10 Similitud entre pixeles.

Para encontrar la similitud entre todos los pixeles de cada imagen con los seleccionados utilizamos el módulo de MaxLike en IDRISI:

MaxLike también es conocido como un clasificador Bayesiano ya que tiene la capacidad de incorporar conocimiento previo usando el Teorema de Bayes. El conocimiento previo se expresa como una probabilidad previa de que exista cada clase. Se puede especificar como un valor único aplicable a todos los pixeles, o como una imagen que expresa diferentes probabilidades previas para cada pixel.

En el módulo ingresamos la firma de clasificación que creamos y el programa clasificará los pixeles con similitudes suficientes para ser clasificados como iguales a los pixeles que clasificamos manualmente y así generar el uso de suelo de dicha imagen para cada año.

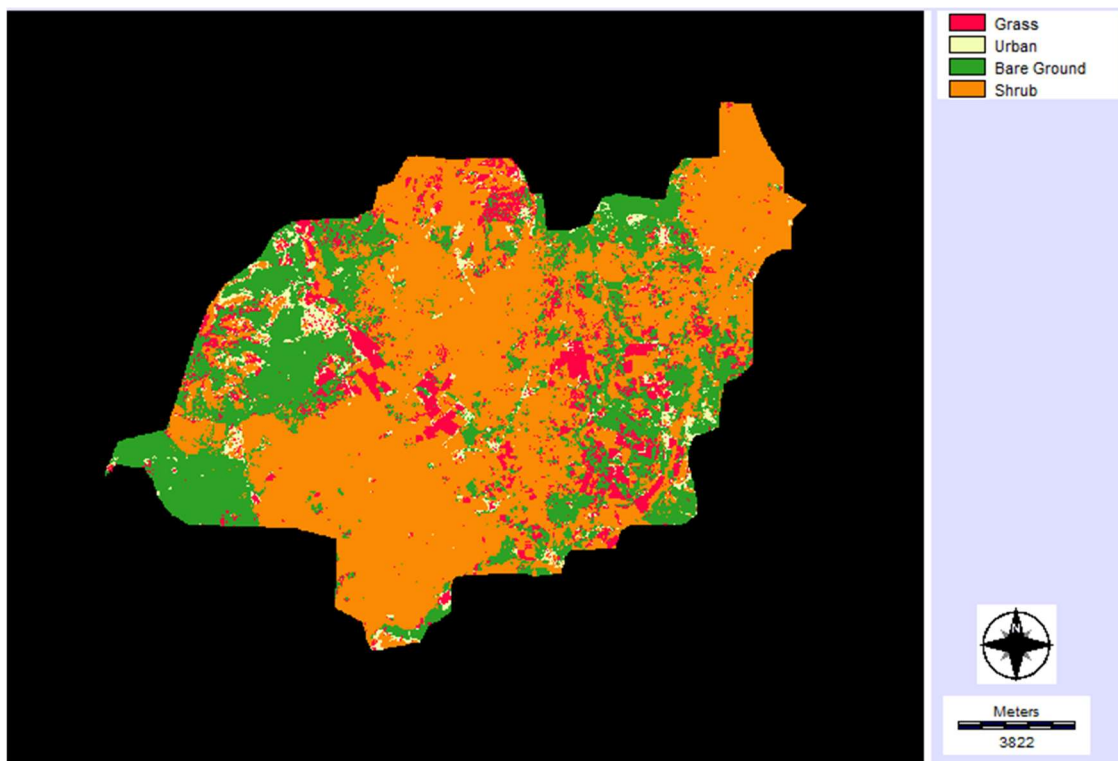


Figura 21. Uso de suelo 1989

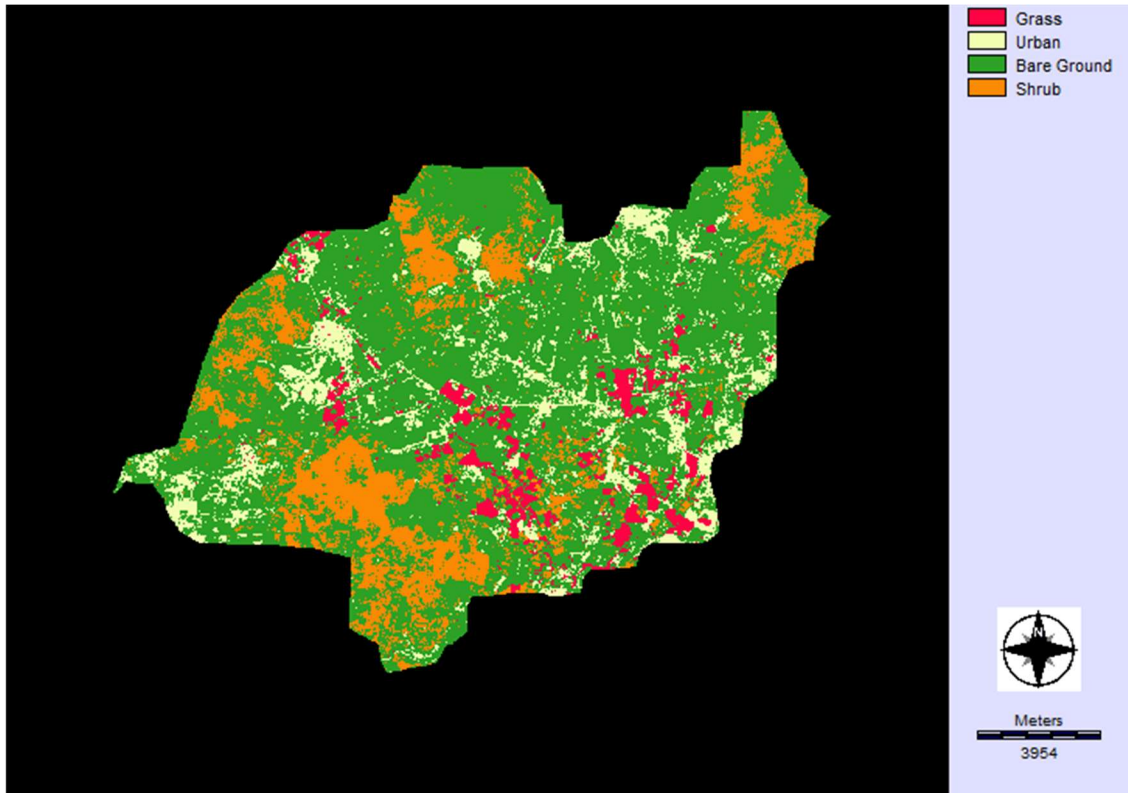


Figura 22. Uso de suelo 2015

IV. SHETRAN

4.1 Parámetros de entrada Shetran

Shetran tiene una metodología que presenta ciertas dificultades operacionales, sin embargo, resulta sencilla y eficiente. Viéndolo en un comparativo de pros y contras podemos clasificar como algo adverso la limitante que tiene este modelo ya que solo permite una cantidad limitada de píxeles para analizar haciendo un estudio muy general, así como la vegetación está limitada por los escasos grupos clasificatorios de uso de suelo. Hablando de ventajas del modelo encontramos el hecho de que es muy sencillo de utilizar y lo que requiere lo hace de manera muy concreta para entregar resultados que de igual manera son específicos.

Para poder ingresar al programa, correrlo y obtener resultados se requieren de 4 archivos fundamentales que serán ingresados en el formato especificado para su correcto funcionamiento estos son:

- DEM ^xModelo de elevaciones digital se obtuvo mediante el sitio oficial de INEGI ^{xi}sin embargo la imagen tenía una resolución de 3639 columnas X 3145 filas y se resampleó a un tamaño de 30 columnas X 25 filas ya que SHETRAN (VERSION 2.101) no admite un tamaño mayor, por último, se realizó un corte para obtenerlo con el mismo tamaño y forma que la cuenca a estudiar (máscara de la cuenca).
- Mask la cual es la máscara de la cuenca que analizaremos: Para la máscara de la cuenca se utilizó el software ArcMap, se obtuvo el parteaguas mediante el modelo de elevaciones y utilizando el software IDRISI se resampleó y ajusto a los parámetros de inicio que solicita SHETRAN, es decir: 30X25
- VegMap el cual es la imagen de la cuenca la cual clasificamos con el uso de suelo: El mapa de vegetación es aquel que se obtuvo mediante la clasificación de usos de suelo, de igual manera se dejó a una resolución de 30X25 y a un tamaño acorde a la máscara de la cuenca.
- SoilMap el cual es la imagen de la cuenca donde se introdujo la edafología: El mapa de tipos de suelo se obtuvo de los mapas edafológicos con los que cuenta la INEGI, de igual manera se resampleó a una resolución de 30X25 y se redujeron los usos de suelo para que coincidieran con aquellos que se pueden elegir en SHETRAN quedando solo 3: Litosol, Feozem y Vertisol.

Para poder ingresar todos los archivos deben de estar en formato texto con terminación .txt

También otro parámetro fundamental es la precipitación que se obtuvo mediante la estación meteorológica que se encuentra en la zona de estudio, se obtuvieron datos de 1989, del 2015 y del 2016, datos de precipitación diaria en mm/día.



Figura 23. DEM en SHETRAN. Captura de pantalla de SHETRAN del DEM



Figura 24. Mask en SHETRAN 2015. Captura de pantalla de SHETRAN de la Mask



Figura 25. Veg Map en SHETRAN 2015. Captura de pantalla de SHETRAN

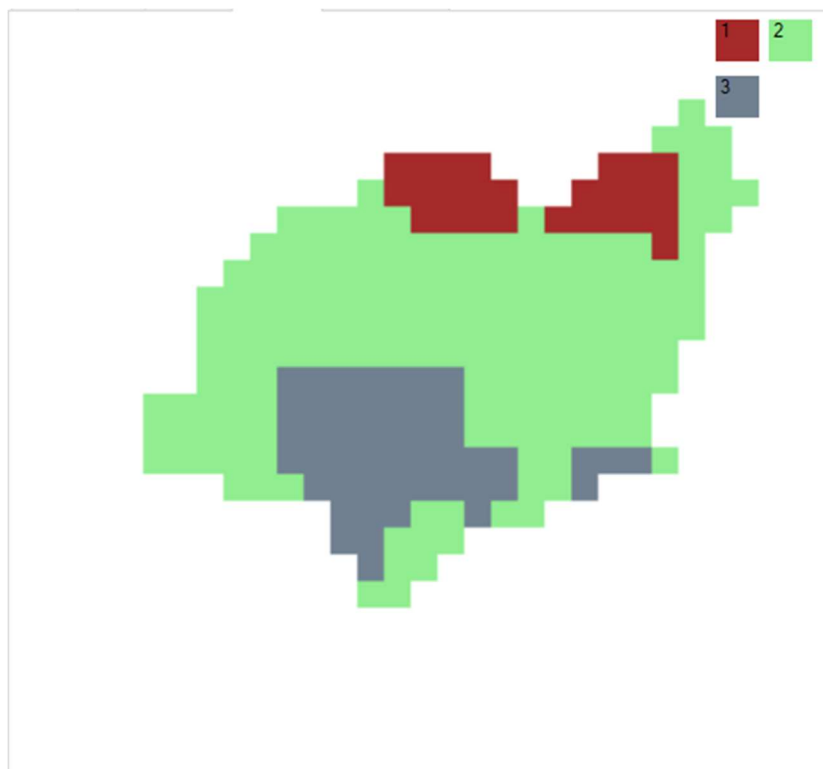


Figura 26. SoilMap en SHETRAN 2015. Captura de pantalla de SHETRAN

4.2 Vegetación

Se procede a ingresar los datos de vegetación que en nuestro caso son los datos de uso de suelo que mencionamos antes los cuales están divididos según la imagen que agregamos en nuestro Veg Map quedando de la siguiente manera:

	Veg Type #	Select	Vegetation Type	Canopy storage capacity (mm)	Leaf area index	Maximum rooting depth(m)	AE/PE at field capacity
▶	1	Select	Arable	1.5	4	0.8	0.6
	2	Select	BareGround	0	0	0	0
	3	Select	Shrub	1.5	1.5	1.5	0.75
	4	Select	Urban	0.1	0.1	0.1	0.5

Tabla 7. Vegetation. Captura de pantalla de SHETRAN del módulo de vegetación

Estos parámetros son los que usará el modelo como uso de suelo para el año que estamos ingresando en este caso se realizan todos los ejemplos con los datos del 2015

4.3 Suelo

Para ingresar los datos correspondientes al suelo se tienen dos pestañas “Soils1” y “Soils2” en la 1era se mencionan cuantas capas tiene cada tipo de suelo encontrado en el área de estudio como se muestra a continuación:

	Soil category #	Number of layers	Soil Layers
▶	1	Select	1
	2	Select	1
	3	Select	1

Tabla 8. Soils 1. Captura de pantalla de SHETRAN del módulo de suelo.

En la segunda pestaña se coloca cada tipo de suelo que tenemos en la región junto con sus propiedades como son el contenido de agua saturada, el contenido de agua residual, la conductividad saturada y dos indicadores de Van Genuchten

Soil Category	Soil Layer	Select	Soil Type	Depth at base of layer (m)	Saturated Water Content	Residual Water Content	Saturated Conductivity (m/day)	vanGenuchten-alpha (cm-1)	vanGenuchten-n
1	1	Select	Clay(20%Sand:6...	1	0.544	0.326	0.014	4.58E-03	1.443
2	1	Select	SiltLoam(10%Sa...	1	0.452	0.093	0.163	5.15E-03	1.681
3	1	Select	ClayLoam(35%S...	1	0.489	0.153	0.055	9.23E-03	1.657

Tabla 9. Soils 2. Captura de pantalla de SHETRAN del módulo de suelo

4.4 Precipitación

Por último, se ingresan los datos de precipitación de la misma manera en formato .txt y se acomoda el paso con el que van a ser ingresados, para todos los años se utilizaron precipitaciones diarias por lo que ingresamos 24hrs.

También se coloca la fecha de inicio del estudio de precipitación y la fecha de culminación con año que son las fechas que va a revisar el programa

Precipitation Data

Time Series data (mm per timestep)

Timestep (hr)

Use Defaults

Potential Evaporation Data

Time Series data (mm per timestep)

Timestep (hr)

Use Defaults

Simulation Start and End Times

Start Time of simulation

End Time of simulation

Use Defaults

Generation of River Links

Grid Squares accumulated before river is produced

Drop from grid elevation to channel depth elevation

Tabla 10. Precipitación SHETRAN. Captura de pantalla de SHETRAN del módulo de precipitación

De esta manera y con toda la información pertinente y registrada procedemos a correr el programa en la plataforma

V. Resultados.

SHETRAN proporciona los resultados tal y como ingresamos los datos en un formato de texto que puede ser exportado a alguna plataforma de análisis de información como EXCEL^{xii} o SIGMAPLOT^{xiii}, en el caso del primero es conocido mundialmente y es una herramienta efectiva para observar los datos de una manera ordenada y graficar cuando se cuenta con un escaso número de datos, sin embargo para nuestro caso es necesario el manejo de una gran cantidad de datos y para lograr su acomodo en una sola gráfica por ejemplo optamos por la herramienta de SIGMAPLOT la cual nos muestra todos los datos en una sola hoja de resultados.

Y una vez ingresándolos a SIGMAPLOT podemos graficar los resultados que nos arroja el programa, el cual contiene la siguiente información

- Precipitación acumulada (columna 2)
- Evaporación del dosel acumulada (col 3)
- Evaporación del suelo acumulada (col 4)
- Transpiración acumulada (col 5)
- Descarga Acumulada (col 6)
- Almacenamiento del dosel (col 7)
- Almacenamiento de la subsuperficial (col 8)
- Almacenamiento de la superficie del suelo (col 9)
- Almacenamiento en el canal (col 10)

En nuestro caso los datos que nos interesan son la Precipitación, la Evaporación del Dosel, la Evaporación del suelo y la Transpiración de cada día para obtener la Evaporación total de cada año que analicemos.

IV.1 Año 2015

La primera corrida que se realizó fue la del año 2015 con todos los datos que se recolectaron que han sido explicados a lo largo de todo el documento y se obtuvieron los resultados que nos proporciona SHETTRAN los cuales fueron organizados en una tabla de EXCEL para así poder pasar de los acumulados a datos específicos de cada día de todo el año 2015 y de esta manera conocer la Evaporación total de este año.

Se obtuvo una Evaporación acumulada total de 358.425 mm

Una evaporación máxima de 4.521 mm que ocurrió el día 12/06/2015 que, aunque no fue el día que más precipitación hubo, si fue cuando más evaporó la vegetación.

Y a continuación se presenta una gráfica donde se comparan los datos de precipitación con los de evaporación diarios:

Evap. vs precip. 2015

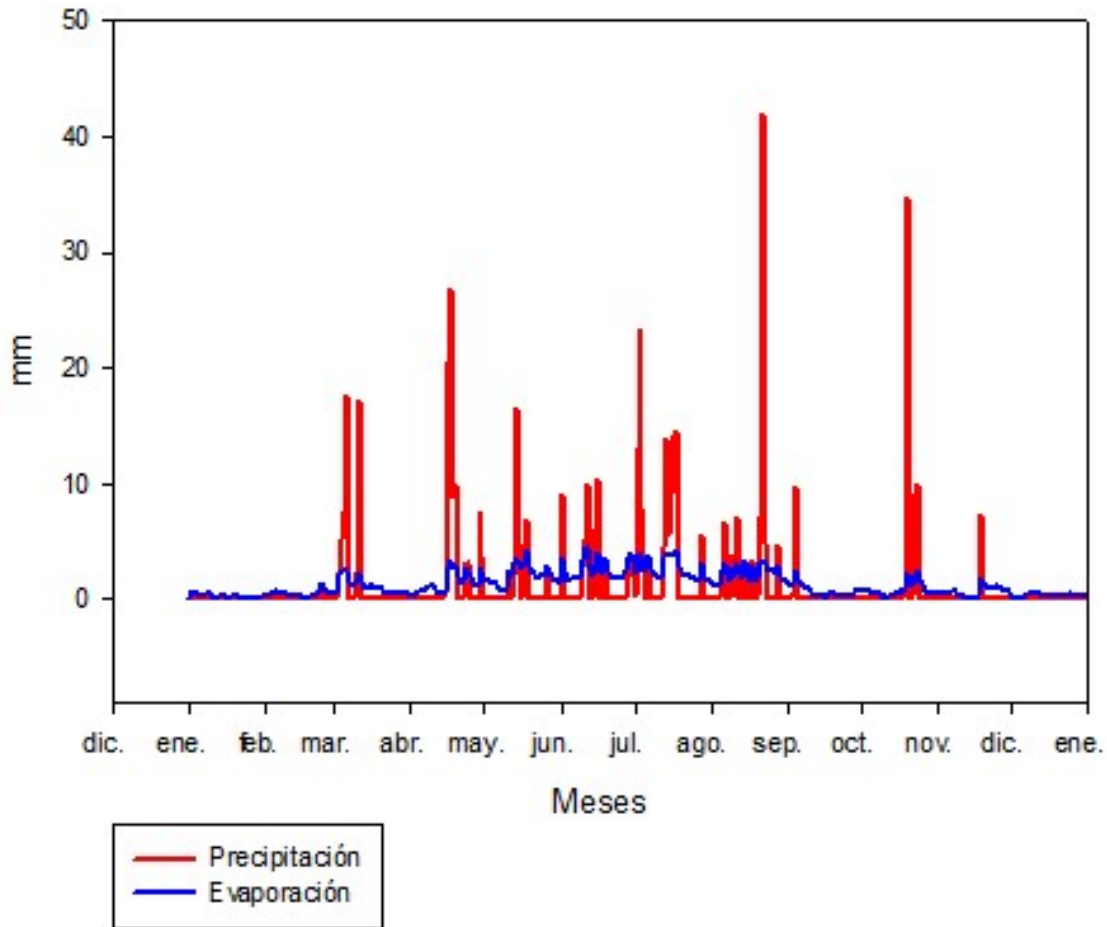


Figura 27. Evaporación VS Precipitación 2015. Gráfica realizada en SigmaPlot comparando la precipitación y la evaporación resultante de SHETRAN en el año 2015. En un eje están los meses y del otro lado los mm.

Se puede observar que el mes que más precipitación hubo fue finales de agosto sin embargo no corresponde al mes donde más evaporación hubo lo que nos marca que la mayoría de esta precipitación escurrió por la cuenca.

Evaporación Acum. vs Precip. Acum. 2015

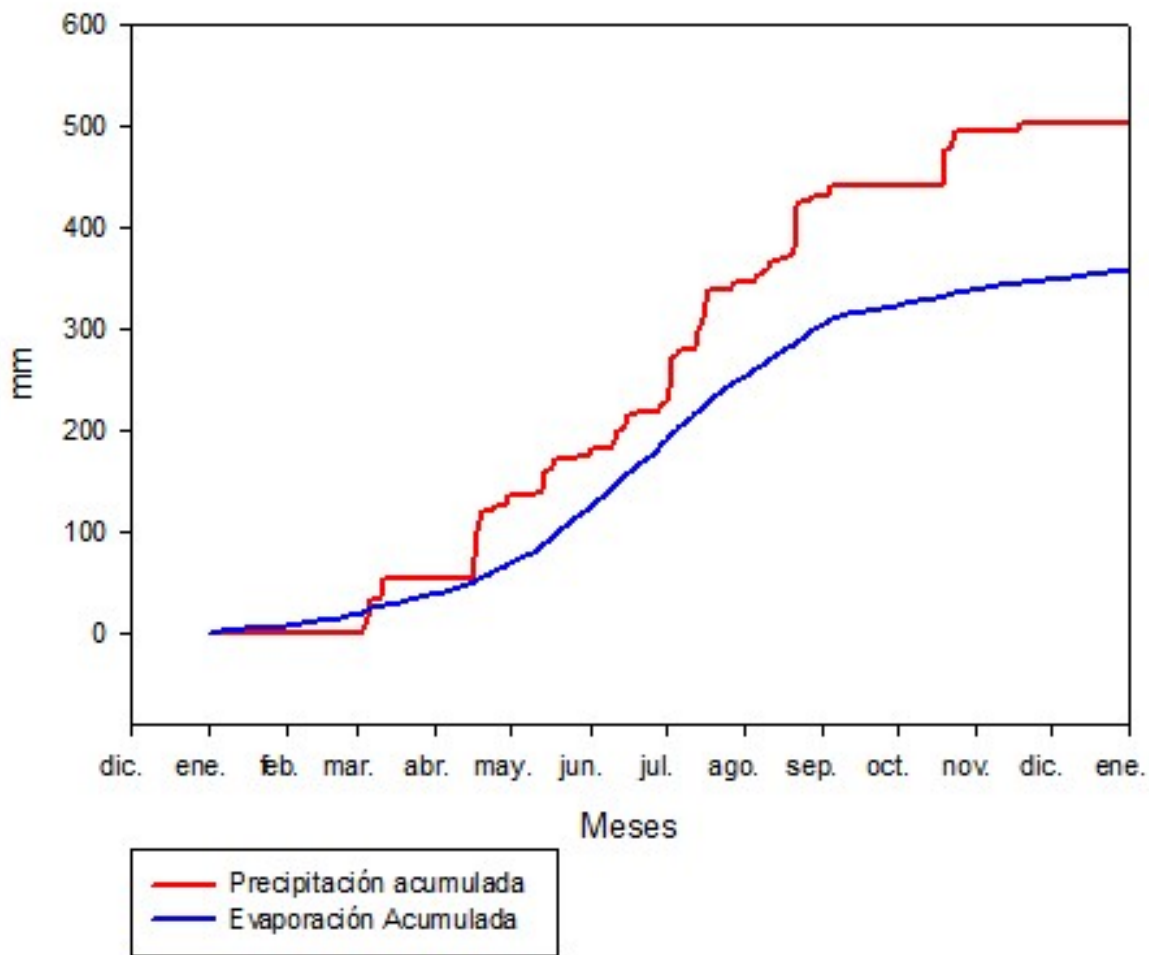


Figura 28. Evaporación Acumulada VS Precipitación Acumulada 2015. Gráfica realizada en SigmaPlot comparando la precipitación y la evaporación acumuladas resultante de SHETRAN en el año 2015. En un eje están los meses y del otro lado los mm

En esta figura podemos observar el comportamiento de la evaporación y de la precipitación conforme fue avanzando el año 2015 observando que la precipitación al basarse en eventos no cuenta con una regularidad como lo es la evaporación, a su vez nos indica que en los meses de febrero y marzo se evaporaba más agua de la que precipitaba lo cual fue invertido en meses siguientes.

IV.2 Año 1989

Después realizamos la corrida del año 1989 con todos los datos que se recolectaron que han sido explicados a lo largo de todo el documento y se obtuvieron los resultados que nos proporciona SHETRAN los cuales fueron organizados en una tabla de EXCEL para así poder pasar de los acumulados a datos específicos de cada día de todo el año 1989 y de esta manera conocer la Evaporación total de este año.

Se obtuvo una Evaporación acumulada total de: 348.802 mm

Una Evaporación Máxima de 5.562mm que ocurrió el 27/06/1989 que de igual manera se debe a que fue cuando más evaporó el dosel.

Precipitación vs Evaporación 1989

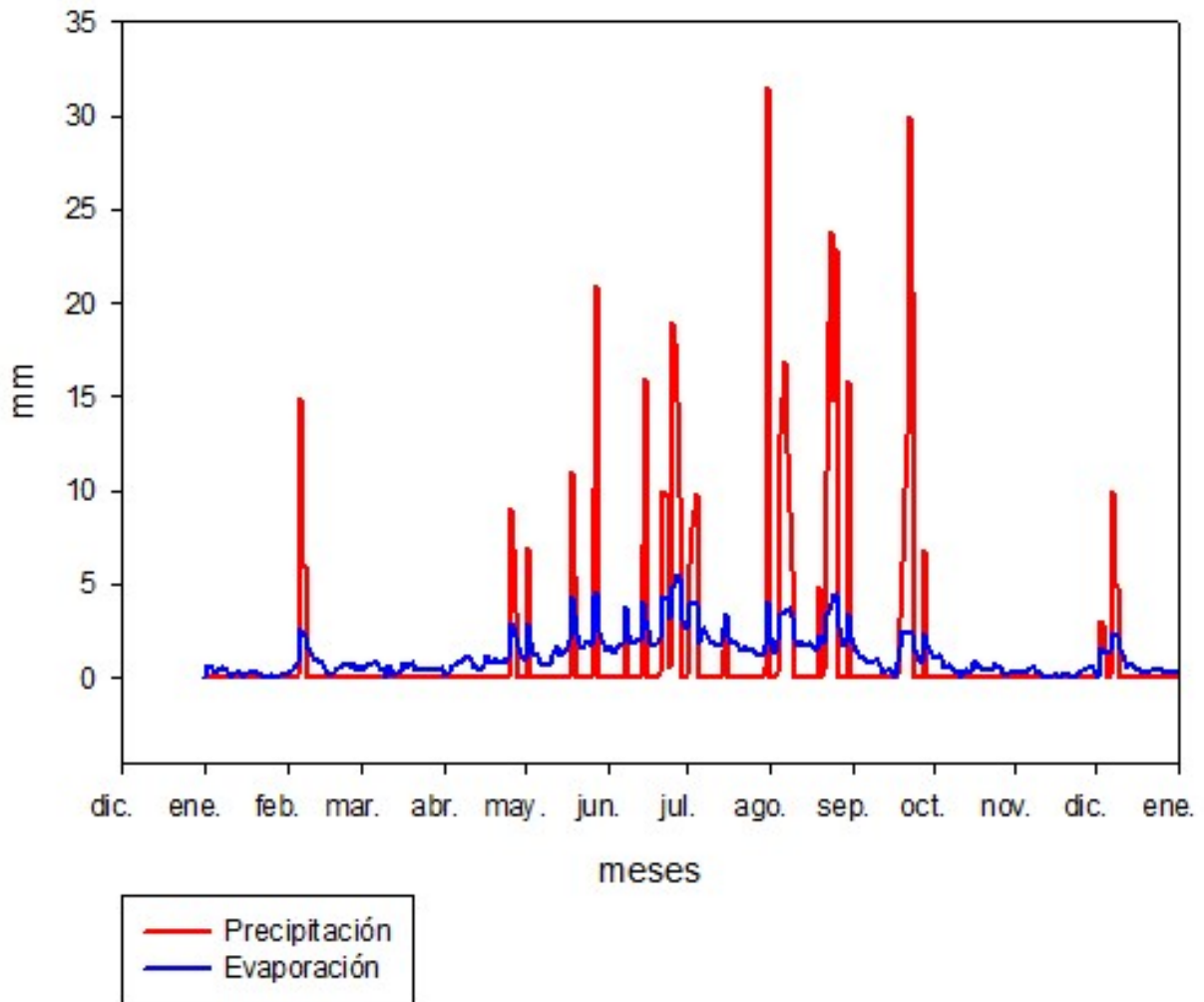


Figura 29. Precipitación VS Evaporación 1989. Gráfica realizada en SigmaPlot comparando la precipitación y la evaporación resultante de SHETRAN en el año 1989. En un eje están los meses y del otro lado los mm

Aquí podemos observar de igual manera que en los meses que más precipitación hubo que fueron agosto y octubre no significó que fue cuando más se evaporó sin embargo es importante observar un comportamiento similar entre la precipitación y la evaporación para corroborar la veracidad de los datos obtenidos.

Precipitación Acum. VS Evaporación Acum. 1989

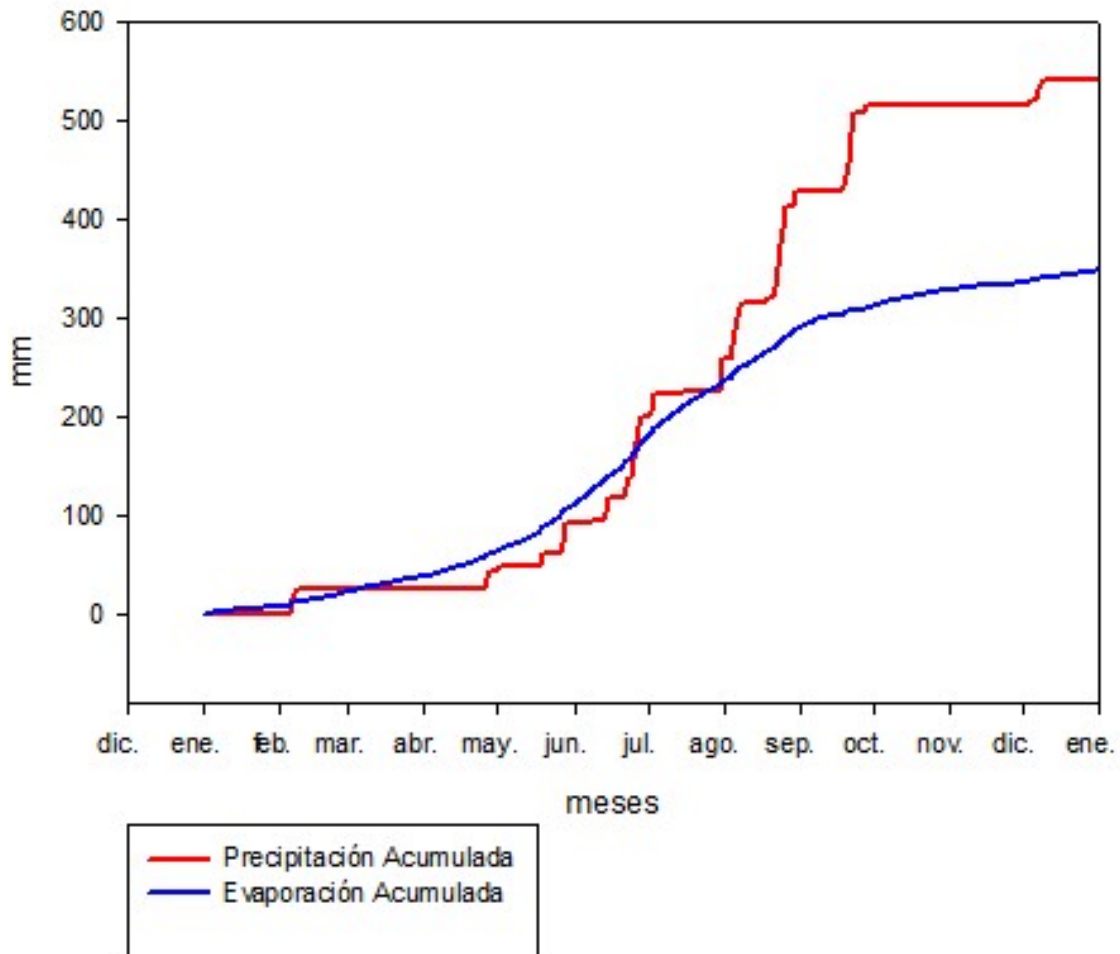


Figura 30. Precipitación acumulada VS Evaporación acumulada 1989. Gráfica realizada en SigmaPlot comparando la precipitación y la evaporación acumuladas resultante de SHETRAN en el año 1989. En un eje están los meses y del otro lado los mm

Aquí podemos observar un comportamiento más uniforme entre la evaporación y la precipitación a comparación de lo ocurrido en el 2015 y esto se debe al uso de suelo que existía en ambos escenarios y que ha ido cambiando con el paso del tiempo.

5.3. Comparación entre 1989 y 2015

Para poder conocer más a detalle los cambios que se han dado en la cuenca de estudio durante el paso de los años es de vital importancia poder comparar un periodo de tiempo lo suficientemente largo para observar cambios significativos como lo hemos hecho en nuestro análisis. Para esto compararemos los datos que obtuvimos del SHETRAN de ambos años tanto 1989 como 2015.

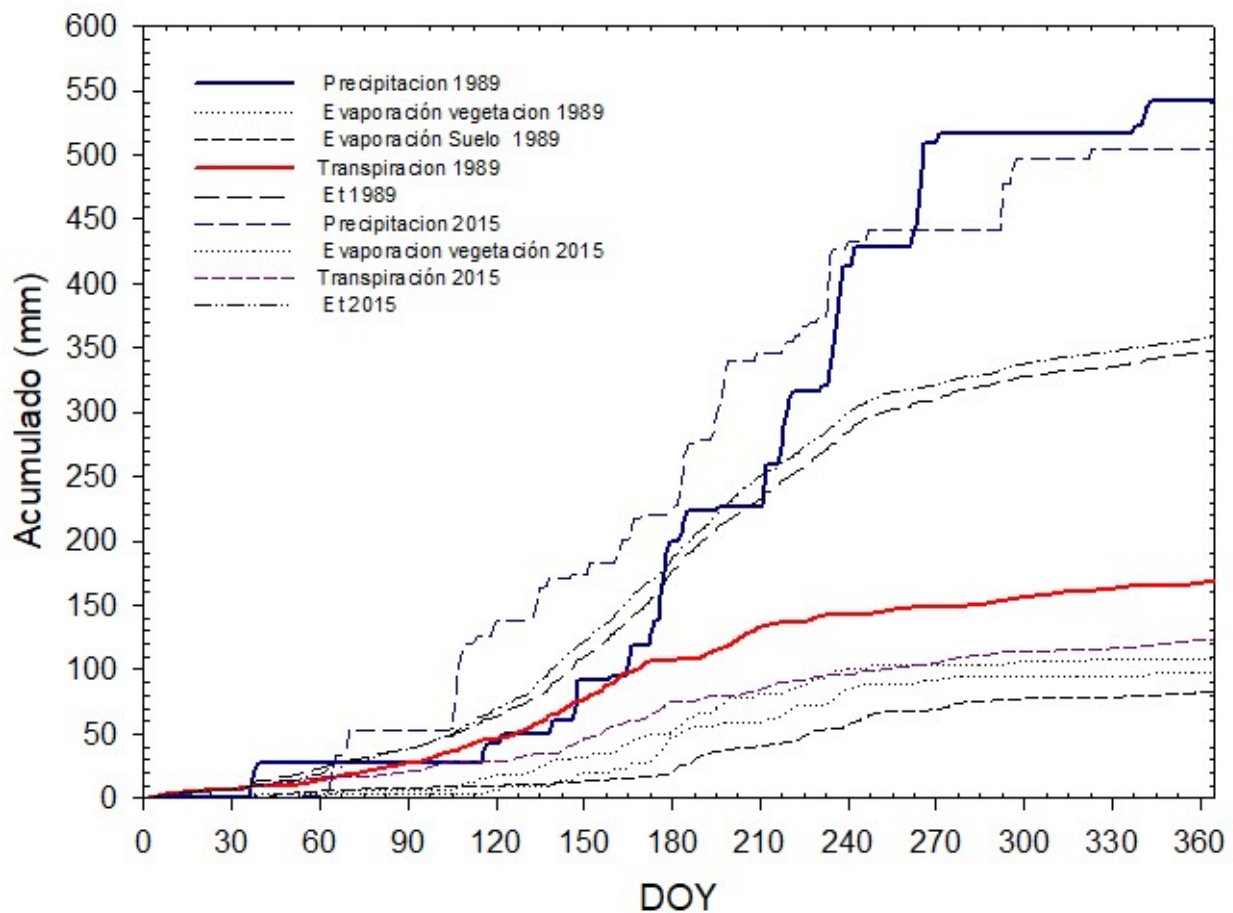


Figura 31. Acumulados 1989 vs 2015. Gráfica realizada en SigmaPlot donde graficamos todos los resultados obtenidos por el SHETRAN tanto para 2015 como para 1989. En un eje están los días del año y en el otro los mm.

Lo que podemos observar en esta última figura son todos los datos que nos interesan del conjunto arrojado por SHETRAN de ambos años (1989 y 2015) y de esta manera compararlos de una manera visual y sencilla. Algo a resaltar es que los datos de evaporación total de ambos años es muy similar y siguen un comportamiento muy parecido y como era de esperarse es mayor la del año 2015 que la de 1989 debido al cambio de uso de suelo que ha ocurrido en la región provocando que cada vez se infiltre menos agua a los mantos acuíferos para potenciar la recarga de estos debido al crecimiento sobre todo de las zonas urbanas.

Al observar la transpiración, que se puede definir como la pérdida de agua en forma de vapor por las plantas es muy claro el punto que atacamos en este análisis el cual nos dice que en el año de 1989 es mayor que la de 2015 claramente por la pérdida de vegetación que se ha dado a lo largo de estos años al crecer la mancha urbana.

Tabla 11. Resultados Shetran vs escurrimiento ideal año 1989 y 2015, así como comprobación de coeficiente escurrimiento anual.

	1989	2015
Precipitación acumulada (m)	0.542	0.50387
Evaporación del dosel acumulada (m)	0.097866	0.108742
Evaporación del suelo acumulada (m)	0.08265	0.12548
Tanspiración acumulada (m)	0.168284	0.124203
Evaporación total acumulada (m)	0.348802	0.358425
Volumen llovido (m3)	128,062,648.90	119,053,370.67
Coeficiente de escurrimiento	0.33	0.38
Volumen de escurrimiento directo (m3)	42,260,674.14	45,240,280.85
Escurrimiento SHETRAN (mm)	50.627	41.306
Escurrimiento SHETRAN (m)	0.050627	0.041306
Volumen escurrido SHETRAN (m3)	11,962,043.77	9,759,697.00
Coeficiente de escurrimiento anual	0.283053785	0.215730248

5.4. Cambio de Uso de Suelo

La Figura 32 muestra las ganancias y pérdidas o mejor dicho el cambio de uso de suelo de cada categoría que estamos clasificando en la región de Bernal en kilómetros cuadrados y claramente se ve una diferencia muy grande en todas y cada una de las clasificaciones del suelo las cuales en lo personal son las más influyentes para conocer el impacto que la sociedad tiene sobre el medio ambiente y su ecosistema afectándolo en todos los sentidos.

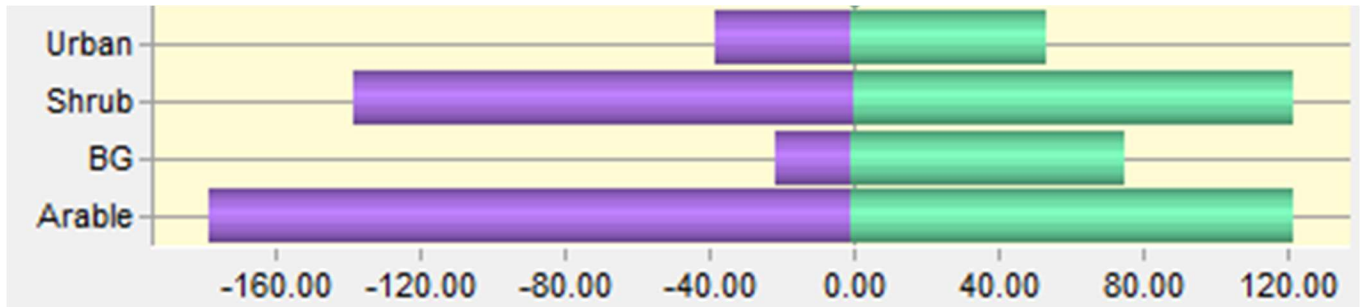


Figura 32. Ganancias y pérdidas 1989 vs 2015

En el aspecto urbano en el año de 1989 (morado) teníamos una cobertura de 38.01 km² y en el 2015 (verde) se tiene una cobertura de 54.13km² lo cual es un incremento de 16.12km² que a su vez significa una pérdida de alguna de las categorías mencionadas ya sea pastizales, suelo arable o incluso suelo desnudo.

Hablando del uso de suelo conocido como matorral se tenía en 1989 una extensión de 138.16 km² y en el 2015 de 121.59 km² lo cual quiere decir que hubo una reducción de 16.57km², la cual equivalente al incremento de la superficie urbana

El suelo desnudo aumentó 54.5 km² ya que en 1989 se tenía una extensión de 21.52km² y en el 2015 76.02 km², lo cual nos deja ver una pérdida de vegetación, muy posiblemente por el incremento de superficie dedicado a la agricultura

El suelo arable como era de esperarse se redujo una extensión de 55.38km² ya que en 1989 se tenían 177.79 km² y en el 2015 122.59 km².

Tabla 12. Porcentajes de cambio de uso de suelo 1989 vs 2015

Uso de suelo en porcentaje	1989 (km2)	2015 (km2)	1989(%)	2015(%)	Diferencia (%)
Urbano	38.01	54.13	10.1230425	14.4605028	4.33746026
Matorral	138.16	121.59	36.7955683	32.4820346	-4.31353377
Suelo desnudo	21.52	76.02	5.73133056	20.3082841	14.5769536
Suelo arable	177.79	122.59	47.3500586	32.7491785	-14.6008801

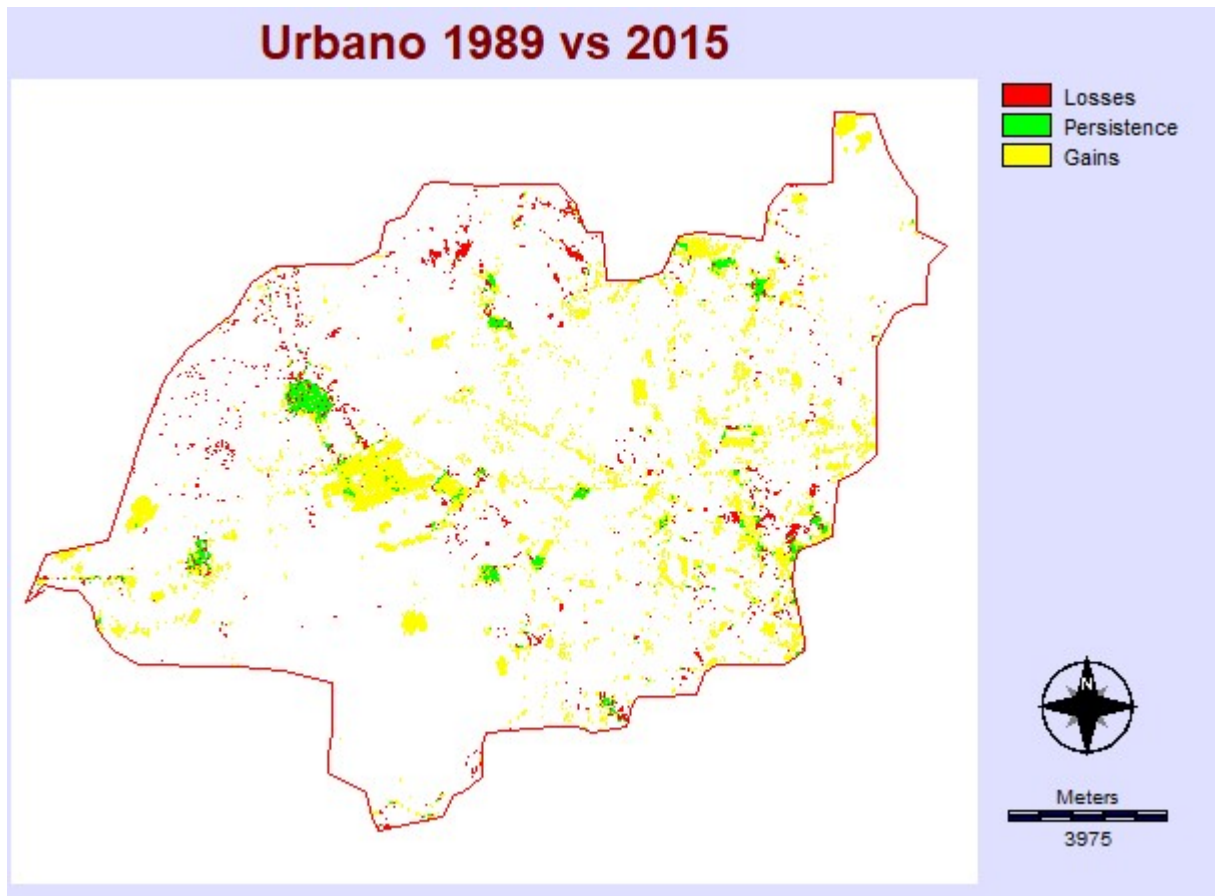


Figura 33. Perdidas, ganancias y persistencias de los cambios de uso de suelo Urbano 1989 vs 2015

En este mapa observamos que todo lo rojo es lo que en 1989 se consideraba como suelo urbano, lo verde es lo que en 2015 es ahora suelo urbano y lo blanco lo que se conservó durante esos años clasificado. Y podemos observar que ha incrementado en gran medida las zonas urbanas consumiendo a su paso zonas arables, arbustos y suelo desnudo.

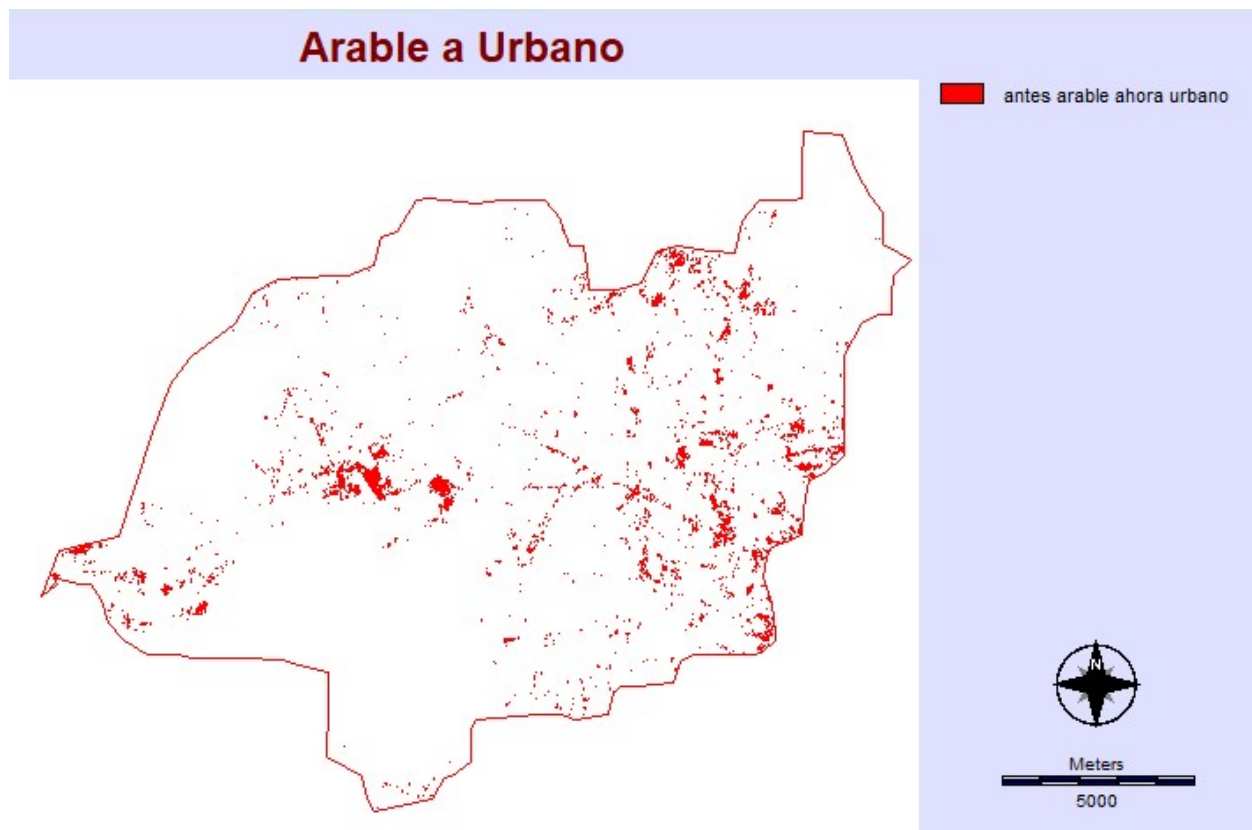


Figura 34. Cambio de uso de suelo de Arable a Urbano

En este mapa observamos en rojo todo lo que cambió de Arable a Urbano del año 1989 al 2015 observando que el mayor cambio se da en la región sureste de la zona de estudio considerando también que es la región de más suelo arable había.

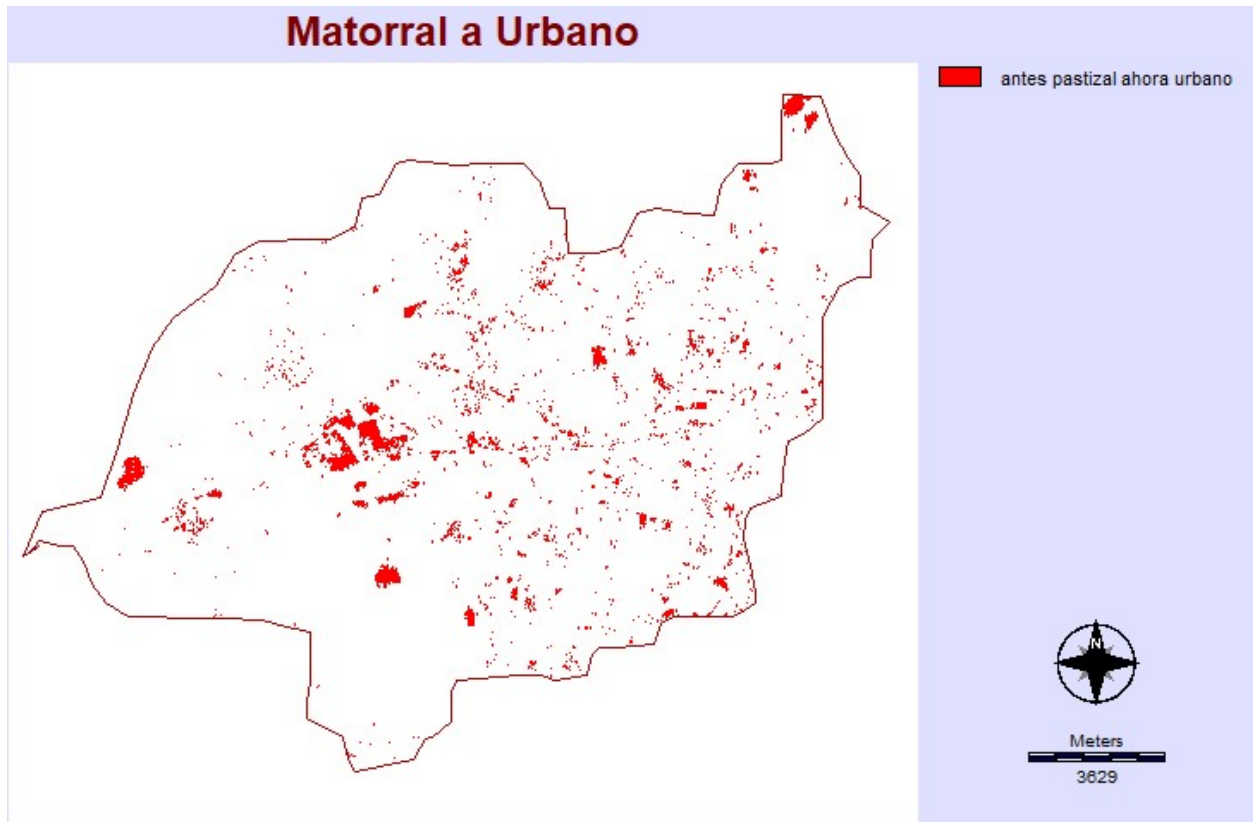


Figura 35. Cambio de uso de suelo de Matorral a Urbano

Por otra parte, el cambio que observamos en verde es el de Matorral a Urbano el cual se concentra en la zona centro y sureste de la región de estudio teniendo un cambio menor que de Arable a Urbano.

Estas dos categorías representan las principales transiciones y aportaciones a la clasificación urbana del 2015 siendo de igual manera las más importantes para generar un impacto ambiental, así como un impacto en la cuenca que analizamos.

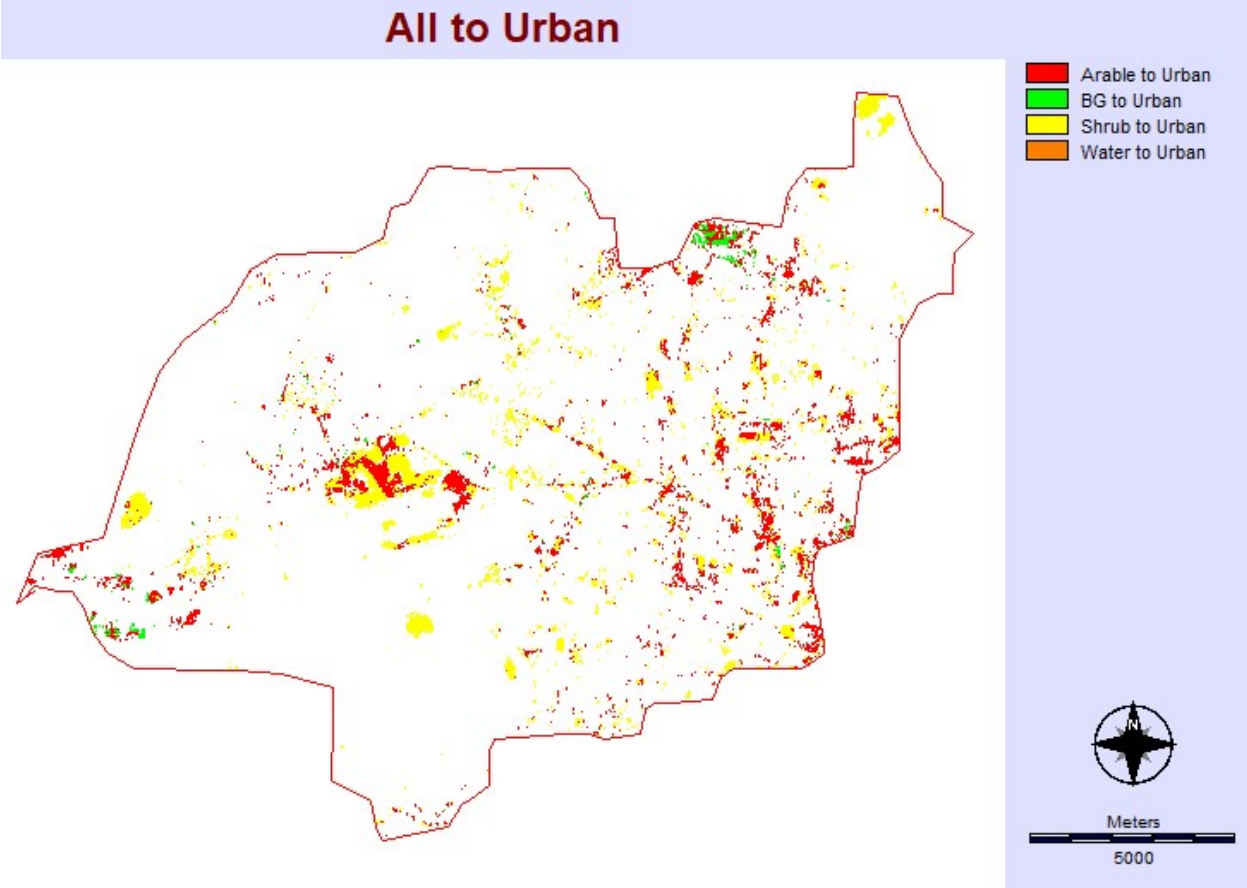


Figura 36. Cambio de uso de suelo a urbano 1989 a 2015

V. Conclusiones Y Recomendaciones

La modelación de los componentes del balance hídrico utilizando SHETRAN de la cuenca de Bernal, para dos periodos de tiempo (1989 y 2015) donde son evidentes los cambios de uso de suelo, permitió desagregar los diferentes componentes del ciclo hidrológico, para identificar como se reparten los principales componentes del balance hídrico. Para la parametrización del modelo fue necesario una clasificación supervisada de imágenes satelitales, las cuales a su vez permitieron evaluar los cambios de uso de suelo entre 1989 y 2015, y la respuesta de la evapotranspiración, escurrimiento e infiltración, esencialmente los cambios a partir de las condiciones naturales y de urbanización.

Por otra parte, la reclasificación del tamaño de pixel de 125X125 m a un tamaño de 300X300 m en apariencia no afecta en forma significativa los resultados de la modelación ya que como podemos observar nuestra área de estudio no es de gran tamaño ni de gran cambio, las transiciones de tipo de vegetación son identificadas por SHETRAN con facilidad, así como el tipo de suelo, representado por 3 tipos de suelo, lo que hace este tamaño de píxel sea suficiente para lograr el objetivo del estudio. Es importante mencionar que en México en la actualidad no se tienen suficientes mediciones de escurrimiento ni registros de niveles de escurrimiento a lo largo de los años, que permitan calibrar y validar los resultados del modelo, como fue nuestro caso.

Los cambios de uso de suelo fueron enfatizados en este trabajo, ya que es nuestro objetivo general: “investigar el impacto del cambio de uso de suelo a través de los años...” Una vez analizado estos cambios y queda claro son significativos entre 1989 y 2015. Dichos resultados dejan ver que hay un crecimiento urbano dentro de la cuenca por el desarrollo de la región, así como la zona de estudio, la cual tiene un alto índice de crecimiento, sobre todo, a sus atractivos turísticos.

La distribución de la vegetación mediante el del NDVI, comparando solo dos tipos de uso de suelo: urbano y NO urbano, nos desglosan las zonas principales donde se está perdiendo vegetación para realizar. Por lo que el NDVI es un buen indicador, incluso con la segmentación de las imágenes satelitales, nos deja conocer los cambios generales del uso de suelo, y el conocimiento general del crecimiento urbano en la zona.

Es por eso que antes de realizar el análisis completo de las imágenes y el estudio en general se realizó el cálculo del NDVI para poder observar de manera a priori el cambio urbano que se tiene en nuestra cuenca

Río Moctezuma y tener una idea general de la cual podemos partir para comprobar información de cambio de uso de suelo.

La zona urbana aumento de un 10% a un 14% durante este periodo de análisis, sin embargo no fue la clasificación que más tuvo impacto durante este periodo ya que solo tenemos un aumento del 4%. Esto puede deberse a varios factores, en lo personal creo que es debido a que la zona analizada no es una zona donde la gente busque mudarse o comenzar una vida ahí, la mayoría de la población se concentra en Bernal la cual tiene un alto índice turístico como se comentó esto quiere decir que la gente llega y se va sin quedarse más de un cierto tiempo, lo que ocasiona que no crezca la mancha urbana de manera excesiva.

A diferencia de la zona urbana el suelo desnudo es el que más ha tenido impacto en los cambios de uso de suelo ya que ha habido un aumento del casi 15%, del que había en 1989. De igual manera que en el cambio del cambio urbano, el aumento en el suelo desnudo creció de una manera considerable ya que en nuestra cuenca se ha dado el establecimiento de industria. Gran parte del área total de la cuenca y como se ve en los resultados, son las zonas de suelo arable quienes impactan en la infiltración y en la evaporación del suelo, ya que se evapora y transpira más agua en el 2015 que en 1989. Esto es debido a que las zonas crecen urbanamente hablando, se construyen estructuras sólidas donde antes había pastizal o matorral provocando que existan zonas donde se acumula el agua evitando la infiltración y provocando la evaporación y transpiración de esta.

En consecuencia, los resultados de la modelación, deja ver que los cambio de uso de suelo debido al crecimiento de población es hacia las zonas urbanas y suelo desnudo, disminuyendo de esta manera dos usos, matorral y suelo arable, ocasionado por el turismo y zonas industriales-invernaderos, que tienen un gran impacto en el comportamiento y repartición de los componentes del balance hídrico de nuestra cuenca en estudio.

VI. Bibliografía

Alanis Araiza, A. and Rojas González, E. (2012). Deformación volumétrica en suelos no saturados. Tesis de maestría. Universidad Autónoma de Querétaro.

Allen, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (Vol. 56). Food y Agriculture Org..

Beasley, D. B. Huggins, L. F. 1982. Answers: User's manual. Chicago: U.S. Environmental Protection Agency 54p.

Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Science Bulletin 24 (1), 44–69.

Beven, K. J. 2001. Rainfall-runoff modeling. Wiley.

Braud, I., Breil, P., Thollet, F., Lagouy, M., Branger, F., Jacqueminet, C., ... Michel, K. (2013a). Evidence of the impact of urbanization on the hydrological regime of a mediumsized periurban catchment in France. Journal of Hydrology, 485, 5–23.

Braud, I., Fletcher, T. D., y Andrieu, H. (2013b). Hydrology of peri-urban catchments: Processes and modelling. Journal of Hydrology, 485, 1–4.

Buol, S.W., R.J. Southard, R.C. Graham, and P.A. McDaniel. 2003. Soil Genesis and Classification. Iowa State Press, 5th Edition, Ames, IA. p 494.

Chávez Nava, C. (2015). Intercepción de lluvia por una especie arbórea representativa de la zona urbana de la ciudad de Santiago de Querétaro. Tesis de maestría, Facultad Ingeniería.UAQ. México. Querétaro.

Chen, J. M. and Black, T. A., 1992 J.M. Chen, T.A. Black Defining leaf area index for non-flat leaves Plant, Cell y Environment, 15 (1992), pp. 421–429

Chien, H., Yeh, P.J.F., Knouft, J.H., 2013. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. J. Hydrol. 491, 73–88.

Chow, V. T. (2000). Hidráulica de canales abiertos. McGraw Hill.

Dabral, S., Cohen, M., 2001. ANSWERS-2000 Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation with Questions Graphical User Interface. ABE6254 – Simulation of Small Agricultural Watersheds

Driessen, P., J. Deckers, and O. Spaargaren. (Eds). 2001. Lecture notes on major soils of the world. World Soil Resources Reports – 94. FAO. Rome, Italy. (ISBN: 9251046379).

Engman, E. T. (1986). Roughness coefficients for routing surface runoff. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 112(1), 39-53.

Ewen, B. J., y Parkin, G. (2000). SHETRAN : DISTRIBUTED RIVER BASIN FLOW MODELING S YSTEM, (JULY).

Feddes, R.A., P. Kowalik, K. Kolinska-Malinka, and H. Zaradny. 1976. Simulation of field water uptake by plants using a soil water dependent root extraction function. J. Hydrol. (Amsterdam) 31:13–26

Gaytán, R., de Anda, J., y Nelson, J. (2006, September). Modificaciones en el régimen de escurrimiento en la cuenca del lago de Santa Ana (Zacatecas, México). In Congreso Nacional y Reunión Mesoamericana de Manejo Integral de Cuencas Hidrográficas, SEMARNAT, Instituto Nacional de Ecología.

Guevara-Escobar, A., Gonzalez-Sosa, E., Velizchavez, C., Ventura-Ramos, E., And Ramossilinas, N.M. Rainfall Interception And Distribution Patterns Of Gross Precipitation Around An Isolated Ficus Benjamina Tree In An Urban Area. J. Hydrol. Vol. 333, 2006 532-541.

Hawley, R. J., y Bledsoe, B. P. (2011). How do flow peaks and durations change in suburbanizing semi-arid watersheds? A southern California case study. *Journal of Hydrology*, 405(1-2), 69–82.

HDR-HydroQual, Inc., Colorado State University , Bureau of Reclamation 2011. TREX Watershed Modeling Framework User's Manual: Model Theory and Description.

Horton R., Rainfall Interception, 1919. *Weather Rev.*, vol. 47 pp. 6033-623.

Hurtado, M.D., J.A. Zepeda G., y M. Flores F. 2004. Capítulo 2: Naturaleza, propiedades índice y distribución de los suelos expansivos. *Mecánica de Suelos No Saturados*. Sociedad Mexicana de Mecánica de Suelos, A.C. Universidad Autónoma de Querétaro México. p 19.

INEGI, cartas de climas 1:1000 000.

INEGI, 2007 Panorama Agropecuario En Queretaro, Censo Agropecuario 2007.

INEGI. Censo de Población y Vivienda 2010a. Querétaro/Población/Población por entidad federativa y edad desplegada según sexo.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010b. Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM2.0) <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/continuoElevaciones.aspx>.

Ives, J. D., & Messerli, B. (1989). *The Himalayan dilemma: reconciling development and conservation*. Psychology Press.

Knyazikhin, Y., Glassy, J., Privette, J. L., Tian, Y., Lotsch, A., Zhang, Y., ... y Nemani, R. R. (1999). MODIS leaf area index (LAI) and fraction of photosynthetically active radiation absorbed by vegetation (FPAR) product (MOD15) algorithm theoretical basis document. Theoretical Basis Document, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, 20771.

Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Kabat, P., Jiménez, B., Miller, K.A., Oki, T., Sen, Z., Shiklomanov, I.A., 2007. Freshwater resources and their management. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 173–210.

Lin, W., Zhang, L., Du, D., Yang, L., Lin, H., Zhang, Y., Li, J., 2009. Quantification of land use/land cover change in Pearl River Delta and its impact on regional climate in summer using numerical modeling. *Reg. Environ. Change* 9, 75–82.

López Cuellar, P. L. (2014). *Tendencia del índice de vegetación de diferencia normalizada para una zona del centro de México*. Tesis de licenciatura, Facultad Ingeniería. UAQ. México. Querétaro.

Mastachi-Loza, C. A., González-Sosa, E., Becerril-Pina, R., y Braud, I. (2010). Interception loss by mesquite (*Prosopis laevigata*) and huisache (*Acacia farnesiana*) in the semiarid region of central Mexico. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 1(1), 103-120.

Mejía, A. I., y Moglen, G. E. (2010). Spatial distribution of imperviousness and the space-time variability of rainfall, runoff generation, and routing. *Water Resources Research*, 46, 1–14.

Miller, J. D., Kim, H., Kjeldsen, T. R., Packman, J., Grebby, S., y Dearden, R. (2014). Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover. *Journal of Hydrology*, 515, 59–70.

Mitsuda Y. and Ito S., “A review of spatial – explicit factors determining spatial distribution of land use/land-use change,” *Landscape and Ecological Engineering*, vol.7,no.1,pp.117–125, 2011.

Monteith, J.L. 1965. Evaporation and environment. pp. 205-234. In G.E. Fogg (ed.) *Symposium of the Society for Experimental Biology, The State and Movement of Water in Living Organisms*, Vol. 19, Academic Press, Inc., NY.

Neupane, R. P., y Kumar, S. (2015). Estimating the effects of potential climate and land use changes on hydrologic processes of a large agriculture dominated watershed. *Journal of Hydrology*, 529, 418-429.

Ocampo Velásquez R. V. 1997. Lista florística y plan tas útiles del predio el cortijo, Dolores Hidalgo, Gto. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Naturales. UAQ. México. Querétaro.

Penman, H.L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass. *Proc. Roy. Soc. London A*193:120-146.

Pickett, S. T., Burch Jr, W. R., Dalton, S. E., Foresman, T. W., Grove, J. M., & Rowntree, R. (1997). A conceptual framework for the study of human ecosystems in urban areas. *Urban Ecosystems*, 1(4), 185-199.

Rawls, W. J., Brakensiek, D. L., y Saxton, K. E. (1982). Estimation of soil water properties. *Transactions of the ASAE*, 25(5), 1316-1320.

Rojas, R., Julien, P., & Johnson, B. (2003). A 2-Dimensional Rainfall-Runoff and Sediment Model. CASC2D-SED Reference Manual ..., (July). Retrieved from http://www.engr.colostate.edu/~pierre/ce_old/Projects/CASC2D-SED Web site 082506/Download_files/CASC2D-SED-Reference-Manual.pdf

Rutter, A. J., Kershaw, K. A., Robbins, P. C., and Morton, A. J.: A predictive model of rainfall interception in forests. I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican pine, *Agric.*

Sosebee, R.E. y Wan C. 1987. Plant ecophysiology: a case study of honey mesquite. *Symposium on Shrub Ecophysiology and Biotechnology*, 103:117. Logan, Utah.

Simmons, D. L. and R. J. Reynolds. 1982. Effects of urbanization on base flow of selected south-shore streams, Long Island, New York. *Water Resources Bulletin*. V. 18, no. 5, pp. 797-805.

Singh, V. P., 1988. Hydrologic Systems. Volume 1: Rainfall-runoff modelling. Prentice Hall, New Jersey

Stonestrom, D.A., Scanlon, B.R., Zhang, L., 2009. Introduction to special section on impacts of land use change on water resources. *Water Resour. Res.* 45, W00A00.

Unfpa. (2009). United Nations Population Fund. *Public Health*, 64(January), 25–7. Retrieved from <http://www.unfpa.org/public/>

Van Genuchten, M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Am. J.* 44:892-898.

Véliz-Chávez, P. C., González-Sosa, E., Barajas-Ortiz, S. D. R., y Ramos-Salinas, N. M. (2012). El efecto pantalla o sombra de los árboles en la formación de los escurrimientos urbanos. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(4), 73-87.

Véneré, M. J., Clause, A. 2002. A computational environment for water flow along floodplains. *International Journal on Computational Fluid Dynamics*. Vol. 16, pp. 327-330.

Villa Alvarado, C. J., Delgadillo-Ruiz, E., Mastachi-Loza, C. A., González-Sosa, E., y Norma Maricela, R. S. (2014). A physically based runoff model analysis of the querétaro river basin. *Journal of Applied Mathematics*, 2014.

Waring, R. H., Schroeder, P. E., y Oren, R. (1982). Application of the pipe model theory to predict canopy leaf area. *Canadian Journal of Forest Research*, 12(3), 556-560.

White MD, Greer KA. 2006. The effects of watershed urbanization on the stream hydrology and riparian vegetation of Los Peñasquitos Creek, California. *Landscape and Urban Planning* 74: 125–138.

Willems, P., 2000. Probabilistic modeling of the emission receiving surface waters. Ph. D Thesis Faculty of Engineering, Katholieke Universiteit, Leuven, Belgium.

Zoido Naranjo, F., Martinez Pena, G. E., Perez Salazar, A., Vazquez Paulino, J. C., y Alvarez-Manilla Aceves, A. (2002). Caracterizacion De Suelos Y Control Espacial Por Medio De Los Sistemas De Informacion Geografica; Caso Valle De Queretaro. Publicacion Tecnica, (203).

Yan, B., Fang, N.F., Zhang, P.C., Shi, Z.H., 2013. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: an assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. J. Hydrol. 484, 26–37.

ACRÓNIMOS

ⁱ LULC: Land Use, Land Cover

ⁱⁱ LANDSAT: Sistema de satélites

ⁱⁱⁱ ArcGIS: Software en el campo de Sistemas de Información Geográfica

^{iv} SUGS: Servicio Geológico de los Estados Unidos

^v OLI: Operational Land Imager

^{vi} TIRS: Thermal Infrared Sensor

^{vii} IDRISI: Software en el campo de Sistemas de Información Geográfica

^{viii} WGS 84: World Geodetic System 84

^{ix} NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

^x DEM: Modelo de elevación digital por sus siglas en inglés

^{xi} INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía

^{xii} EXCEL: Software básico de Microsoft para el análisis y representación gráfica de datos.

^{xiii} SIGMAPLOT: software de análisis y representación gráfica de información avanzada