

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Centro Interdisciplinario de Investigación para el
Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca (CIIDIR-
Oaxaca)

Maestría en Ciencias en Conservación y Aprovechamiento de
Recursos Naturales (Ingeniería)



Tesis que para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta

Guillermo Jaciel Hernández Osorio

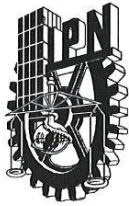
Título

Análisis de la Infiltración hídrica y cambios en la cobertura del bosque mesófilo en la cuenca alta del Río Copalita mediante imágenes de satélite

Directores de tesis

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez
M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca, Mayo de 2016



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 19 del mes de mayo del 2016 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del **Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca** (CIIDIR-OAXACA) para examinar la tesis de grado titulada: "ANÁLISIS DE LA INFILTRACIÓN HÍDRICA Y CAMBIOS EN LA COBERTURA DEL BOSQUE MESÓFILO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO COPALITA MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE"

Presentado por el alumno:

Hernández

Apellido paterno

Osorio

materno

Guillermo Jaciel

nombre(s)

Con registro:

| | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 1 | 4 | 0 | 0 | 5 | 2 |
|---|---|---|---|---|---|---|

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez

M. en C. María de los Angeles Ladrón de Guevara

Dr. Juan Alejandro Vazquez Feijoo

Dr. Francisco Castellanos León

Dr. Matthias Rös

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 24 del mes de mayo del año 2016, el (la) que suscribe Hernández Osorio Guillermo Jaciel, alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro A140052, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del Dr. Salvador Isidro Belmonte Jiménez y la M. en C. María de los Ángeles Ladrón de Guevara Torres. y cede los derechos del trabajo titulado: "ANÁLISIS DE LA INFILTRACIÓN HÍDRICA Y CAMBIOS EN LA COBERTURA DEL BOSQUE MESÓFILO EN LA CUENCA ALTA DEL RÍO COPALITA MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó gjho_forest@hotmail.com, Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Hernández Osorio Guillermo Jaciel



CENTRO INTERDISCIPLINARIO
DE INVESTIGACION PARA EL
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL
C.I.I.D.I.R.
UNIDAD OAXACA
I.P.N.

Resumen

La cuenca Río Copalita, ubicada en la sierra sur del estado de Oaxaca, es relevante por los servicios ambientales y el desarrollo turístico que estos proporcionan. En ella se desarrolla el bosque de niebla, uno de los ecosistemas terrestres más amenazado a nivel nacional. Este bosque ocupa aproximadamente el 18 % de la superficie de la cuenca y se considera como el ecosistema de más aporte hídrico al subsuelo. Los objetivos de la investigación fueron analizar los cambios de uso de suelo en la cuenca Río Copalita (1986-2015) mediante imágenes satelitales enfocados al bosque de niebla y estimar los patrones de infiltración para cada tipo de uso de suelo y vegetación como marco de comparación. Se analizaron 7 imágenes multiespectrales del satélite Landsat (sensores MSS, TM, ETM+, OLI) de la superficie de la cuenca. Se corrigieron atmosférica, topográfica y radiométricamente para posteriormente clasificarlas por tipos de vegetación mediante un algoritmo de máxima probabilidad. La precisión obtenida fue de 75.5 % y el índice de Kappa de 0.62. Los patrones de infiltración fueron estimados mediante balances hídricos y álgebra de mapas. Los resultados muestran que de 1986 a 2015 el bosque mesófilo aumentó en superficie 35.4%, bosque de encino 206.4%, selva caducifolia 15.7% y zona poblada 15.1%, las coberturas que disminuyeron fueron: Bosque de coníferas 16.4%, zona sin vegetación 42.8% y selva perennifolia 8.1%. Los porcentajes de infiltración por unidad de superficie y en relación a la cantidad de precipitación fueron: zona poblada (32.8 %), zona desprovista de vegetación (24.5 %), bosque de coníferas (23.8 %), bosque de encino (23.7 %) y bosque mesófilo (15.7 %). Las conclusiones son que la cuenca Río Copalita es un caso especial de recuperación (aumento en las coberturas vegetales) y que el bosque de niebla por las características de su suelo no es el ecosistema de mayor aporte a la infiltración. Las causas que han propiciado la recuperación de la cuenca se atribuyen al abandono de actividades agropecuarias y forestales en la zona, reforestación y cambios en los patrones climáticos.

Palabras clave: Imágenes multiespectrales, LANDSAT, cambios de uso de suelo, bosque mesófilo, bosque de niebla, infiltración, análisis espacio temporal, balance hídrico, álgebra de mapas.

Abstract

The Rio Copalita basin, located at the south of Oaxaca state, is important due to environmental services and the touristic development that it provides. Here the cloud forest is grown, one of the most threatened ecosystems in the country. This forest covers 18% of the surface of the basin and it's considered the most important ecosystem due to the water inflow it provides to the subsoil. The research objectives were to analyze the changes regarding to the use of the soil in the Rio Copalita basin (1986 – 2015) through satellite images focused on the cloud forest and estimate soil infiltration patterns for each type of soil and vegetation as a framework for comparison. 7 Landsat satellite multispectral images were analyzed (sensors MSS, TM, ETM+, OLI) of the basin surface. Those images were atmospheric, topographic and radiometrically corrected to later classify them by types of vegetation through a maximum-likelihood algorithm. The accuracy obtained was of 75.5% and the Kappa index was 0.62. The infiltration patterns were estimated through hydrologic balance and map algebra. The results show that from 1986 to 2015 the cloud forest area increased 35.4%, oak forest 206.4%, deciduous forest 15.7% and the populated area 15.1%, the areas which decreased were: coniferous forest 16.4%, areas without vegetation 42.8% and evergreen forest 8.1%. The infiltration percentages per unit area in connection with the precipitation amount were: populated areas (32.8 %), areas without precipitation (24.5%), coniferous forest (23.8%), oak forest (23.7%) and evergreen forest (15.7%). The conclusions are: the Rio Copalita basin is a special case of recovery (increasing of vegetation cover) and that the cloud forest due to its features is not the greatest supply source for the infiltration. The causes that have favored the recovery of the basin are mainly the abandonment of agricultural and forestry activities in the area, reforestation and change in weather patterns.

Key words: multispectral images, LANDSAT, land use changes, evergreen forest, cloud forest, infiltration, temporal-space analysis, water balance, map algebra,

Dedicatoria

A Dios, porque toda buena dádiva y todo don perfecto descienden de lo alto, del Padre de las
luces, en el cual no hay mudanza, ni sombra de variación.

Agradecimientos

Eternamente agradecido con mis padres, Juan Guillermo Hernández Vicente y Blanca Osorio Osorio, sus consejos, su apoyo, la alegría que me han transmitido cada día han sido pilar de todos mis logros. Samuel, Jehieli, con ustedes también estoy agradecido, porque me motivan a querer ser mejor.

Lidia Elisabet Cortés Perez, la alegría que has generado en mi vida ha sido vital para la culminación de esta etapa en mi vida, gracias por tu apoyo, por tus consejos, por acompañarme y compartir tu vida conmigo.

Estoy muy agradecido con mis directores, Salvador Isidro Belmonte Jiménez y María de los Ángeles Ladrón de Guevara por compartirme parte de sus conocimientos, su pasión por la investigación es contagiosa, estoy en deuda con ustedes y me siento afortunado de haber formado parte de su equipo y recibir su amistad.

Muchas gracias a mi comité de tutorial, Francisco Castellanos León, Juan Alejandro Vázquez Feijoo, Matthias Rös por sus siempre oportunas observaciones y aportes, han sido parte esencial para la realización de esta investigación.

Me llevo grandes y buenos momentos de este Centro de Investigación, de sus trabajadores, de sus profesores, de mis compañeros y amigos, muchas gracias por la experiencia CIIDIR unidad Oaxaca.

Contenido

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN..... | 10 |
| 1.1 Introducción | 10 |
| 1.2 Antecedentes..... | 12 |
| 1.2.1 Trabajos en la cuenca Río Copalita | 13 |
| 1.2.2 Uso de percepción remota para el análisis de vegetación. | 14 |
| 1.3 Planteamiento del problema | 14 |
| 1.4 Justificación | 15 |
| 1.4.1 Técnica y científica..... | 15 |
| 1.4.2 Social..... | 15 |
| 1.4.3 Ambiental | 16 |
| 1.5 Hipótesis..... | 16 |
| 1.6 Objetivos | 17 |
| 1.7 Limitaciones y alcances de la investigación | 18 |
| CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO | 19 |
| 2.1 Bosque mesófilo de montaña | 19 |
| 2.1.1 Estado actual..... | 19 |
| 2.2 Ciclo hidrológico..... | 20 |
| 2.2.1 Precipitación..... | 21 |
| 2.2.2 Infiltración..... | 21 |
| 2.2.3 Evapotranspiración..... | 29 |
| 2.2.4 Escurrimiento | 29 |
| 2.2.5 Balance hídrico | 30 |
| 2.3 Percepción remota..... | 30 |
| 2.3.1 El espectro electromagnético | 31 |
| 2.3.2 Bandas espectrales..... | 32 |
| 2.3.3 Clasificación de los sensores | 33 |
| 2.3.4 Aplicaciones | 34 |
| CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS..... | 35 |
| 3.1 Localización del área de estudio | 35 |

| | |
|--|-----|
| 3.2 Cambio de uso de suelo | 36 |
| 3.2.1 Adquisición de las imágenes multiespectrales | 36 |
| 3.2.2 Delimitación de las imágenes multiespectrales | 38 |
| 3.2.3 Corrección geométrica de las imágenes digitales | 39 |
| 3.2.4 Corrección radiométrica | 39 |
| 3.2.5 Corrección topográfica..... | 40 |
| 3.2.6 Clasificación supervisada..... | 43 |
| 3.3 Pruebas de infiltración..... | 45 |
| 3.3.1 Tamaño de muestra para las pruebas de infiltración..... | 45 |
| 3.3.2 Obtención de datos: | 51 |
| 3.3.3 Manejo de datos | 53 |
| 3.4 Metodología: Balance hídrico | 54 |
| 3.4.1 Precipitación..... | 55 |
| 3.4.2 Evapotranspiración potencial..... | 56 |
| 3.4.3 Escurrimientos: | 59 |
| 3.4.4 Infiltración..... | 61 |
| CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 63 |
| 4.1 Validación de la clasificación supervisada..... | 63 |
| 4.2 Uso de suelo y vegetación 1986-2015 | 65 |
| 4.3 Ganancias y pérdidas del bosque mesófilo de montaña..... | 70 |
| 4.3 Análisis de predicción mediante cadenas de Markov | 70 |
| 4.4 Estimación de conductividad hidráulica y capacidad de infiltración | 72 |
| 4.5 Variables climatológicas | 77 |
| 4.6 Balance hídrico..... | 79 |
| 4.6.1 Estimación de la infiltración, cuenca Río Copalita | 83 |
| 4.6.2 Balance hídrico y usos de suelo y vegetación | 90 |
| 4.6.3 Balance hídrico (porcentajes)..... | 91 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES | 94 |
| CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 96 |
| ANEXOS..... | 102 |

Índice de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Procesos del ciclo hidrológico (Tarbuck <i>et al.</i> , 2005) | 21 |
| Figura 2. Infiltrómetro de doble anillo | 23 |
| Figura 3. Descenso acumulado medido mediante infiltrómetro de doble anillo (sitio 38)... | 24 |
| Figura 4. Tasa de infiltración cm/s (sitio 38)..... | 25 |
| Figura 5. Capacidad de infiltración inicial e infiltración básica (sitio 38)..... | 26 |
| Figura 6. Diagrama de los permeámetros de carga variable. | 27 |
| Figura 7. Diagrama del infiltrómetro de doble anillo | 27 |
| Figura 8. Esquema del espectro electromagnético (Chuvieco, 2008). | 31 |
| Figura 9. Localización del bosque mesófilo de montaña y la cuenca alta del Río Copalita. | 35 |
| Figura 10. Estaciones climáticas y estación hidrométrica la Hamaca | 36 |
| Figura 11. Distribución media mensual de la precipitación en la zona de estudio (1980- 2008). Datos obtenidos de CONAGUA (2014) | 37 |
| Figura 12 Delimitación de la superficie a utilizar de las imágenes multiespectrales. | 38 |
| Figura 13. Mapa de sombras de la zona de estudio..... | 41 |
| Figura 14. Regresión lineal entre el modelo de sombras (Variable independiente) y cada una de las bandas (variables dependientes). | 42 |
| Figura 15. Contraste entre una imagen corregida y una sin corrección sobre la misma superficie en una composición en falso color 432 Landsat 5..... | 42 |
| Figura 16. Sitios de entrenamiento para la clasificación supervisada de las imágenes multiespectrales..... | 44 |
| Figura 17. Mapas del total anual de precipitación, escurrimientos e infiltración y tipos de coberturas de la cuenca para 1987 | 46 |
| Figura 18. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) y mapa de evapotranspiración potencial (EVPTP) para 1987 | 46 |
| Figura 19. Sitios de muestreo sobre el mapa de superficies equivalentes en litología y tipos de suelo. | 49 |
| Figura 20. Sitios de muestreo cercanos a Santo domingo Ozolotepec..... | 50 |
| Figura 21. Localización de los sitios de muestreo mediante GPS. | 51 |
| Figura 22. Establecimiento manual del infiltrómetro de doble anillo | 51 |
| Figura 23. Colocación y verificación del infiltrómetro | 52 |
| Figura 24. Disminución del impacto del agua al suelo en el anillo interno..... | 52 |
| Figura 25. Medición del descenso del agua en el anillo interno | 53 |
| Figura 26. Variables del balance hídrico parcial, entradas y salidas | 55 |
| Figura 27. Ecuación lineal de temperatura con altura sobre el nivel del mar | 57 |
| Figura 28. Relación de la conductividad hidráulica con los escurrimientos y la infiltración | 60 |
| Figura 29. Sitios de muestreo para la validez de la clasificación supervisada de imágenes LANDSAT. | 63 |
| Figura 30. Índice de vegetación de Diferencia normalizada 1986- 2015 | 65 |
| Figura 31. Cambios netos en la estructura de vegetación, 1986-2015. | 66 |

| | |
|---|----|
| Figura 32. Contribución neta de cambio por vegetación en km ² el inciso a) indica los cambios netos a bosque de coníferas, b) cambio neto a bosque mesófilo de montaña, c) Cambio neto a bosque de encino, d) cambio neto a zona desprovista de vegetación. | 67 |
| Figura 33. Uso de suelo y vegetación de 1986 por el método de clasificación supervisada | 68 |
| Figura 34. Uso de suelo y vegetación de 2015 por el método de clasificación supervisada | 69 |
| Figura 35. Cobertura espaciotemporal del bosque mesófilo de montaña, 1986-2015..... | 70 |
| Figura 36. Distribución de frecuencias..... | 74 |
| Figura 37. Correlación lineal de la conductividad hidráulica con la altura sobre el nivel del mar (ASNM) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)..... | 74 |
| Figura 38. Correlación lineal de la conductividad hidráulica con los valores de Reflectancia de la superficie en el infrarrojo cercano (SWIR 2) y la temperatura de junio de 2015. | 74 |
| Figura 39. Correlación lineal de la conductividad hidráulica con la pendiente del terreno. 75 | |
| Figura 40. Diagramas de caja de la conductividad hidráulica por tipos de vegetación..... | 75 |
| Figura 41. Diagramas de caja de la conductividad hidráulica por tipos de suelo | 76 |
| Figura 42. Conductividad hidráulica por tipos de suelo y litología..... | 77 |
| Figura 43. Conductividad hidráulica interpolada | 77 |
| Figura 44. Distribución de los datos de precipitación anual periodo 1980-2008..... | 78 |
| Figura 45. Temperatura media observada, periodo 1980-2008. | 78 |
| Figura 46. Balance hídrico mensual (1986) | 80 |
| Figura 47. Balance hídrico mensual (1989) | 80 |
| Figura 48. Balance general para el año 1986..... | 81 |
| Figura 49. Balance general para el año 1989..... | 82 |
| Figura 50. Mapa de infiltración de la superficie de la cuenca (1986)..... | 84 |
| Figura 51. Mapa de infiltración de la superficie de la cuenca (1989)..... | 85 |
| Figura 52. Mapa de infiltración de la superficie de la cuenca y bosque mesófilo (1986-1989)..... | 87 |
| Figura 53. Variables hídricas en el bosque mesófilo (1986) | 88 |
| Figura 54. Variables hídricas en el bosque mesófilo (1989) | 89 |
| Figura 55. Orden de magnitud de las variables por tipos de uso de suelo y vegetación (1986,1989) | 93 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Bandas en el espectro electromagnético del sensor TM del satélite Landsat. | 32 |
| Tabla 2. Aplicaciones de percepción remota en la investigación | 34 |
| Tabla 3. Imágenes adquiridas para el análisis de cambio de uso de suelo (Path 24, Row 49)..... | 37 |
| Tabla 4. Datos de las imágenes satelitales adquiridas | 38 |
| Tabla 5. Tipos de coberturas a considerar y las mostradas en datos vectoriales de INEGI | 44 |
| Tabla 6. Estadísticos para la determinación del tamaño de muestra de las pruebas de infiltración..... | 47 |
| Tabla 7. Valores estimados para el cálculo del tamaño de muestra..... | 47 |
| Tabla 8. Descensos y tiempos (sitio 28)..... | 53 |
| Tabla 9. Valores de la expresión de Horton (sitio 28)..... | 54 |
| Tabla 10. Estaciones climatológicas utilizadas con información climatológica de la zona de estudio..... | 56 |
| Tabla 11. Valores de correlación de Pearson entre altura sobre el nivel del mar y temperatura | 57 |
| Tabla 12. Balance hídrico parcial de la zona de estudio, 1989..... | 61 |
| Tabla 13. Análisis de precisión para la clasificación supervisada de 2015. (BM-bosque mesófilo, BC-bosque de coníferas, BE-bosque de encino, SC-selva caducifolia, SSC-selva subcaducifolia, VI-Vegetación inducida, ZP-zona poblada, CA-cuerpos de agua)..... | 64 |
| Tabla 14. Superficies de las coberturas de vegetación de 1986 y 2015. | 66 |
| Tabla 15. Probabilidad de permanencias y cambios mediante cadenas de Markov..... | 71 |
| Tabla 16. Superficies por tipos de suelo para 2030 mediante cadenas de Markov | 71 |
| Tabla 17. Valores puntuales de conductividad hidráulica y capacidad de infiltración | 73 |
| Tabla 18. Distribución de frecuencias de los datos de conductividad hidráulica | 73 |
| Tabla 19. Balance general de la cuenca (1986 1989)..... | 79 |
| Tabla 20. Balance hídrico por tipos de uso de suelo y vegetación considerando superficies (1986) | 90 |
| Tabla 21. Balance hídrico por tipos de uso de suelo y vegetación considerando superficies (1989) | 91 |
| Tabla 22. Balance hídrico porcentual por tipos de uso de suelo y vegetación (1986) | 92 |
| Tabla 23. Balance hídrico porcentual por tipos de uso de suelo y vegetación (1989) | 92 |

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

La dinámica de los recursos hídricos en una cuenca hidrológica es influenciada por diversos factores. Entre los más importantes encontramos la composición y profundidad del suelo, el tipo de vegetación, la topografía, pendiente de captación, prácticas de manejo forestal, entre otros (Buckzo *et al.*, 2006; Bens *et al.*, 2007; Gaberščik y Murlis, 2011; Neris *et al.*, 2013; Khare *et al.*, 2014; Perkins *et al.*, 2014; Muñoz *et al.*, 2015 a). Estos factores y sus combinaciones tienen influencia directa en los fenómenos producidos dentro del ciclo hidrológico y por lo tanto en la disponibilidad del agua.

Los problemas de escases del agua están asociados a los cambios en los patrones climáticos, acentuados por la disminución de los ecosistemas forestales y el incremento poblacional. Debido a los cambios de cobertura vegetal y degradación de suelos, grandes cantidades de agua se pierden en el paisaje por escurrimientos influyendo en el clima local y en la erosión del suelo. La escasez de agua es solo parte de la problemática generada por el manejo no sustentable de los recursos naturales (Gaberščik y Murlis, 2011; Khare *et al.*, 2014).

Los bosques y selvas proporcionan una serie de servicios conocidos como servicios ambientales, estos son captura de carbono, producción de oxígeno, control del ciclo del agua, amortiguamiento ante eventos extremos, protección de suelos y fauna, conservación de la biodiversidad, belleza escénica, recreación, creación de oportunidades de ecoturismo etc. (Nájera, 2009; Sáenz y Mulligan, 2013). Suelos desprovistos de vegetación en condiciones de relieve montañoso son susceptibles a erosión (Gaberščik y Murlis, 2011; Neris *et al.*, 2013).

En balances hídricos anuales se ha comprobado que las cuencas con vegetación abundante en comparación con aquellas con superficies de menor vegetación aseguran un flujo base mayor en la época de estiaje (Muñoz y Macdonell, 2013; Muñoz *et al.*, 2015 a; Muñoz *et al.*, 2015). En balances hídricos de eventos extremos, las cuencas con menor cobertura vegetal mostraron flujos bases mayores que sus contrapartes. El agua requiere más tiempo para salir de una cuenca boscosa que de una cuenca con pastizales (Roa *et al.*, 2011, Muñoz y Macdonell, 2013, Muñoz *et al.*, 2015; Muñoz *et al.*, 2015 a).

Diversos estudios ponen de manifiesto que la cobertura vegetal influye en el ciclo hidrológico por sus efectos directos en la evapotranspiración, en la reducción de pérdida de agua por escurrimientos, por su funcionalidad como reservorio natural

de agua y sus efectos indirectos al afectar la formación, propiedades y estabilidad de los suelos (Gaberšček y Murlis, 2011, Caballero *et al.*, 2013; Muñoz *et al.*, 2015). La cobertura vegetal entonces es un factor muy importante en el movimiento del agua, ya que su existencia influye en los parámetros del ciclo hidrológico.

La medida principal para fortalecer el ciclo hidrológico y restaurar en gran medida las condiciones hidrológicas originales, es incrementar la capacidad de retención del agua por parte de los ecosistemas. Esto se podría alcanzar mediante reforestación de las zonas desprovistas de cobertura vegetal, proyectos de restauración y protección, y actividades de mitigación de los impactos generados. Muchos estudios han revelado la importancia de la cobertura vegetal en la retención del agua por parte del paisaje y el agua relacionada con la atmósfera (Bens *et al.*, 2007; Gaberšček y Murlis, 2011; Muñoz y Macdonell, 2013; Perkins *et al.*, 2014). El promover y proteger áreas de bosque en regeneración no sólo aseguraría la restauración hidrológica en cuencas, sino también la funcionalidad del ecosistema terrestre en su conjunto (Muñoz *et al.*, 2015).

En la cuenca alta del Río Copalita actualmente se distribuyen distintos tipos de coberturas: bosques de pino, bosques de encino, vegetación inducida, selva perennifolia, selva caducifolia y subcaducifolia, zonas agrícolas y pobladas, cuerpos de agua y el bosque mesófilo de montaña que es uno de los ecosistemas más amenazados a nivel nacional. La cuenca es importante por su biodiversidad así como por las actividades turísticas que se desarrollan como fuente de empleo de muchas familias.

El bosque mesófilo de montaña o bosque de niebla, ecosistema de gran humedad, es considerado como aquel que proporciona mayor recarga hídrica o infiltración a los acuíferos en comparación con los demás ecosistemas, aportando agua limpia y estable en las partes bajas de la cuenca a lo largo del año (García *et al.*, 2004; Aceves, 2012; Caballero *et al.*, 2013; Sáenz y Mulligan, 2013). El estudio de este ecosistema y su relación con el ciclo hidrológico toma relevancia ya que el 18 % de la superficie de la cuenca es bosque mesófilo. Se necesitan estudios que analicen como este ecosistema influyen en el proceso hidrológico para asegurar la buena gestión de estos recursos.

Se han detectado cambios de uso de suelo a lo largo de la Cuenca, por lo que el objetivo del presente es determinar la cobertura actual del bosque de niebla en comparación con su estadio en años anteriores (1986-2015) y su relación con la infiltración hídrica. El estudio también abarca los demás tipos de vegetación como marco de comparación. Se utilizan técnicas de percepción remota apoyadas de

sistemas de información geográfica que proporcionan mayor detalle que los métodos tradicionales.

1.2 Antecedentes

Zhang *et al.* (2010) mencionó que alrededor del mundo han encontrado condiciones del suelo más secos por debajo de los bosques. Estos tienen la capacidad de utilizar más agua que otros tipos de vegetación (selva baja, matorrales, etc.) principalmente reflejado en dos procesos: transpiración, el agua es absorbida desde el suelo por las raíces y se evapora a través de los poros de las hojas y la interceptación, que es la evaporación directa de las superficies de hojas durante precipitaciones y, en el caso de árboles y arbustos, de las ramas y troncos. El autor concluyó que la recarga de un acuífero incrementa cuando el bosque es reemplazado por tierras agrícolas y que disminuye cuando las tierras agrícolas son reemplazadas por bosques.

Chirino (2003), mencionado por Andreu *et al.* (2012) indicó que el incremento de la estructura y cobertura vegetal aumentan la interceptación y el consumo hídrico. Esto a su vez incrementa la transpiración, reduce la precipitación neta y el drenaje profundo, y por lo tanto la recarga al acuífero disminuye.

Krishnaswamy *et al.* (2013) mencionó que este fue uno de los paradigmas más importantes del siglo XX en la hidrología terrestre. Dicho paradigma se puede resumir de la siguiente manera: la acumulación de la biomasa forestal lleva a una disminución del flujo corriente por el aumento de la evapotranspiración y viceversa.

Sin embargo, especialmente para las zonas tropicales, Bruijnzeel (2004) propuso la “hipótesis disyuntiva entre la infiltración y la evapotranspiración”. Esta hipótesis establece que bajo ciertas condiciones, la capacidad de infiltración de un bosque con baja biomasa, puede estar deteriorada hasta tal punto, que los efectos sobre el retraso en el flujo o caudal en la estación seca serían perjudiciales, incluso teniendo en cuenta las ganancias derivadas de la reducción de la evapotranspiración.

Ahora bien las propiedades del suelo del bosque como la repelencia al agua son factores claves en procesos hidrológicos del suelo. La capa orgánica (humus) actúa como la interfaz entre el suelo y los fenómenos atmosféricos, incluyendo la precipitación. Aunque los horizontes más bajos sean susceptibles a erosión la capa funciona como protector al suelo.

Las características del humus pueden dar lugar a importantes cambios en los valores de infiltración y escorrentía, independientemente de estos parámetros en el suelo bajo esta capa. La repelencia al agua limita la infiltración de agua, mientras que la cohesión reduce la presencia de las trayectorias de flujo preferenciales que

permiten al agua de lluvia llegar a los horizontes subyacentes. Tanto la repelencia al agua del suelo y las propiedades hidráulicas dependen de las especies de árboles y de la edad, las prácticas de manejo forestal, así como la estación del año. Es esencial incluir estas propiedades de suelo forestal como parámetros en los modelos hidrológicos (Neris *et al.*, 2013, Buczko *et al.*, 2006).

Huang *et al.* (2013) mencionó que la cobertura vegetal, la pendiente y la intensidad de lluvia tienen incidencia directa en los patrones de infiltración. El grado en el que el agua penetra a través de la superficie de la tierra depende de las condiciones de dicha superficie y de sus características físicas. La cubierta vegetal, la profundidad del suelo, las características del subsuelo, los residuos vegetales presentes en el suelo, también influyen sobre la cantidad y movimiento del agua al penetrar por la capa superficial del terreno (Hernández y López, 2005).

Shammas (2007) realizó un estudio en un bosque de niebla situado al sureste de la península arábiga, en Jabal Al Qara, en el que se estimó el aporte al acuífero por parte de este tipo de vegetación, se obtuvo que entre un 60 y 80 % de la recarga del subsuelo proviene de la interacción entre los árboles y la niebla, llamada precipitación horizontal. Los experimentos de campo demostraron la importancia de la vegetación como fuente de recarga del subsuelo, contribuyendo en la precipitación horizontal de la niebla.

Návar (2011) estimó la contribución del escurrimiento fustal al contenido de humedad del suelo y recarga hídrica. Concluyó que es muy probable que el escurrimiento fustal contribuya a la recarga hídrica solo para eventos de lluvia mayores a 15 mm.

1.2.1 Trabajos en la cuenca Río Copalita

Rodríguez (2012) determinó la disponibilidad del agua y riesgo hidrológico en los escurrimientos de la cuenca Río Copalita, con un modelo estocástico. El autor concluyó que si no se desarrolla un plan a mediano plazo para captar agua en un periodo de 6 a 8 años, la cuenca podría tener problemas de desabasto.

Ramírez (2014) aplicó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para el análisis del flujo base en la cuenca Río Copalita para 1973. Obtuvo un Índice de eficiencia de Nash Sutcliffe de la calibración con una eficiencia de 0.855 para biomasa anual, escurrimiento anual 0.949 y mensual 0.866, flujo base mensual 0.424. Estos trabajos se realizaron en la cuenca Río Copalita, utilizando imágenes Landsat de 1973 y las cartas de suelo de INEGI (no realizaron análisis de cambios

de uso de suelo y vegetación) para alimentar los modelos hidrológicos del estado actual de la cuenca. Un análisis previo comprobó las cartas de uso de suelo y vegetación tenían deficiencias a razón de la resolución espacial utilizada para las clasificaciones.

1.2.2 Uso de percepción remota para el análisis de vegetación.

Muñoz y López (2008) estimaron el cambio de uso de suelo a partir de imágenes Landsat en una zona montañosa tropical en Veracruz, en el periodo de 1990-2003, utilizaron datos auxiliares de un Modelo Digital de Elevación para mejorar la discriminación de categorías. El sensor TM resultó lo suficientemente sensible para separar los patrones espectrales entre coberturas. Encontraron que la cobertura bosque mesófilo de montaña fue sustituida en gran parte por zonas de agricultura.

Wang y Huang (2012) analizaron la heterogeneidad espacial de un bosque de niebla en una montaña tropical a partir de imágenes QuickBird. Este estudio demostró la viabilidad de la integración de sistema de información geográfica (SIG), técnicas de campo, teledetección y para cuantificar la estructura forestal a escala de paisaje.

Donia y Noha (2013) obtuvieron todos los insumos para el modelado hidrológico (predicción de la escorrentía y la producción de sedimentos) en una cuenca en Karún, Egipto a partir de imágenes Landsat y un Modelo Digital de Elevación.

1.3 Planteamiento del problema

Los principales problemas que existen en la cuenca y en la mayoría de los municipios de la costa oaxaqueña son los relacionados con la alta explosión demográfica y desarrollo turístico.

Los cambios de uso de suelo (superficie de vegetación natural destinada a otros usos: cultivo de café, desarrollo ganadero forestal, entre otros) más recurrentes y merman la vegetación original. Las consecuencias son la fragmentación de ecosistemas, desertificación, deslaves, erosión, cambio del microclima, y entre los más importantes, la disminución y contaminación del agua (Arriaga, 2000).

Los cambios en el clima global también afectan a los recursos naturales. Algunos estudios indican que las variaciones climáticas pueden generar contracciones en la distribución de ecosistemas vegetales favoreciendo a las coberturas herbáceas

sobre la arbórea (Gómez y Arriaga, 2007; Notaro, 2008; Téllez y Dávila, 2003). Wu *et al.* (2015) mencionan que diferentes tipos de vegetación responden de diferentes maneras a los cambios de los factores climáticos.

Para el adecuado manejo de los recursos naturales y entre estos los recursos hídricos es determinante conocer los componentes que influyen al ecosistema.

La cuenca Río Copalita representa la principal fuente de abasto de agua para el complejo turístico de bahías de Huatulco, por lo que es necesario generar estrategias a partir de métodos científicos que permitan la conservación y aprovechamiento sustentable de la cuenca.

1.4 Justificación

1.4.1 Técnica y científica

El trabajo generará experiencia en la integración de la percepción remota y análisis de recursos hídricos. La combinación de métodos probabilísticos con los resultados del análisis temporal de vegetación permitirá obtener una proyección a futuro de los recursos de la cuenca.

La investigación contribuirá a explicar con bases científicas la relación de los bosques tropicales con los recursos hídricos. Los resultados servirán como herramienta para los tomadores de decisiones y gestores de la cuenca.

1.4.2 Social

La Comisión Nacional del Agua, ha detectado que en diversas regiones, entidades federativas y localidades del país, los volúmenes de agua concesionados superan el escurrimiento y la recarga de los acuíferos (NOM-011-CNA-2000).

Una situación de escasez en este recurso generaría conflictos entre los usuarios y otros efectos perjudiciales, a partir de los resultados, se podrán generar estrategias que aseguren la disponibilidad de este y los recursos asociados a través del tiempo, tomando en cuenta que la población ha incrementado en la zona de estudio.

Por esa razón, es importante, conocer el estado que guarda el bosque de niebla con el sistema acuífero de Huatulco como zona de recarga, considerando además, que la zona es importante por su actividad turística y los efectos socioeconómicos que se desprenden.

1.4.3 Ambiental

Es importante conocer las zonas de recarga e infiltración de las cuencas hidrográficas, a razón de maximizar la protección de dichos lugares para el continuo mantenimiento de los recursos hídricos en calidad y cantidad, además, la zona de estudio se encuentra en totalidad dentro de la Región Terrestre Prioritaria denominada Sierra Sur y Costa de Oaxaca.

Durham *et al.* (2003) menciona que para asegurar una gestión sostenible de agua subterránea, se requiere de un conocimiento fiable de la disponibilidad de recursos, recarga y la demanda. Este proyecto se centra en la recarga hídrica por infiltración, por lo que la información obtenida concluida la investigación, reforzará las herramientas para la gestión sostenible de los recursos involucrados, con la intención de disminuir los impactos al ecosistema.

1.5 Hipótesis

La superficie de bosque mesófilo en la cuenca Río Copalita se ha reducido más de 50 % en los últimos 30 años como consecuencia de actividades antropogénicas.

Los cambios de uso de suelo en la cuenca Río Copalita han afectado los rangos de infiltración, reduciendo los aportes a la recarga del subsuelo.

Debido a sus características hidrogeológicas, el tipo de vegetación de mayor aporte a la infiltración en la cuenca Río Copalita es el bosque mesófilo de montaña.

1.6 Objetivos

General

- ▶ Determinar la cobertura actual del bosque mesófilo de montaña en la cuenca Río Copalita en comparación con su estadio en años anteriores y sus patrones de infiltración, para fundamentar que este ecosistema es el de más aporte hídrico al subsuelo con respecto a los otros tipos de vegetación distribuidos en la zona.

Específicos

- ▶ Realizar el análisis espacio temporal de los cambios de uso de suelo y vegetación en la cuenca Río Copalita mediante el análisis de imágenes satelitales, periodo 1986-2015.
- ▶ Realizar una predicción de la evolución de los ecosistemas en la cuenca a partir de imágenes satelitales y métodos probabilísticos.
- ▶ Generar la cartografía de las variables que influyen específicamente en la infiltración (pendiente, vegetación, suelo, precipitación, escorrentía) de la zona de estudio para la realización de balances hídricos mediante álgebra de mapas.
- ▶ Calcular los rangos de infiltración en la superficie de la cuenca y en sus distintos usos de suelo y vegetación como marco de comparación con el bosque mesófilo.
- ▶ Calcular los aportes a la infiltración hídrica de los usos de suelo y vegetación para determinar el ecosistema de mayores aportes.

1.7 Limitaciones y alcances de la investigación

La selección de imágenes satelitales estuvo sujeta a disponibilidad y visibilidad de los elementos del paisaje (cuenca), la nubosidad fue una limitante. Cualquier efecto producido en las imágenes analizadas por diferencias en la temporada de adquisición de datos se redujo mediante correcciones digitales.

El análisis de cambios de uso de suelo se pudo realizar hasta la actualidad, pero los datos de las estaciones climatológicas y la estación hidrométrica de la cuenca contienen información limitada.

El balance propuesto fue un balance parcial de aguas superficiales. Por lo que las pruebas de infiltración se realizaron de la porción superficial de suelo, abarcando la capa orgánica y el primer horizonte de suelo formado.

La temperatura afecta la viscosidad de los fluidos y por lo tanto es un factor a considerar al analizar los recursos hídricos, pero por la magnitud de los valores obtenidos en la conductividad hidráulica así como en la capacidad de infiltración de la zona y el amplio gradiente de temperatura a lo largo de la cuenca, las variaciones generadas por este factor, no fueron consideradas.

Diversos factores como la composición de la capa orgánica, contenido de humedad inicial, presión capilar, presión del líquido y otros no considerados pueden estar afectando los resultados obtenidos. Debido a la complejidad del sistema se simplificaron algunas propiedades, se consideró al suelo como un medio isótropo, poco tortuoso y se tomaron también las limitaciones propias de la ley de Darcy.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Bosque mesófilo de montaña

Este tipo de vegetación se distribuye en las laderas y cañadas húmedas de la Sierra Madre de Oaxaca, y la Sierra Madre del Sur.

Se establecen entre 1000 y 2500 msnm en donde predominan climas semicálidos y templados húmedos. El ecosistema se caracteriza por la presencia de árboles de varios estratos, abundancia de helechos, gran cantidad de epífitas, gruesa capa de materia orgánica, suelos profundos arcillosos que se derivan principalmente de rocas metamórficas y afloramientos de rocas volcánicas, temperatura media de 18 grados °C, lluvias frecuentes, humedad atmosférica alta y nubosidad y neblina durante todo el año (Leija *et al.*, 2011; Williams, 2007, García *et al.*, 2004).

La neblina tiene un papel relevante en la distribución y dinámica de estos bosques al proporcionar un ambiente termo regulado y favorecer la presencia de una gran diversidad de flora y fauna (Leija *et al.*, 2011).

2.1.1 Estado actual

Los bosques de niebla o bosque mesófilos de montaña (BMM) son los ecosistemas terrestres más amenazados a nivel nacional. Se estima que más del 50% de la superficie original de bosques de niebla ha sido sustituida por otras formas de uso de la tierra (Toledo *et al.*, 2011).

Contienen la mayor biodiversidad en relación al área que ocupan a comparación de otros ecosistemas. Albergan un alto número de especies endémicas y en riesgo. Son de gran importancia en la regulación de ciclos hidrológicos y son sistemas muy frágiles en términos de su respuesta a la perturbación.

Frecuentemente se localizan en áreas de difícil acceso, presentan árboles con baja calidad maderable debido al crecimiento limitado por las condiciones del suelo, exposición al viento y baja radiación por lo que su productividad maderable es baja.

Sus principales amenazas son el cambio climático, la ganadería, la tala ilegal, la conversión a cultivos agrícolas y la expansión urbana.

La zona de estudio presenta BMM muy fragmentados, pero con una superficie considerable repartida en numerosos manchones de tamaño variable. Gran parte de la superficie se ha convertido en cafetales de sombra. Su cercanía a la zona

turística de Huatulco le confiere una ventaja para el desarrollo de turismo responsable.

La falta de un manejo forestal apropiado ha motivado la reducción del BMM a razón de tres principales causas: (1) los incentivos para prácticas como la ganadería y la agricultura han promovido la transformación del BMM en otros usos del suelo, (2) la limitada información para el aprovechamiento adecuado del BMM y (3) la falta de apoyos para llevar a cabo el manejo sostenible de estos sistemas (Toledo, 2012).

2.2 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico representa la circulación continua del agua de los océanos a la atmósfera, de la atmósfera a los continentes y, desde los continentes, de vuelta al mar. Es impulsado por la energía solar y la gravedad terrestre (Tarbuck *et al.*, 2005; Seiler y Gat, 2007).

El agua se evapora desde el océano y, en mucho menor grado, desde los continentes. Los vientos transportan este aire cargado de humedad a grandes distancias, hasta que las condiciones hacen que la humedad se condense y caiga como precipitación. La precipitación que cae en los océanos ha completado su ciclo y comienza de nuevo. La precipitación que cae al interior de los continentes sufre diversos procesos antes de completar el ciclo.

Parte del agua penetra en el suelo (infiltración) y se mueve hacia abajo, luego en dirección lateral y, por fin rezuma en lagos, ríos o directamente en el océano. Cuando la velocidad de caída de la lluvia es mayor que la capacidad del suelo para absorberla, el agua adicional fluye sobre la superficie en lagos y corrientes, proceso denominado escorrentía.

Gran parte del agua que se infiltra o se escurre vuelve a la atmósfera por medio del proceso de evaporación. Parte es absorbida por las plantas, que después la liberan a la atmósfera mediante el proceso de transpiración. Dada la complejidad para distinguir claramente entre la cantidad de agua que se evapora y la cantidad que es transpirada por las plantas, se suele utilizar el término evapotranspiración para definir el efecto combinado.

Parte del agua del ciclo queda almacenada en el interior de la tierra y en condiciones frías en forma de nieve o hielo en glaciares. Esta agua almacenada queda rezagada del ciclo por tiempo indefinido (Tarbuck *et al.*, 2005).

La Figura 1 muestra los procesos que influyen en el ciclo hidrológico:

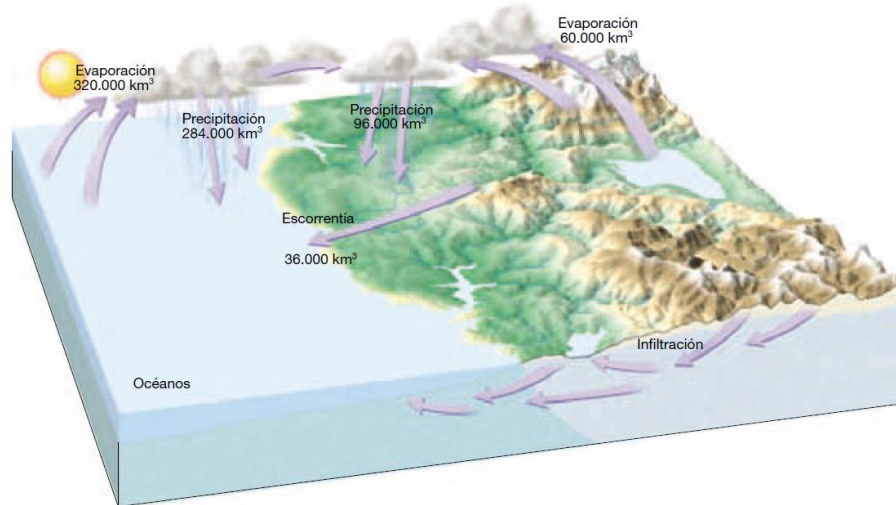


Figura 1. Procesos del ciclo hidrológico (Tarbuck *et al.*, 2005)

2.2.1 Precipitación

Precipitación es cualquier agua meteorológica recogida sobre la superficie terrestre. Incluye básicamente: lluvia, nieve, neblina y granizo. En relación a su origen, pueden distinguirse los siguientes tipos:

Las ciclónicas son las provocadas por los frentes asociados a una borrasca o ciclón. La mayor parte del volumen de precipitación recogido en una cuenca se debe a este tipo de precipitaciones.

Las de convección se producen por el ascenso de bolsas de aire caliente; son las tormentas de verano.

Las precipitaciones orográficas se presentan cuando masas de aire húmedo son obligadas a ascender al encontrar una barrera montañosa.

El estudio de las precipitaciones es básico dentro de cualquier estudio hidrológico regional, para cuantificar los recursos hídricos, puesto que constituye la principal (en general la única) entrada de agua a una cuenca (Sánchez, 2011).

2.2.2 Infiltración

La infiltración es el proceso de transición del agua de precipitación o superficial hacia el subsuelo. A través de la común dependencia de las condiciones hidráulicas de los suelos, la infiltración determina los escurrimientos superficiales,

subsuperficiales o hipodérmicos y la recarga de aguas subterráneas. A menudo la infiltración excede a la recarga en un factor de 100 a 1.7, debido a que el agua infiltrada permanece en las zonas de almacenamiento en la porción no saturada y contribuye al proceso de evapotranspiración y de escorrentías hipodérmicas (Seiler y Gat, 2007; Sánchez, 2011).

El proceso de infiltración está gobernado por una serie de condiciones de entorno, propiedades específicas en la interacción atmósfera-litósfera-biosfera, estructura y composición mineral de los suelos, contenido previo de humedad, cobertura y desarrollo vegetal, aire en los poros, estabilidad de los agregados del suelo e intensidades de lluvia. El conjunto de factores hace que las tasas de infiltración puedan variar en tiempo y espacio, por lo que es recomendable estimar solo el comportamiento medio en una zona de estudio (Seiler y Gat, 2007; Ruggenthaler *et al.*, 2015).

Dentro del subsuelo, el agua se mueve de los puntos con mayor energía hacia los de menor. Dicha energía se denomina potencial hidráulico, y es igual a la altura de la columna de agua (respecto de un nivel de referencia considerado) multiplicada por la aceleración de la gravedad. Otra fuerza que contribuye al potencial hidráulico es la energía cinética pero es despreciable en comparación con otras energías. Al ser la aceleración de la gravedad una constante, la altura de la columna de agua refleja exactamente el potencial hidráulico (Sánchez, 2011, Gabriels *et al.*, 2006).

2.2.2.1 Conductividad hidráulica y capacidad de infiltración

El movimiento del agua en el subsuelo puede ser caracterizado mediante dos variables principales, la conductividad hidráulica (facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido; constante de proporcionalidad lineal entre caudal y el gradiente hidráulico explicada mediante la ley de Darcy) y la capacidad de infiltración (capacidad máxima de absorción de agua en un suelo) (Seiler y Gat, 2007; Sánchez, 2011). La velocidad a la que el agua subterránea se mueve (conductividad hidráulica) es la causa principal del porque un río puede continuar llevando agua aún en épocas secas (Sánchez, 2011).

La capacidad de infiltración varía de acuerdo al tamaño de sedimentos y topografía. Suelos con granos gruesos tienen alta capacidad de infiltración. Suelos de granos finos, baja capacidad. Suelos de zonas planas, alta capacidad y suelos en zonas montañosas baja capacidad (Seiler y Gat, 2007). Los valores de conductividad hidráulica (k) están influenciados por: textura y estructura del suelo, contenido de

aire del suelo, grietas en suelos expandibles, galerías de lombrices, canales de raíces viejas y otros (Gabriels *et al.*, 2006).

Los métodos más utilizados para la estimación de estos parámetros en campo son (Gabriels *et al.*, 2006; Seiler y Gat, 2007):

- Simulación de lluvia
- Método del pozo
- Piezómetro
- Infiltrómetros (infiltrómetro de doble anillo, de tensión, de disco)
- Permeámetro de Guelph
- Monitoreo de los cambios en el contenido de agua en la zona insaturada durante los eventos de infiltración
- Análisis de descargas en ríos.

La selección del método e instrumento de medición va a depender del propósito de la medición. El infiltrómetro de doble anillo y el Permeámetro de Guelph han sido ampliamente utilizados con resultados satisfactorios (Gabriels *et al.*, 2006). El método que se utilizó en el presente trabajo fue el método DRI (infiltrómetro de doble anillo).

2.2.2.2 Método DRI (infiltrómetro de doble anillo)

El Infiltrómetro de doble anillo (Figura 2) se basa en dos cilindros separados, usados para determinar la tasa de infiltración, infiltración acumulada, capacidad de infiltración y la conductividad hidráulica saturada, estos valores pueden ser evaluados en los diferentes horizontes del suelo (Gabriels *et al.*, 2006).



Figura 2. Infiltrómetro de doble anillo

Los dos cilindros concéntricos son instalados con el propósito de reducir el flujo lateral en el cilindro interno. El método consiste en enterrar parcialmente el infiltrómetro en el suelo y colocar un nivel constante o variable de agua dentro de él. Se mide cuánta agua penetra en el suelo por unidad de área y tiempo. La tasa de infiltración final constante puede ser dada usando la ley de Darcy y la capacidad de infiltración mediante la ecuación de Horton.

Durante la medición es necesario tener cuidado de que la carga de agua en el interior y fuera del cilindro anillo sea igual; de lo contrario puede ocurrir flujo lateral entre los dos anillos. Ambos anillos deben enterrarse hasta una profundidad de al menos 10 cm para reducir el flujo lateral a un mínimo. Normalmente toma largo tiempo antes de que la tasa de infiltración se haga constante. El resultado, aunque no siempre exacto, da una aproximación buena de la situación del campo.

2.2.2.3 Descenso y tasa de infiltración

Las Figuras 3 y 4 muestran la forma general en que el descenso acumulativo y la tasa de infiltración se comportan en el tiempo.

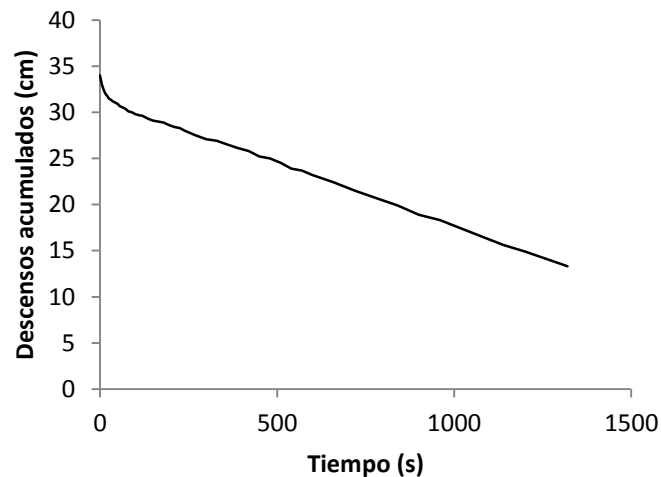


Figura 3. Descenso acumulado medido mediante infiltrómetro de doble anillo (sitio 38)

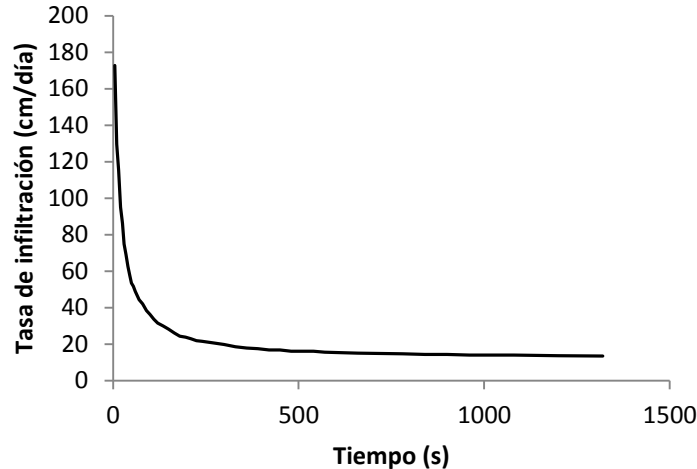


Figura 4. Tasa de infiltración cm/s (sitio 38)

El comportamiento inicial de la tasa de infiltración está dominada por la absorción capilar que depende de la estructura, estabilidad y humedad inicial del suelo, los valores en esta parte de la curva son los más altos. La curva desciende hasta lograr un estado estacionario o constante que es dominado por la gravedad inducida al flujo (Minasny y George, 1999).

Los valores de los descensos acumulados en el tiempo (Figura 3), una vez alcanzada la asíntota en la tasa de infiltración (Figura 4), son utilizados para calcular la conductividad hidráulica mediante la ecuación de Darcy.

2.2.2.4 Estimación de la capacidad de infiltración

La estimación de la Capacidad de Infiltración se puede realizar mediante la expresión de Horton quien estableció que, para cualquier suelo bajo lluvia constante, la velocidad de infiltración decrece en el tiempo de acuerdo a la siguiente ley (Monsalve, 1999; Guevara y Cartaya, 2004):

$$F = F_b + (F_0 - F_b)e^{-K*t}$$

Donde:

f_0 =capacidad de infiltración inicial o máxima

f_b =capacidad de infiltración básica o mínima

K = constante de decaimiento

t =tiempo desde el inicio del ensayo

Los valores de F_0 y F_b se obtienen de la gráfica de la tasa de infiltración, la constante K se obtiene de tablas o generando la función logarítmica y extrayendo la constante

de decaimiento. Una vez obtenida la ecuación específica por sitio muestreado, graficando la ecuación a escala logarítmica, se obtiene un valor asintótico, este valor es igual a la capacidad de infiltración (Figura 5). Si la capacidad de infiltración es mayor que la precipitación, toda el agua se infiltra.

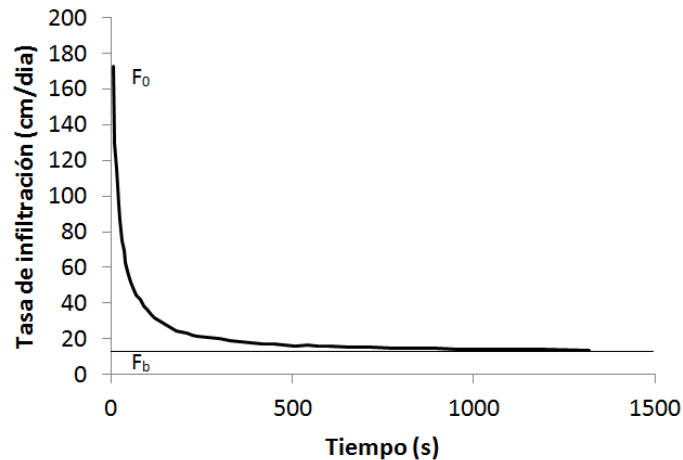


Figura 5. Capacidad de infiltración inicial e infiltración básica (sitio 38)

2.2.2.5 Estimación de la conductividad hidráulica

El infiltrómetro de doble anillo pertenece a la categoría de permeámetros de carga variable. La cantidad de agua escurrida es medida en forma indirecta por medio de la observación de la relación entre la caída del nivel de agua en un tubo recto colocado sobre la muestra y el tiempo transcurrido (Angelone *et al.*, 2006).

La Figura 6 muestra el diagrama de un permeámetro de carga variables. Los mismos datos del permeámetro pueden ser localizados en el infiltrómetro de doble anillo (Figura 7).

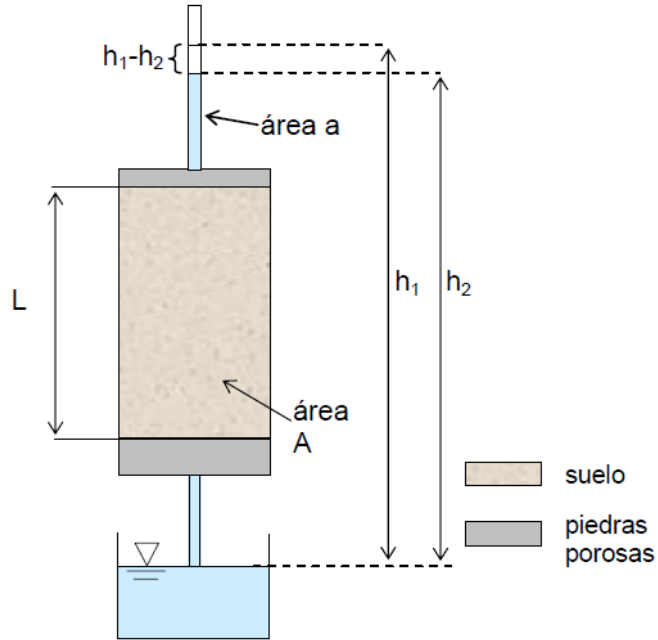


Figura 6. Diagrama de los permeámetros de carga variable.

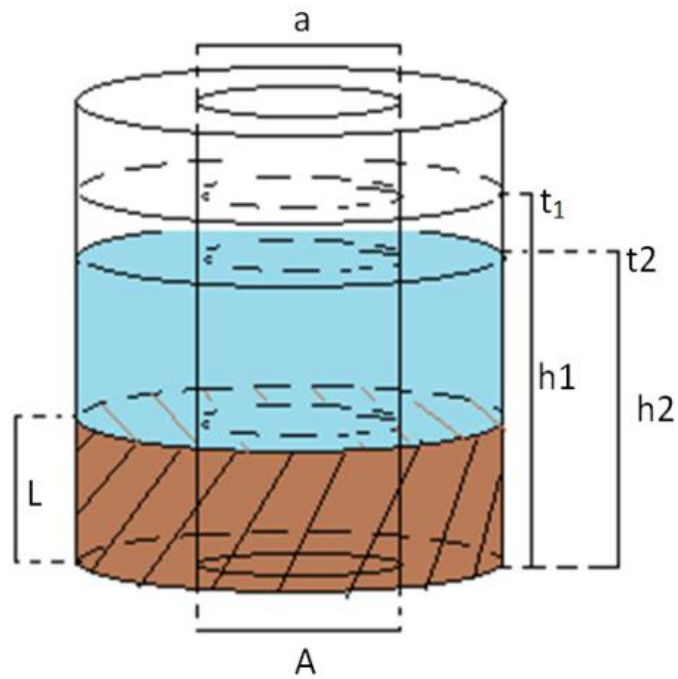


Figura 7. Diagrama del infiltrómetro de doble anillo

Donde:

h_1 : altura del agua en t_1

h_2 : altura del agua en t_2

h : altura del agua intermedia en un tiempo t

a : sección de entrada

A : sección de salida

L : longitud de la línea de infiltración

A partir de la ecuación de Darcy, se obtuvo la ecuación para el cálculo de la conductividad hidráulica (Angelone *et al.*, 2006; Sánchez, 2011):

$$\text{Eq.1 } Q = aV$$

$$\text{Eq.2 } V = \frac{dh}{dt}$$

$$\text{Eq.3 } Q = kiA$$

$$\text{Eq.4 } i = h/L$$

Donde:

Q= caudal

K= conductividad hidráulica

I= gradiente hidráulico (carga hidráulica sobre la longitud de la línea de infiltración)

a= sección de entrada

A= sección de salida

h= carga hidráulica

L=Longitud de la línea de infiltración

Eq.3 igualando con Eq. 1 y 2

$$k \frac{h}{L} A = a \frac{dh}{dt}$$

Agrupando ecuaciones:

$$\frac{k}{L} A dt = \frac{a}{h} dh$$

Integrando dt y dh:

$$\frac{k}{L} A \int_{t_1}^{t_2} dt = a \int_{h_1}^{h_2} \frac{1}{h} dh$$

$$\frac{k}{L} A (t_2 - t_1) = a \ln \frac{h_2}{h_1}$$

Despejando k:

$$\text{Eq.4 } k = \frac{La}{A(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_2}{h_1}$$

a=A por lo tanto:

$$\text{Eq.5 } k = \frac{L}{(t_2 - t_1)} \ln \frac{h_2}{h_1}$$

Los valores t_2 y t_1 así como sus descensos corresponden a valores de la tasa de infiltración una vez alcanzado un estado estático o de equilibrio.

2.2.3 Evapotranspiración

Evapotranspiración es el conjunto de dos procesos diferentes: la evaporación y la transpiración. La evaporación es un fenómeno físico, en el que el agua pasa de líquido a vapor. Se produce inmediatamente después de la precipitación desde la superficie del suelo y plantas, continuamente desde las superficies de cuerpos de agua, y durante épocas de estiaje de las capas superiores de los suelos.

La transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas pierden agua por efectos de la atmósfera. Toman agua del suelo a través de sus raíces, utilizan una pequeña parte para su crecimiento y el resto lo transpiran (Sánchez, 2011).

Dentro del ciclo hidrológico, la evapotranspiración es la segunda variable en cantidad después de la precipitación. Por ello es determinante estimarla con precisión para proporcionar datos de calidad a fin de asegurar una gestión adecuada de los recursos hídricos. La evapotranspiración potencial (EVPTP) se define como a la evapotranspiración que se produciría si la humedad del suelo y la cobertura vegetal estuvieran en condiciones óptimas. La evapotranspiración real (EVPTR) es la que se produce realmente en las condiciones imperantes del medio.

La variación espacial por latitud, longitud, altitud, medio ambiente, y las condiciones específicas del sitio son fuentes de variación para la estimación de la evapotranspiración real. Las características que facilitan la medición del parámetro son: que las variaciones en tiempo y lugar son pequeñas, las fluctuaciones estacionales son conocidas, y los rangos son limitados cuando el agua no es factor limitante (Abtey y Melesse, 2013).

2.2.4 Esguerrimiento

Esguerrimiento es la parte de la precipitación que no es evaporada ni infiltrada. Es el componente único de las corrientes superficiales que regresan al mar o a los cuerpos de agua interiores. Se clasifica en diversos componentes: Esguerrimientos superficiales, subsuperficiales o hipodérmicos y subterráneos (Sánchez, 2011).

Los esguerrimientos superficiales son aquellos que esguerran en la superficie, forman corrientes de agua que contribuyen al proceso de evaporación hasta su llegada al mar (estos esguerrimientos junto con los hipodérmicos forman parte de la esguerrentía directa). Los esguerrimientos hipodérmicos, son los que tras un corto recorrido lateral, antes de llegar a la zona saturada acaban saliendo nuevamente a la superficie. Los esguerrimientos subterráneos son los que circulan bajo la superficie terrestre, son

más lentos que los superficiales y confieren al ciclo hidrológico características fundamentales, como que los ríos continúen con caudal mucho tiempo después de las últimas precipitaciones (escorrentía básica). La generación de estos componentes depende de las características hidráulicas de los suelos y varían en el espacio y tiempo (Seiler y Gat, 2007; Sánchez, 2011).

2.2.5 Balance hídrico

Custodio y Llamas (1983) mencionan que el balance hídrico no es más que la aplicación del principio de la conservación de la masa (Ecuación de la continuidad) a una cierta región definida por unas determinadas condiciones de contorno. Se considera un volumen conocido y cierto tiempo en el que se realiza el balance, la diferencia entre el total de entradas y el total de salidas debe ser igual al cambio de agua en almacenamiento en ese volumen.

El establecimiento de un balance supone medir flujos de agua (caudales) y almacenamiento (niveles), aunque con una apropiada selección de la región y del periodo de tiempo, se pueden suprimir algunas medidas y términos.

Se pueden establecer balances generales, que incluyen las aguas superficiales y subterráneas, y balances parciales; de sólo aguas superficiales, de un acuífero, del agua del suelo, de una porción del sistema, etc.

Si las entradas superan a las salidas existe una acumulación (aumento del almacenamiento) y lo contrario si las salidas superan a las entradas.

2.3 Percepción remota

La percepción remota es una actividad multidisciplinaria que se ocupa del inventario, monitoreo y evaluación de los recursos naturales, tras el análisis de los datos obtenidos a través de observaciones de una plataforma a distancia. Dicha plataforma puede ser un avión, un globo o satélites destinados a este propósito.

Es una técnica de deducción de información de un objeto, área o fenómeno a través del análisis de datos adquiridos por un dispositivo (sensor) que no tiene contacto físico con el objeto de estudio.

El proceso de percepción remota puede ser explicado de la siguiente manera (Jain, 2004):

1. Es necesaria una fuente de energía electromagnética (sol, fuente propia).
2. Transmisión de la energía de la fuente a la superficie de la tierra.
3. Parte de la energía es absorbida y dispersada por la atmósfera.
4. Ocurre una interacción entre la radiación electromagnética y la superficie de la tierra.
5. Parte de la energía es transmitida, parte es absorbida y parte reflejada, esta última es la que regresa al sensor.
6. Los datos adquiridos por el sensor son transformados en una señal digital.
7. El sensor envía estos datos a algún receptor en la tierra.
8. La información es almacenada para su procesamiento.
9. El procesamiento de datos genera productos con diferentes niveles de exactitud empleando distintas correcciones.
10. Los datos son interpretados.

2.3.1 El espectro electromagnético

Cualquier tipo de superficie refleja energía (radiación) a diferentes longitudes de onda que pues ser medida mediante sensores, dicha energía forma parte de lo que se conoce como espectro electromagnético (Figura 8).

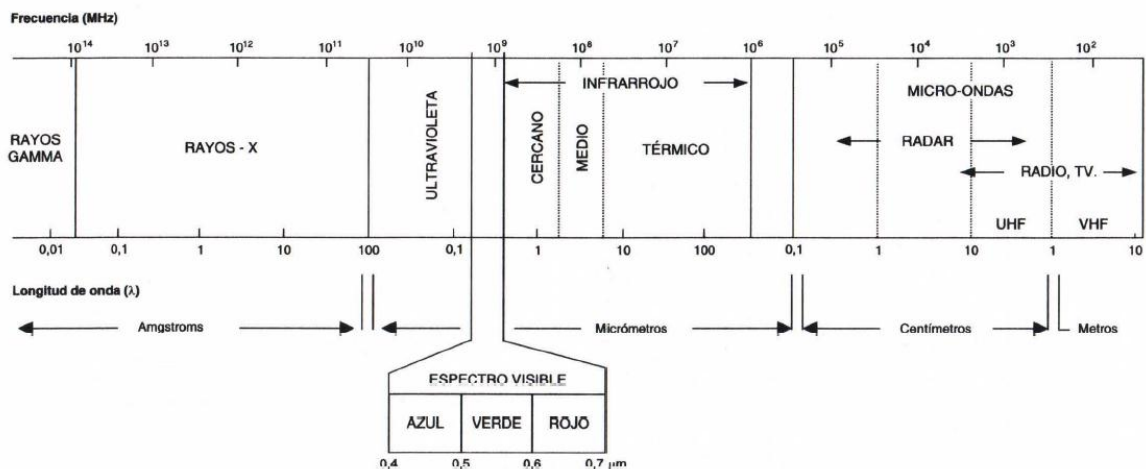


Figura 8. Esquema del espectro electromagnético (Chuvienco, 2008).

El ojo humano solo puede ver la parte de los 0.4 μm a 0.7 μm del espectro, esta parte es conocida como espectro visible, pero los sensores remotos tienen acceso a mayores longitudes de onda. Suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética se comporta de una manera similar (Chuvienco, 2008).

Aunque el espectro electromagnético se extiende infinitamente desde longitudes de onda larga (Ondas de radio) hasta longitudes de onda corta (Rayos gamma), la mayoría de sus regiones no se pueden utilizar para la detección a distancia debido a ciertas limitaciones prácticas (Jain, 2004).

La sucesión de valores de longitud de onda es continua, sin embargo, suelen establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar (Chuvieco, 2008). El satélite Landsat en su sensor TM tiene la siguiente configuración (Tabla 1):

| Modo espectral | Resolución | | | | |
|----------------|-------------------|-------------------------------|------------|--------------|----------|
| | Espacial (Metros) | Espectral (micrómetros) | | Radiométrica | Temporal |
| Pancromática | 15 | Banda 8 Pancromática | 0.52- 0.90 | 8 Bits | 16 Días |
| Multiespectral | 30 | Banda 1. Azul | 0.45- 0.52 | | |
| | | Banda 2. Verde | 0.53- 0.61 | | |
| | | Banda 3. roja | 0.63- 0.69 | | |
| | | Banda 4. Infrarrojo cercano 1 | 0.78- 0.90 | | |
| | | Banda 5. infrarrojo cercano 2 | 1.55- 1.75 | | |
| | | Banda 6. Infrarrojo medio | 2.09- 2.35 | | |

Tabla 1. Bandas en el espectro electromagnético del sensor TM del satélite Landsat.

Cada superficie u objeto refleja de manera diferente la radiación electromagnética a lo largo del espectro. El conjunto de los valores de la magnitud de una superficie dada a lo largo del espectro electromagnético se conoce como firma espectral.

La identificación de las firmas espectrales de las coberturas permite mediante métodos electrónicos la clasificación de la imagen multiespectral en sus componentes principales (Chuvieco, 2008).

2.3.2 Bandas espectrales

Chuvieco (2008) menciona que las bandas más frecuentemente usadas en la actualidad son las siguientes:

- Espectro visible (0.4 a 0.7 μm). Se denomina así por tratarse de la única radiación electro-magnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región, suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (A: 0.4 a 0.5 μm), verde (V: 0.5 a 0.6 μm), y rojo (R: 0.6 a 0.7 μm), en

razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.

- Infrarrojo cercano (IRC: 0.7 a 1.3 μm). También se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (IRM: 1.3 a 8 μm). En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. En el primer caso, hablamos de infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que se sitúa entre 1.3 y 2.5 μm y resulta una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda banda de interés está comprendida entre 3 y 5 μm , y suele denominarse más propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos).
- Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 a 14 μm), que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- Micro-ondas (M, por encima de 1 mm), con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa.

2.3.3 Clasificación de los sensores

Los sensores Remotos de detección se pueden agrupar en dos categorías principales, sensores pasivos y sensores activos. Los sensores que detectan la radiación natural, ya sea emitida o reflejada por la superficie de la tierra, se denominan sensores pasivos. Por lo tanto, en un sistema de detección pasiva, no hay control sobre la fuente de radiación electromagnética. Ejemplos de sensores de teledetección pasivos son las cámaras fotográficas, escáneres multispectrales, etc.

Los sensores que tienen su propia fuente de radiación electromagnética para iluminar los objetos son llamados sensores activos. Ejemplos de sensores activos son el radar de apertura sintética y el radar aerotransportado. Los sensores remotos activos trabajan en la región de las microondas del espectro electromagnético y no necesitan la iluminación del sol. Tienen la capacidad de realizar la teledetección incluso en la presencia de una cubierta persistente nube o cualquier otra obstrucción y, por lo tanto, son útiles para la obtención de información de teledetección en una región peninsular, las zonas costeras y valles (Jain, 2004).

2.3.4 Aplicaciones

La percepción remota es una herramienta avanzada que ayuda en la recopilación y actualización de la información para desarrollar planes de gestión científica (Usha y Singh, 2013).

Diversos estudios ponen de manifiesto las aplicaciones de la percepción remota (Tabla 2).

| Fuente | Aplicaciones |
|--|---|
| Schmugge, <i>et al.</i> , 2002 | Estimación de las temperaturas del suelo a partir de datos del infrarrojo térmico, humedad superficial del suelo a partir de microondas, calidad del agua utilizando datos del espectro visible y del infrarrojo cercano, estimación de la rugosidad superficial del paisaje utilizando LIDAR |
| Jain, 2004 | Cambio continuo del ambiente y los recursos globales. |
| Zhao <i>et al.</i> , 2010 | Generación de modelos digitales de elevación (DEM) mediante tecnología LiDAR (Light Detection and Ranging) "Detección y Medición a través de la luz". |
| Van der Meer, 2012 | Aplicaciones geológicas: mapear la composición de la superficie de la Tierra, propiedades químicas y físicas de los suelos, prospección de minerales e hidrocarburos. |
| Usha y Singh, 2013 | Identificación de cultivos, enfermedades, plagas, propiedades de los suelos, nutrientes, estrés hídrico, estimación de volúmenes de follaje, biomasa y contenido de agua. |
| Muñoz y López 2008 Wang y Huang 2012 Donia y Noha 2013 | Estimación de cambios de uso de suelo, análisis de la heterogeneidad espacial de bosques, cuantificación de estructuras forestales a escala de paisaje, modelado hidrológico (estimación de escorrentías sedimentos) |
| Patino y Duque, 2013 | Aspectos sociales: detección de puntos calientes de propiedad urbana, estimación de índices de calidad de vida, análisis del crecimiento urbano, estimación de valor de viviendas, evaluación de la vulnerabilidad social urbana. |
| Xu y Zhao, 2014. | Medición de las propiedades ecológicas de los arrecifes para medir los efectos de las tensiones climáticas. |
| Van der Meer <i>et al.</i> , 2014 | Exploración de recursos geotérmicos. |
| Calvao y Pessoa, 2015 | Vigilancia y estimación de los rendimientos de los cultivos como herramienta para la seguridad alimentaria. |
| Petrou <i>et al.</i> , 2015 | Supervisión de la biodiversidad. |

Tabla 2. Aplicaciones de percepción remota en la investigación

Es importante destacar que todos los estudios de percepción remota necesitan ser asistidos por mediciones en campo, que son indispensables para la generación de modelos, calibración y validación de los enfoques desarrollados (Petrou *et al.*, 2015).

CAPÍTULO 3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del área de estudio

La cuenca alta del Río Copalita (Figura 9) tiene una superficie de 1333 km² y se localiza en la porción sur del estado de Oaxaca, entre una longitud mínima de 15° 57' 50" y máxima de 16° 10' 05" y una latitud mínima de 96° 12' 12" y máxima de 96° 20' 07" dentro de la Región Terrestre Prioritaria denominada Sierra Sur y Costa de Oaxaca. Las coberturas de uso de suelo son: bosque de pino, bosque de encino, bosque mesófilo de montaña, vegetación inducida, selva mediana caducifolia y subcaducifolia, selva media perennifolia, zonas de agricultura, zonas desprovistas de vegetación y zonas pobladas. El bosque mesófilo de montaña ocupa aproximadamente el 18 % de la superficie de la cuenca (242 km²).

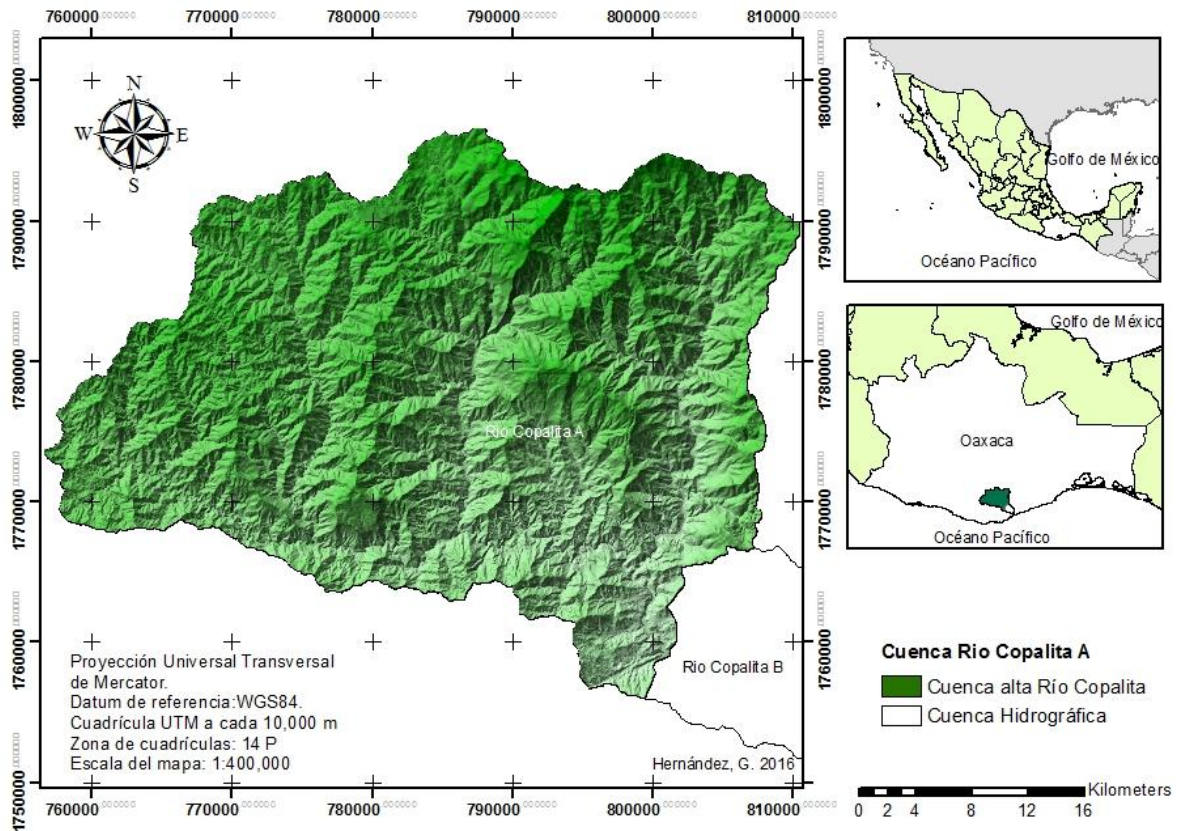


Figura 9. Localización del bosque mesófilo de montaña y la cuenca alta del Río Copalita.

En la Figura 10 se muestran las estaciones climatológicas e hidrográficas próximas a la zona de estudio que servirán para proporcionar los datos para el balance hídrico.

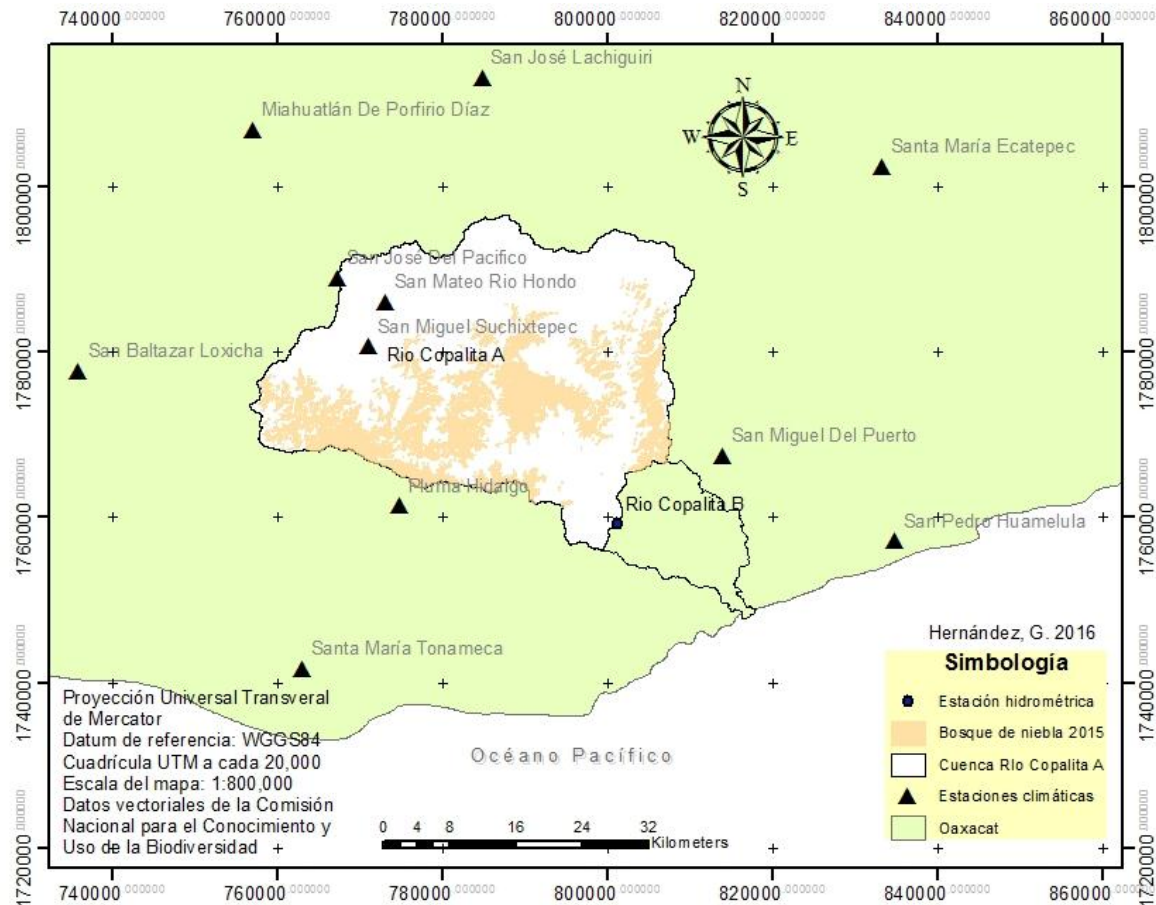


Figura 10. Estaciones climáticas y estación hidrométrica la Hamaca

3.2 Cambio de uso de suelo

La metodología consistió en realizar el análisis de cambio de uso de suelo mediante imágenes tipo Landsat de distintas fechas (1986-2015). Se procesaron 5 imágenes multiespectrales cada 3 o 7 años (por disponibilidad) a partir de la fecha menos reciente.

3.2.1 Adquisición de las imágenes multiespectrales

Se consideró de acuerdo a la fenología del tipo de cobertura a analizar que la mejor época para su discriminación, es la época de estiaje (Chuvioco, 2008). Los datos de las estaciones climatológicas (Figura 11) que se distribuyen en la superficie indican un periodo de secas de diciembre a marzo.

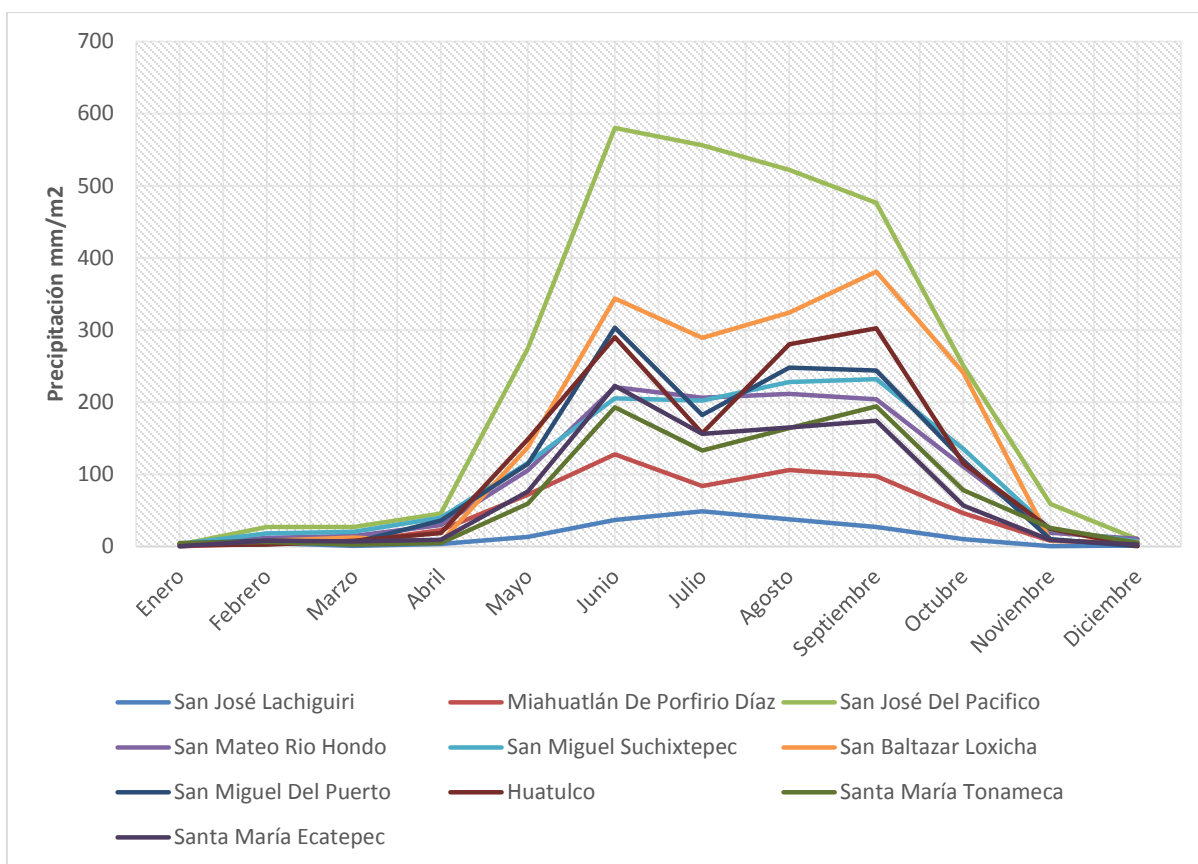


Figura 11. Distribución media mensual de la precipitación en la zona de estudio (1980-2008). Datos obtenidos de CONAGUA (2014)

Las imágenes multiespectrales se obtuvieron de la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, United States Geological Survey). Se seleccionaron las que tenían un porcentaje menor al 5 % de nubosidad. La Tabla 3 muestra las imágenes adquiridas para el análisis de cambio de uso de suelo.

| Sensor | Fecha de escena | Año de la imagen |
|--------|-----------------|------------------|
| TM | 25-marzo | 1986 |
| TM | 23-novembre | 1990 |
| TM | 17-febrero | 1996 |
| TM | 25-febrero | 1999 |
| ETM | 16-marzo | 2003 |
| TM | 23-febrero | 2010 |
| OLI | 20-enero | 2015 |

Tabla 3. Imágenes adquiridas para el análisis de cambio de uso de suelo (Path 24, Row 49).

La Tabla 4 muestra las características de las imágenes multiespectrales adquiridas.

| Satélite | Sensor | Bandas | | Resolución |
|-----------|--------|-----------------------------------|------------------|------------|
| Landsat 5 | TM | Azul (Blue) | 452 – 518 nm | 30 m |
| | | Verde (Green) | 528 – 609 nm | 30 m |
| | | Rojo (Red) | 626 – 693 nm | 30 m |
| | | Infrarrojo cercano (NIR) | 776 – 904 nm | 30 m |
| | | Infrarrojo intermedio (SWIR) | 1576 –1784 nm | 30 m |
| | | Infrarrojo térmico (TIRS) | 10450 – 12420 nm | 120 m |
| | | Infrarrojo medio | 2097 – 2349 nm | 30 m |
| Landsat 8 | OLI | Aerosol costero (Coastal Aerosol) | 430 – 450 nm | 30 m |
| | | Azul (Blue) | 450 – 510 nm | 30 m |
| | | Verde (Green) | 530 – 590 nm | 30 m |
| | | Rojo (Red) | 640 – 670 nm | 30 m |
| | | Infrarrojo cercano (NIR) | 850 – 880 nm | 30 m |
| | | SWIR 1 (SWIR 1) | 1570 –1650 nm | 30 m |
| | | SWIR 2 (SWIR 2) | 2110 – 2290 nm | 30 m |
| | | Pancromático (Pan) | 500 – 680 nm | 15 m |
| | | Cirrus (Cirrus) | 1360 – 1380 nm | 30 m |

Tabla 4. Datos de las imágenes satelitales adquiridas

3.2.2 Delimitación de las imágenes multiespectrales

Una vez obtenidas las imágenes se procedió a delimitar la superficie de trabajo, esto con la ayuda del software IDRISI Selva 17.0 (Figura 12).

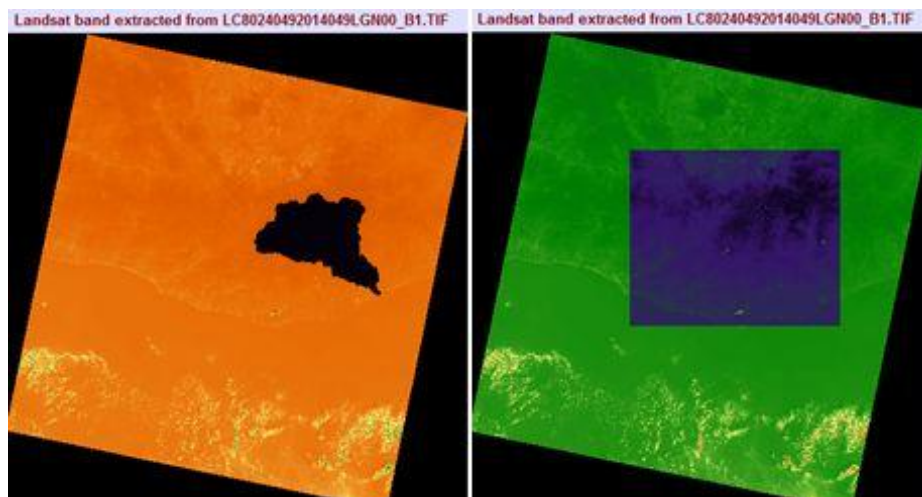


Figura 12 Delimitación de la superficie a utilizar de las imágenes multiespectrales.

3.2.3 Corrección geométrica de las imágenes digitales

Para este proceso se utilizaron los datos vectoriales escala 1:50,000 de las carreteras en la zona de estudio, una vez comparados las imágenes raster (Imágenes satelitales) con los vectoriales en el software PCI ImageWorks v7.0 se determinó que no era necesaria una corrección de este tipo.

3.2.4 Corrección radiométrica

Para esta corrección se utilizaron dos fórmulas, considerando que los metadatos de las imágenes de los dos periodos contienen algunos datos diferentes por las adaptaciones y mejoras de la misión Landsat a lo largo de los años.

Para las imágenes de 1986 a 2010, se utilizó la fórmula para conversión a radiancia mencionada por Chander *et al.* (2009):

$$L_{\lambda} = G_{rescale} \times Q_{cal} + B_{rescale}$$

$$G_{rescale} = \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right)$$

$$B_{rescale} = LMIN_{\lambda} - \left(\frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) Q_{calmin}$$

Donde:

L_{λ} = Radiancia espectral del sensor (W/(m² sr μm))

Q_{cal} = Valor del nivel digital (DN)

Q_{calmin} = Valor de píxel mínimo cuantificado calibrado correspondiente al nivel digital $LMIN_{\lambda}$ (DN)

Q_{calmax} = Valor de píxel máximo cuantificado calibrado correspondiente al nivel digital $LMAX_{\lambda}$ (DN)

$LMIN_{\lambda}$ = Radiancia espectral mínima por banda (W/(m² sr μm))

$LMAX_{\lambda}$ = Radiancia espectral máxima por banda (W/(m² sr μm))

$G_{rescale}$ = Factor de ganancia de cambio de escala por banda específica [(W/(m² sr μm)) /DN]

$B_{rescale}$ = Factor de sesgo reescalado por banda específica [W/(m² sr μm)]

Posteriormente se realizó la conversión a Radiancia en el Techo de la Atmosfera (TOA) con corrección angular con la siguiente fórmula:

$$p_{\lambda} = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos\theta_s}$$

Donde:

ρ_λ = Reflectancia TOA planetaria con corrección por ángulo solar [sin unidades]

π = Constante matemática ~3.14159 [sin unidades]

L_λ = Radiancia espectral del sensor [$W/(m^2 sr \mu m)$]

d = Distancia tierra-sol [Unidades astronómicas] obtenida de tablas (Chander *et al.*, 2009)

$ESUN_\lambda$ = Irradiancia solar media exoatmosférica [$W/(m^2 \mu m)$] obtenida de tablas (Chander *et al.*, 2009)

θ_s = Ángulo de elevación solar [grados]

La imagen del sensor OLI de 2015 fue transformada a Radiancia en el techo de la Atmósfera (TOA) con la fórmula mencionada por Ariza (2013):

$$p_\lambda = \frac{M_p \cdot Q_{cal} + A_p}{\text{sen}(\theta_s)}$$

Donde:

ρ_λ = Reflectancia TOA planetaria con corrección por ángulo solar [sin unidades]

M_p = Factor multiplicativo escalado específico por banda obtenido de los metadatos (Reflectancia multiplicativa)

Q_{cal} = Valor del nivel digital (DN)

A_p = Factor aditivo escalado específico por banda obtenido de los metadatos (Reflectancia aditiva)

θ_s = Ángulo de elevación solar [grados]

Las formulas fueron procesadas en el módulo Image Calculator (los ángulos deben ser transformados a radianes en el módulo de IDRISI).

3.2.5 Corrección topográfica

Para dicha corrección se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM) descargado del Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) (INEGI, 2014), a razón de que la resolución espacial de las imágenes Landsat es de 30 metros y la del DEM de 15, se realizó un remuestreo para poder empalmar los datos.

Para generar el mapa de sombras se utilizó el software ENVI Classic (32-bits), solo se utilizó el ángulo de elevación y acimutal solar (Figura 13).

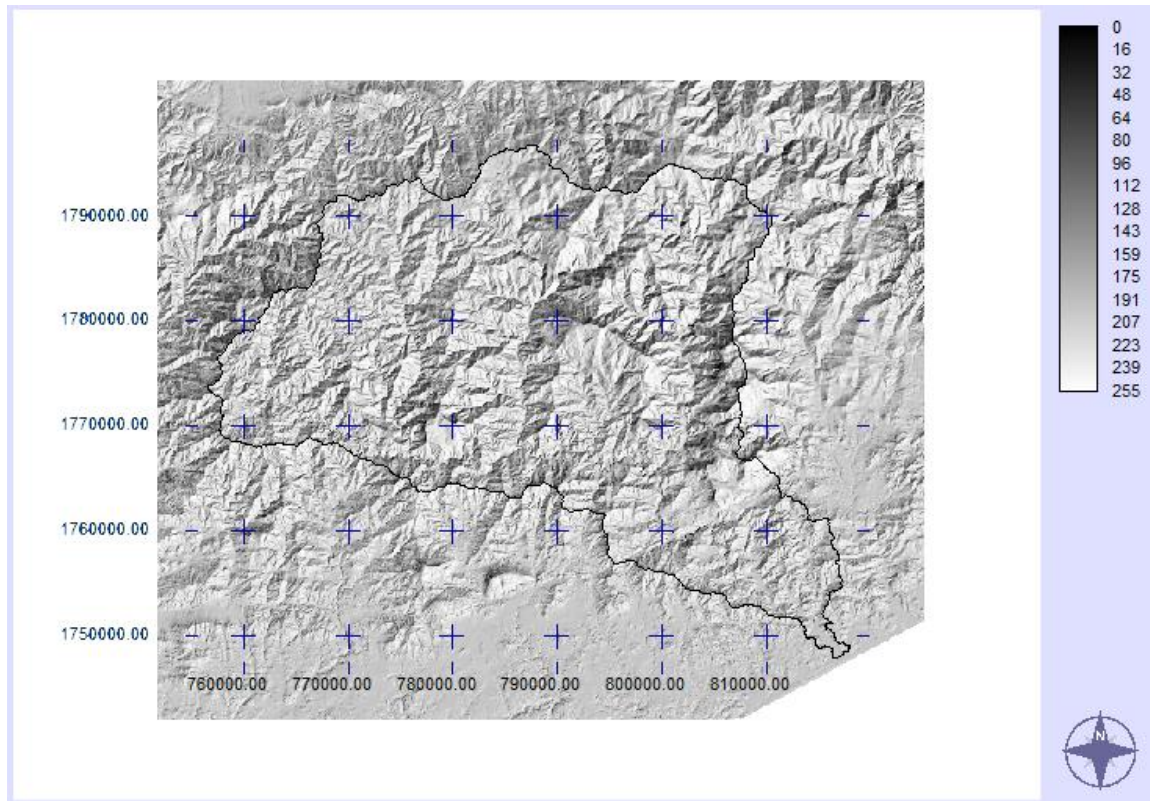


Figura 13. Mapa de sombras de la zona de estudio

El modelo utilizado para la corrección topográfica fue el de corrección-c (Teillet et al., 1982):

$$\text{Corrección } c(L(i, Y)) = \rho\gamma \left(\frac{\text{Cos}\theta_z + C_K}{IL + C_K} \right)$$

Donde:

$\rho\gamma$ = Cada una de las bandas de la imagen

$\text{Cos}\theta_z$ = Coseno del ángulo acimutal

IL= Modelo de sombras

C_k = Constante k (Valor absoluto)

Para obtener la constante k se tiene que realizar la correlación entre el modelo de sombras y cada una de las bandas de la imagen a corregir.

De la ecuación lineal resultante $y=b+mx$, la constante k (C_k) es igual a b/m

Dicha corrección se realizó con el módulo Regress de IDRISI Selva 17.0 (Figura 14).

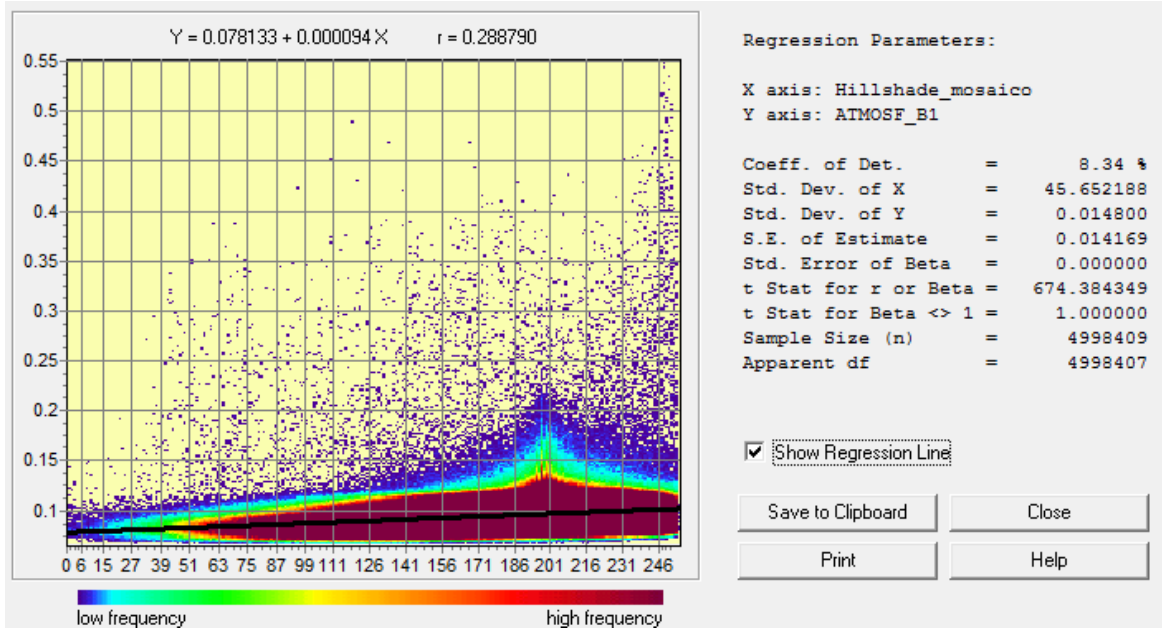


Figura 14. Regresión lineal entre el modelo de sombras (Variable independiente) y cada una de las bandas (variables dependientes).

Una vez obtenidas todas las variables se realizó la corrección topográfica de cada una de las bandas mediante el módulo image calculator de IDRISI Selva 17.0.

En las siguientes Figuras se muestran imágenes corregidas frente a las crudas:

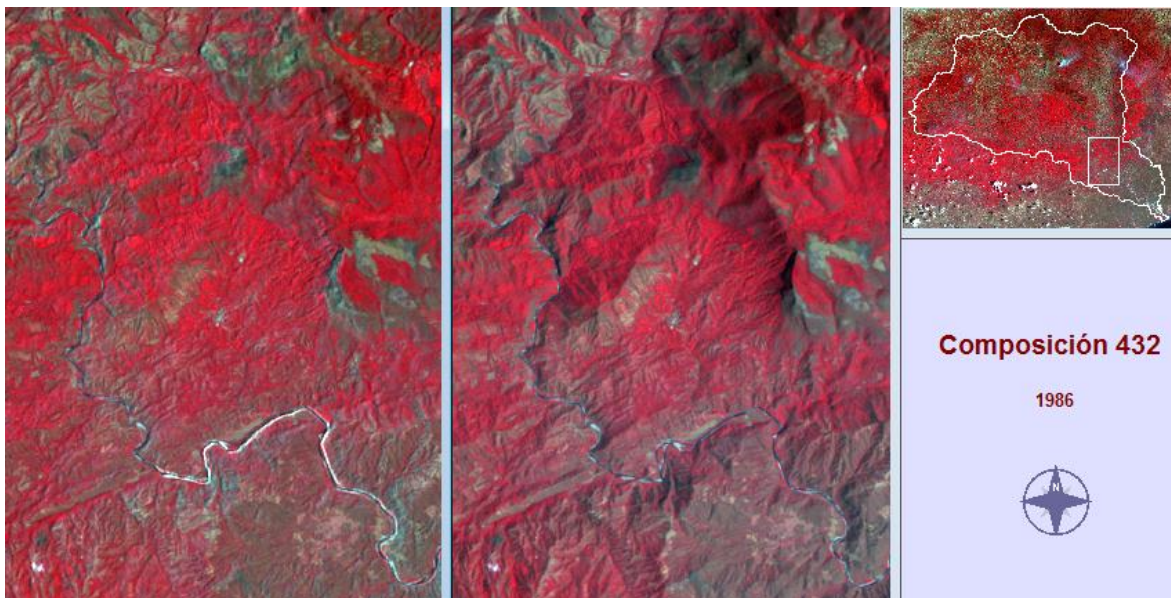


Figura 15. Contraste entre una imagen corregida y una sin corrección sobre la misma superficie en una composición en falso color 432 Landsat 5.

3.2.6 Clasificación supervisada

Para poder hacer el análisis de coberturas se realizó una clasificación supervisada con el algoritmo de máxima probabilidad (MAXLIKE) del programa IDRISI Selva 17.0.

- Selección de sitios de entrenamiento

La ubicación de los sitios de entrenamiento se realizó con datos vectoriales del INEGI, verificación de coberturas mediante el programa Google Earth, y mediante el análisis de los índices de Vegetación Normalizada (NDVI) para el año 1986 y 2010.

Obtención de NDVI:

$$NDVI = \frac{IRCercano - Rojo}{IRCercano + Rojo}$$

Donde:

NDVI= Índice de vegetación de diferencia normalizada

IR Cercano =valor digital del pixel correspondiente a la sección del infrarrojo cercano del espectro electromagnético (0.7 a 1.3 μm)

Rojo= valor digital del pixel correspondiente a la sección roja del espectro visible (0.6 a 0.7 μm)

Se tomaron superficies iguales para ambas clasificaciones, el criterio tomado fue buscar zonas que en ambas cartas (1985-2010) registraran la misma cobertura de vegetación, zonas libres de influencia de otros tipos de coberturas (pixeles con coberturas desconocidas), y que la vegetación representativa fuera la más vigorosa según su categoría en los NDVI (coberturas puras).

De manera general se consideraron 10 tipos de coberturas, las cartas de tipos de vegetación del INEGI (1985) incluyen más categorías que son subdivisiones de las tomadas para el 2012. En la Tabla 5 se muestran las categorías tomadas en cuenta para la elaboración de este trabajo.

Al final se utilizaron los mismos sitios de entrenamiento para ambas clasificaciones para así evitar variaciones por la cantidad de pixeles considerados por categoría. Solamente hubo variación en el tamaño y lugar de los sitios para las coberturas de zonas pobladas, agricultura y cuerpos de agua. La Figura 16 corresponde a los sitios de entrenamientos usados para las clasificaciones.

| | Clasificación propuesta | Clasificación INEGI 2012 | Clasificación INEGI 1985 | Observaciones |
|----|----------------------------------|---------------------------------|---|---|
| 1 | Bosque mesófilo | Bosque mesófilo | Bosque mesófilo | |
| 2 | Bosque de coníferas | Bosque de coníferas | Bosque de oyamel, Bosque de pino, Bosque de pino-encino | Se consideró solo una clasificación general |
| 3 | Bosque de encino | Bosque de encino | Bosque de encino, Bosque de encino-pino | Bosque donde el encino es la especie dominante |
| 4 | Selva caducifolia | Selva caducifolia | Selva mediana caducifolia, Selva baja caducifolia | NEGI 1985 hace alusión a la subdivisión entre selva mediana y selva baja, pero se consideró una sola categoría por la fenología similar entre estos ecosistemas. |
| 5 | Selva subcaducifolia | Selva subcaducifolia | Selva mediana subcaducifolia | |
| 6 | Selva perennifolia | Selva perennifolia | Selva mediana subperennifolia | Se consideró el estado fenológico de las especies |
| 7 | Vegetación inducida | Vegetación inducida | Pastizal Inducido | |
| 8 | Zona poblada | | | No se consideró en ninguna de las cartas |
| 9 | Zonas desprovistas de vegetación | No aplicable | Bosque de pino | En la carta de 1985, a zonas de agricultura se les consideró bosques de pino, pero en un análisis visual en una composición de verdadero color de las imágenes a clasificar se corroboró que son campos de cultivo. |
| 10 | Cuerpos de agua | | Cuerpos de agua | |

Tabla 5. Tipos de coberturas a considerar y las mostradas en datos vectoriales de INEGI

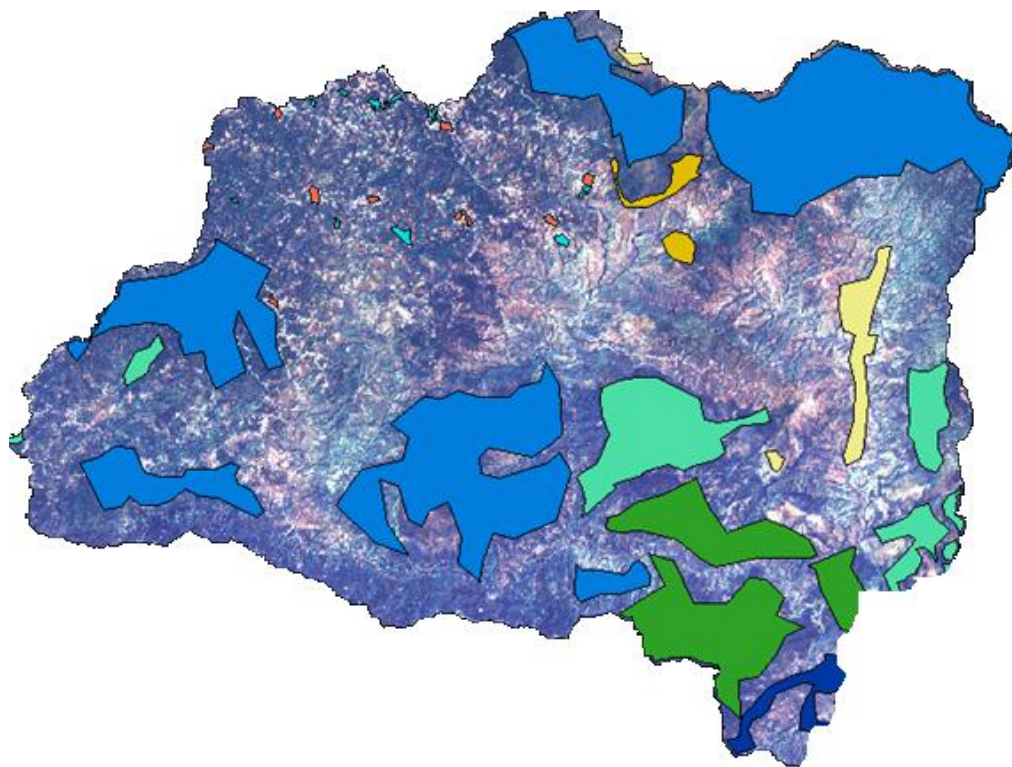


Figura 16. Sitios de entrenamiento para la clasificación supervisada de las imágenes multiespectrales.

Posteriormente de cada imagen raster se extrajo solo la superficie de la cuenca alta del Río Copalita. La ubicación de la estación hidrométrica La Hamaca, marca la parte más baja del polígono resultante (cuenca alta) que se utilizó para extraer de la información generada, la información específica de la zona de estudio. Cada mapa fue procesado mediante un sistema de información geográfica donde las imágenes raster fueron transformadas a imágenes vectoriales para su análisis en el módulo land change modeler del programa IDRISI Selva.

3.3 Pruebas de infiltración

3.3.1 Tamaño de muestra para las pruebas de infiltración

Tomando en cuenta la superficie de la cuenca (1333 km) se realizó una estimación indirecta de los rangos de infiltración mediante un balance hídrico. Los valores necesarios se obtuvieron de 11 estaciones climáticas, el balance comprendió a groso modo el año hidrológico de 1987, cada una de las variables fue representada cartográficamente con una resolución espacial de 30 metros (Figura 17 y 18). Se determinó la variabilidad del parámetro y se calculó el tamaño óptimo de muestra.

Para obtener la precipitación en la superficie de la cuenca se interpoló la información de las estaciones mediante el método de Distancia Inversa Ponderada.

La evapotranspiración potencial se obtuvo mediante el método de Jensen-Heise. Este método está en función de la radiación solar, presión de vapor de saturación, temperatura media, mínima y máxima mensual de la zona de estudio. Para obtener valores de evapotranspiración real, el valor estimado se relacionó con el Índice de Vegetación Normalizada, para obtener un coeficiente de evapotranspiración real, en el supuesto de que a mayor vigorosidad de vegetación está correlacionada positivamente con el uso de agua, y negativamente con la suma de evaporación y transpiración.

Los escurrimientos fueron calculados a partir de NOM-011-CNA-2000– CONAGUA que está en función de la vegetación, pendiente y tipo de suelo.

La infiltración se obtuvo ajustando el mapa obtenido de la resta de precipitación con escurrimientos, los valores de dicho mapa fueron ajustados con la relación infiltración precipitación promedio de la cuenca obtenida de un trabajo previo (Ramírez, 2014).

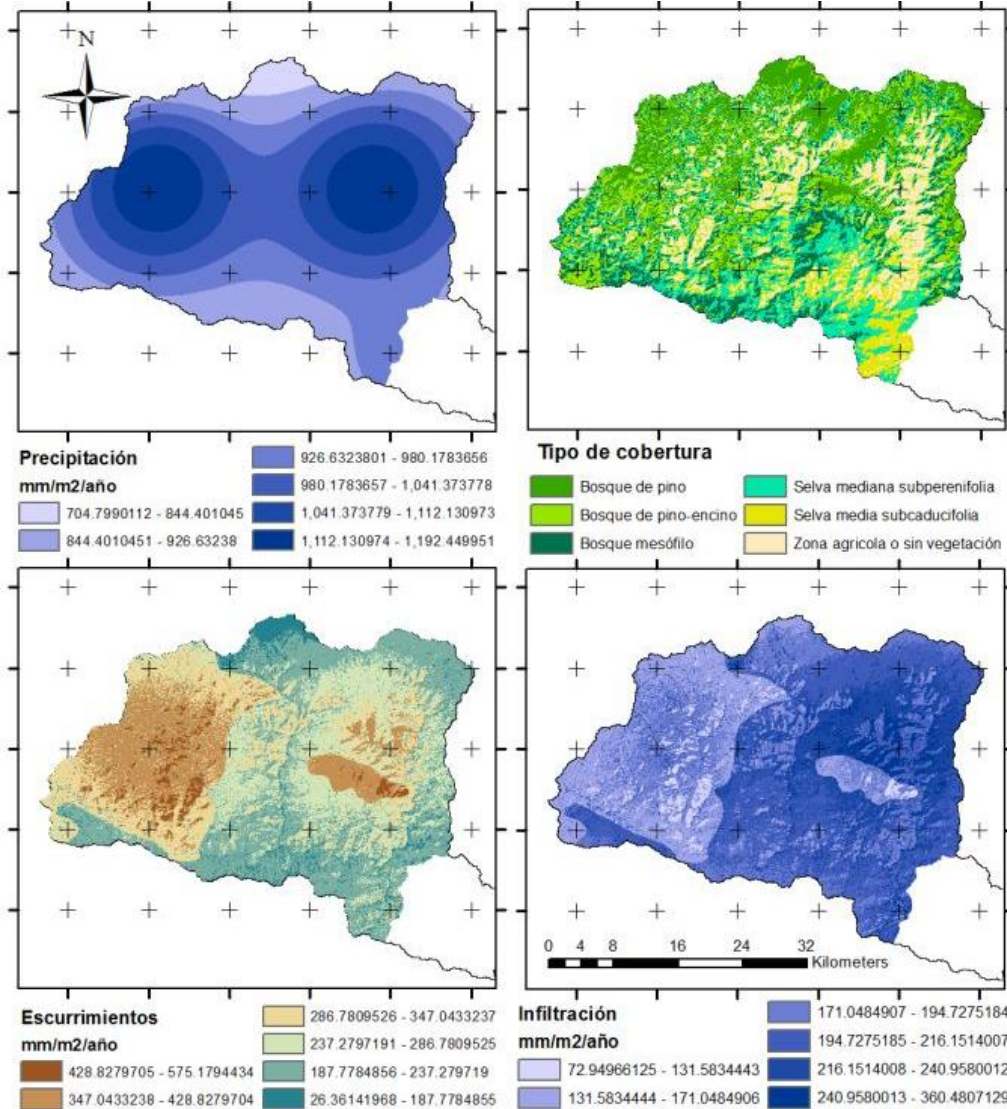


Figura 17. Mapas del total anual de precipitación, escurrimientos e infiltración y tipos de coberturas de la cuenca para 1987

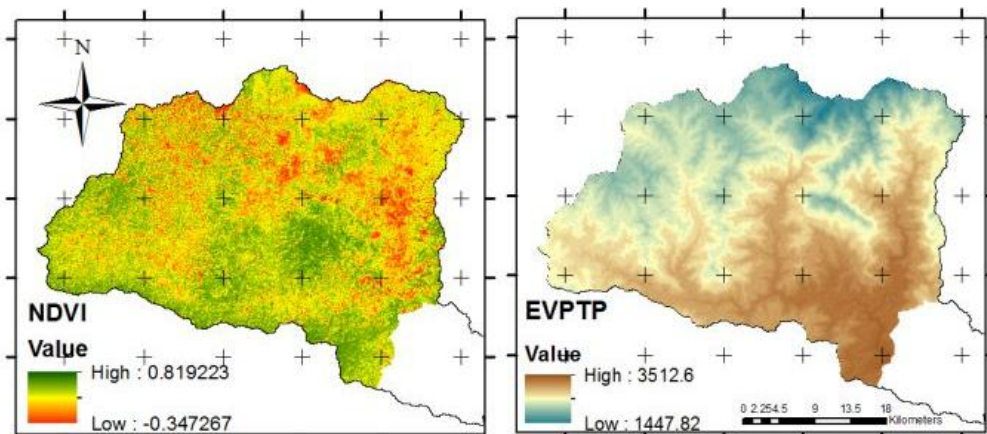


Figura 18. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado (NDVI) y mapa de evapotranspiración potencial (EVPTP) para 1987

La Tabla 6 contiene los estadísticos de los valores estimados de infiltración en la cuenca.

| Datos | Observaciones | Valores |
|-------------------------|--|-----------|
| Media | Valor promedio anual de la infiltración en mm | 194 |
| Desviación estándar | Medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. | 32 |
| Coficiente de Variación | Relación entre el tamaño de la media y la variabilidad de la variable | 0.16 |
| Tamaño de la población | Número de pixeles de la superficie de investigación con datos sobre infiltración | 1,481,111 |

Tabla 6. Estadísticos para la determinación del tamaño de muestra de las pruebas de infiltración

Determinación del tamaño de muestra:

La fórmula utilizada para la determinación del tamaño de muestra es la siguiente:

$$n = \frac{N\sigma^2 Z^2}{(N-1)e^2 + \sigma^2 Z^2}$$

Donde:

n= tamaño de la muestra

N= tamaño de la población

σ = Desviación estándar de la población, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor constante de 0.5.

Z= Valor obtenido mediante niveles de confianza. Es un valor constante que, si no se tiene su valor se toma en relación al 95 % de confianza que equivale a 1.96 (más usual) o en relación al 99 % de confianza equivale a 2.58. Valor de acuerdo al investigador

e = Límite aceptable de error muestral, generalmente cuando no se tiene su valor se utiliza un valor que varíe entre el 1% (0.01) y 9% (0.09).

| DATOS | |
|---|-----------|
| Z intervalo de confianza (95 %) | 1.96 |
| Desviación estándar (ajustada a la distribución normal) | 0.16 |
| Tamaño población | 1,481,111 |
| MEDIA | 194 |
| Error | 0.05 |

Tabla 7. Valores estimados para el cálculo del tamaño de muestra

Efectuando el cálculo con los datos de la Tabla 7:

$$n = \frac{(1,481,111) * (0.16)^2(1.96)^2}{(1,481,111 - 1)(0.16)^2 + (0.16)^2 * (1.96)^2} = 39.33 \approx 39$$

El tamaño de muestra para la realización de pruebas de muestreo es de 39 sitios, con un 95 % de confianza en la obtención de los valores y un 5 % de error.

3.3.1.1 Localización de los sitios de las pruebas de infiltración

Se realizó una división de la cuenca por tipos de suelo y litología, la cartografía utilizada fue extraída del INEGI (datos vectoriales edafológicos y geológicos). Los estratos consistieron en unidades superficiales con características semejantes.

Se realizó un mapa en el que se distribuyeron 39 sitios de muestreo de forma aleatoria. Posteriormente se revisó que dentro de la clasificación de tipos de suelo y litología se ubicara al menos 2 sitios de muestreo.

Para facilitar el acceso a los sitios de muestreo, se verificó la distancia de los puntos aleatorio con las carreteras y caminos (Datos vectoriales de INEGI). En cuanto fue posible, sin alterar la distribución aleatoria sobre las mismas condiciones de superficie, la ubicación de algunos puntos fue modificada en función de su accesibilidad. La Figura 19 muestra la distribución de los mismos sobre el mapa clasificado por litología y tipos de suelo.

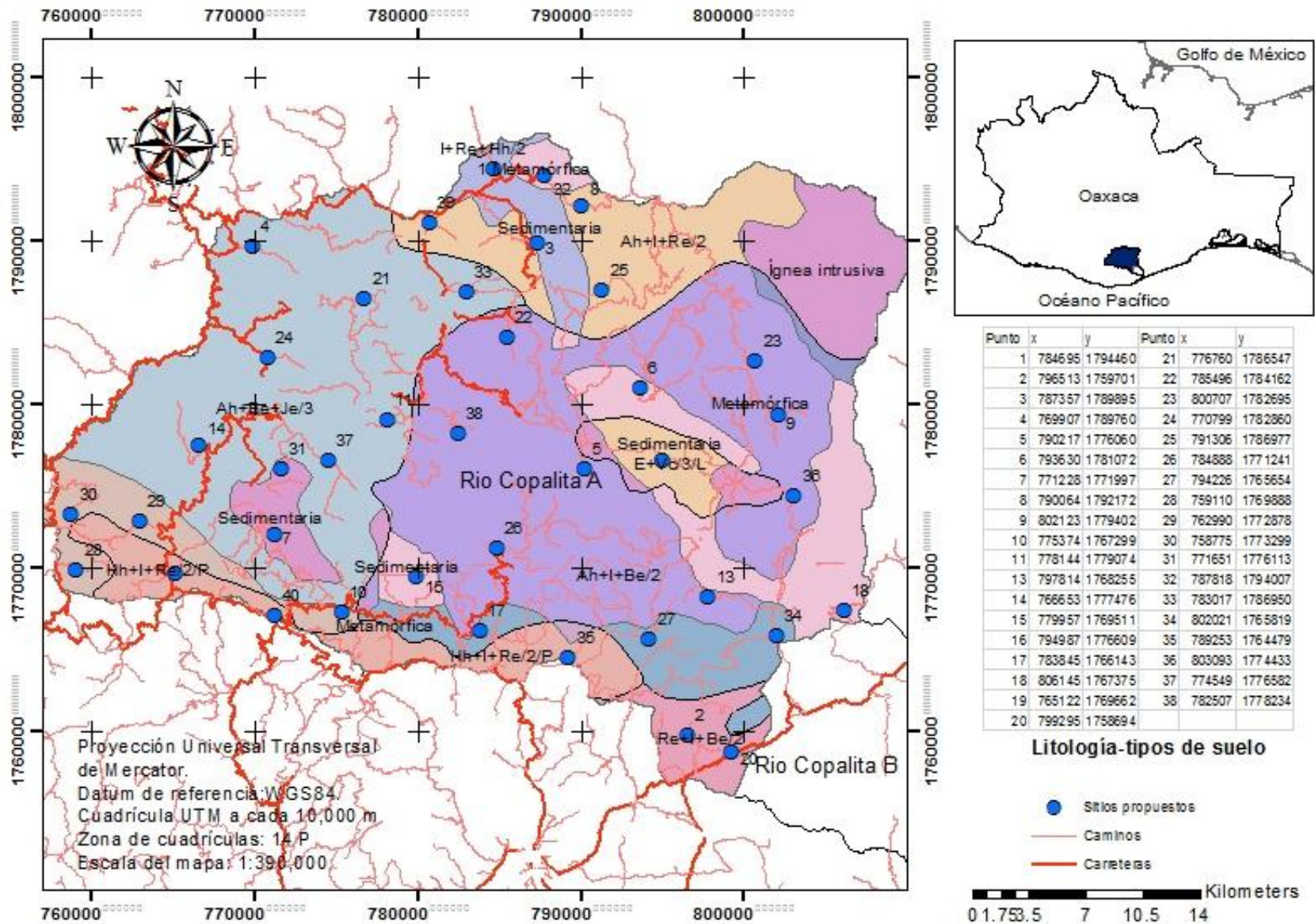


Figura 19. Sitios de muestreo sobre el mapa de superficies equivalentes en litología y tipos de suelo.

3.3.1.2 Acceso a los sitios de muestreo

Para la realización de las pruebas de infiltración fue necesario solicitar el acceso a las autoridades pertinentes. Se elaboró un oficio de solicitud a nombre del IPN CIIDIR-Oaxaca (Anexo 1).

El mapa con municipios, carreteras y sitios de muestreo, se utilizó para ubicar a las comunidades adecuadas para el establecimiento de la brigada. En la Figura 20 se indica el establecimiento de brigada en Santo Domingo Ozolotepec con 8 sitios circundantes.

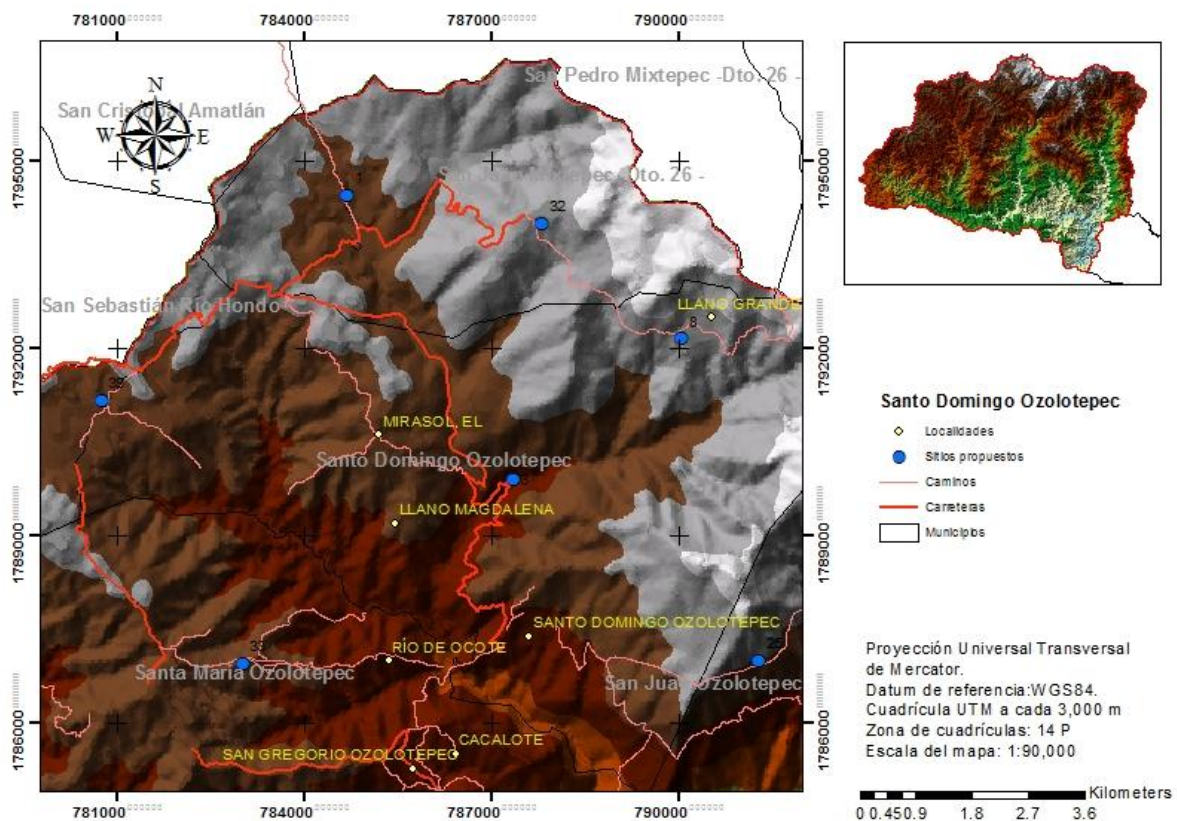


Figura 20. Sitios de muestreo cercanos a Santo domingo Ozolotepec.

La ruta más corta fue establecida desde escritorio a partir de datos vectoriales de INEGI. La localización de los sitios de muestreo se realizó con ayuda de un Geoposicionador Global Garmin (Figura 21).



Figura 21. Localización de los sitios de muestreo mediante GPS.

3.3.2 Obtención de datos:

Pasos para la realización de las pruebas de infiltración (Modificado de Asensio *et al.*, 2014):

1. Selección del sitio donde efectuar la prueba de infiltración (sitios con la menor perturbación posible)
2. El infiltrómetro de doble anillo es enterrado mecánicamente aproximadamente 15 cm en el suelo (Figura 22).



Figura 22. Establecimiento manual del infiltrómetro de doble anillo

3. Se verifica que el infiltrómetro esté bien colocado (Debe ser enterrado firmemente, sin movimiento ni huecos alrededor del mismo como en la Figura 23)



Figura 23. Colocación y verificación del infiltrómetro

4. El anillo exterior es llenado con agua
5. Se comprueba que no exista ninguna fuga de agua en los alrededores del anillo.
6. Para evitar el impacto directo del agua con el suelo en el anillo interior, es conveniente aplicar alguna cobertura extra antes de verter el agua (Figura 24).



Figura 24. Disminución del impacto del agua al suelo en el anillo interno

7. Asegurar que ambos anillos tengan la misma altura de agua
8. Una vez lleno el anillo central se deben realizar mediciones a intervalos regulares en tiempo (Figura 25). Es aconsejable realizar el llenado de ambos anillos lo más rápido posible para observar el comportamiento de la absorción capilar y humedad inicial del suelo



Figura 25. Medición del descenso del agua en el anillo interno

9. Una vez alcanzada una tasa de infiltración constante es aconsejable seguir con las medidas hasta tener certeza que no hay aumentos o decrementos en la tasa de infiltración.
10. Si la tasa de infiltración es constante, la prueba ha terminado.

3.3.3 Manejo de datos

Para obtener los parámetros requeridos de las ecuaciones (Obtención de conductividad hidráulica mediante la ecuación de Darcy, Ecuación de Horton para capacidad de infiltración), se graficaron todos los datos en una hoja de cálculo del programa Excel. En la gráfica de descensos acumulados, el eje de las abscisas corresponde al tiempo y el de las ordenadas al descenso acumulado. Los descensos acumulados fueron divididos entre el tiempo que le tomó al suelo infiltrar lo acumulado, este dato corresponde a la tasa de infiltración que se grafica en el eje de las ordenadas y tiempo graficado en el eje de las abscisas. Cuando la curva de la tasa de infiltración alcanza el estado estacionario o valores asintóticos, se toman los valores de altura del descenso en un tiempo t y un segundo dato en un tiempo posterior sobre la misma línea.

Para el sitio 28 mostrado anteriormente (graficas de infiltración acumulada y tasa de infiltración), se obtuvieron los datos de la Tabla 8:

| Variable | Valores |
|----------|---------|
| h_1 | 32.6 cm |
| h_2 | 24.4 cm |
| t_1 | 1020 s |
| t_2 | 1320 s |

Tabla 8. Descensos y tiempos (sitio 28)

Sustituyendo valores en la Eq. 5:

$$k = \frac{15 \text{ cm}}{(1320 - 1020)} \ln \frac{(32.6)^2}{24.4^2} = 0.01448646 \frac{\text{cm}}{\text{s}} = 6.9 \text{ m/día}$$

La conductividad hidráulica en el sitio 28 es igual a 6.9 m/día.

Para la misma prueba: Mediante el programa Excel, la expresión de Horton fue utilizada para generar una curva que describiera la situación real de lo sucedido en el suelo, reflejada por la gráfica de tasa de infiltración. Para este sitio, los valores requeridos para la expresión de Horton son los siguientes (Tabla 9):

| Variable | Valores |
|----------------|--------------|
| F ₀ | 0.04667 cm/s |
| F _b | 0.02883 cm/s |
| K | -0.01 |
| t | segundos |

Tabla 9. Valores de la expresión de Horton (sitio 28)

F₀ corresponde a la tasa de infiltración inicial, F_b corresponde a la tasa de infiltración una vez alcanzada la asíntota, t es el tiempo medido en segundos, K es la constante de decaimiento.

Los valores generados mediante la expresión de Horton y los valores reales fueron comparados mediante correlación de Pearson. La constante de decaimiento fue ajustada hasta alcanzar valores superiores al 0.9 en el coeficiente de correlación.

La capacidad de infiltración corresponde al valor asintótico de la curva estimada con la expresión de Horton.

Se realizaron ambos procedimientos para los datos de cada prueba de infiltración. Para estimar los valores en la superficie de la cuenca se utilizó el método topo raster del programa ArcMap 10.1.

3.4 Metodología: Balance hídrico

Se recopiló toda información hidrológica posible para la realización del balance hídrico. Las variables que se tomaron en cuenta son: Precipitación, Evapotranspiración, Ecurrimientos e Infiltración (Figura 26).

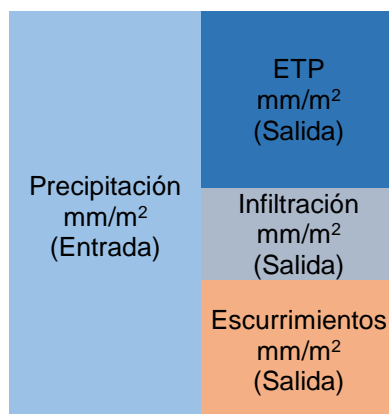


Figura 26. Variables del balance hídrico parcial, entradas y salidas

Por disponibilidad de datos se realizaron dos balances parciales, tomando en cuenta los años hidrológicos de 1986 y 1989. La información respecto a precipitación, temperatura y flujos base en estos años es completa. Las variables Precipitación y Evapotranspiración pueden obtenerse para el año hidrológico actual (2015), las estaciones climáticas cuentan con dicha información, pero debido a que la estación hidrométrica de la cuenca está deshabilitada no fue posible la realización de un balance actual.

Los valores de escurrimientos en la superficie de la cuenca fueron calculados a partir de la conductividad hidráulica y la disponibilidad de agua por precipitación y ajustados según el valor del flujo base, los valores de infiltración fueron obtenidos despejando este variable del balance parcial.

Cada variable se obtuvo de manera mensual para conocer sus comportamientos a lo largo del año, pero se optó por utilizar valores anuales para simplificar los resultados. La cartografía generada tiene una resolución espacial de 30 metros.

3.4.1 Precipitación

La información climatológica se obtuvo de 10 estaciones distribuidas cerca y sobre la superficie de la zona de estudio (CONAGUA, 2014). Para obtener una estimación de la precipitación sobre la superficie de la cuenca, la información puntual de estas estaciones (Tabla 10) fue interpolada mediante el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW, Inverse Distance Weighted).

| Id | Nombre | x | y | ASNM |
|-------|-----------------------------|-----------|------------|-------|
| 20111 | San José Lachiguiri | 784884.2 | 1813184.35 | 1,679 |
| 20070 | Miahuatlán De Porfirio Díaz | 757072.99 | 1806894.91 | 1,559 |
| 20342 | San José Del Pacífico | 767328.37 | 1788997.34 | 2,485 |
| 20308 | San Mateo Río Hondo | 773162.45 | 1786026.17 | 2,226 |
| 20120 | San Miguel Suchixtepec | 771178.3 | 1780711.5 | 2,453 |
| 20505 | San Baltazar Loxicha | 735975.87 | 1777723.37 | 990 |
| 20256 | San Miguel Del Puerto | 814011.89 | 1767462.3 | 361 |
| 20303 | Santa María Tonameca | 763131.64 | 1741614.38 | 48 |
| 20032 | Santa María Ecatepec | 833216 | 1802421 | 1,869 |
| 20089 | Pluma Hidalgo | 774829 | 1761415 | 1,338 |
| 20320 | San Pedro Huamelula | 834870 | 1757111 | 35 |

Tabla 10. Estaciones climatológicas utilizadas con información climatológica de la zona de estudio

3.4.2 Evapotranspiración potencial

Para la obtención de la EVPTP se utilizó la ecuación de Jensen-Heise. Este método considera radiación solar, presión de vapor de saturación, temperatura media, mínima y máxima mensual para estimar el parámetro. Se utilizaron otras metodologías para la obtención cartográfica de las variables que la ecuación necesita.

3.4.2.1 Generación de mapas de isotermas

Los datos sobre temperaturas fueron obtenidos de 10 estaciones climatológicas distribuidas sobre o cerca de la zona de estudio

Se estimó la correlación de Pearson de las temperaturas en las estaciones con la altura sobre el nivel del mar mediante el coeficiente de correlación momento producto de Pearson.

Donde:

$$r = \frac{\sum(x - X)(y - Y)}{\sqrt{\sum(x - X)^2 \sum(y - Y)^2}}$$

Para $-1 \leq r \leq 1$

La correlación de Pearson entre temperaturas mensuales de las estaciones y la altura sobre el nivel del mar se muestra en la Tabla 11:

| Enero | Febrero | Marzo | Abril | Mayo | Junio | Julio | Agosto | Septiembre | Octubre | Noviembre | Diciembre |
|-------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|------------|---------|-----------|-----------|
| -0.97 | -0.98 | -0.98 | -0.96 | -0.97 | -0.99 | -0.91 | -0.98 | -0.99 | -0.98 | -0.98 | -0.99 |

Tabla 11. Valores de correlación de Pearson entre altura sobre el nivel del mar y temperatura

La correlación existente en la altura sobre el nivel del mar y temperatura, permitió utilizar el DEM para la generación de los mapas de isotermas mediante las siguientes ecuaciones (metodología de Fries *et al.*, 2012):

$$T_{det} = T_{mensual} + [\Gamma(Z_{det} - Z_{est})]$$

$$T_{x,y} = T_{det} + [\Gamma(Z_{(x,y)}^{DEM} - Z_{det})]$$

Donde:

T_{det} = temperatura calculada a una altura determinada (Z_{det})

T_{men} = temperatura promedio mensual

Z_{det} = altura sobre el nivel del mar de una estación a una temperatura determinada (T_{det})

Z_{est} = altura sobre el nivel del mar de la estación climatológica

Γ = gradiente de la ecuación lineal entre altitud y temperatura

$T_{x,y}$ = temperatura extrapolada al DEM

$Z_{DEM_{x,y}}$ = Modelo digital de elevación

Temperatura determinada: mediante una ecuación lineal simple se determinó la temperatura a la que a una altura dada, estarían todas las estaciones.

Los datos mensuales en las estaciones fueron graficados (Figura 27) de la siguiente manera: en el eje de las abscisas se graficó la altura sobre el nivel del mar y en el de las ordenadas, la temperatura media mensual y se obtuvo la ecuación lineal de estos datos.

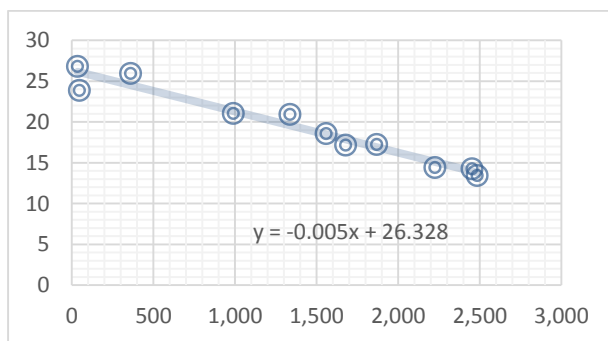


Figura 27. Ecuación lineal de temperatura con altura sobre el nivel del mar

De la ecuación lineal se obtuvo el gradiente entre la altitud y la temperatura.

3.4.2.2 Generación de mapas de presión de vapor a saturación

De los mapas de isotermas y a través del álgebra de mapas se obtuvo la presión de vapor a saturación (mbar) correspondiente a la temperatura mínima y máxima promedio del mes más cálido mediante la siguiente expresión (Sánchez, 2011):

$$e = 6.108 * \exp\left(\frac{17.27t}{t + 237.3}\right)$$

e= Presión de vapor de saturación (mbar) correspondiente a la temperatura t (°C)

3.4.2.3 Radiación solar incidente (Rs)

El cálculo de la radiación incidente se realizó mediante la siguiente ecuación (Sánchez, 2011):

$$R_s = R_o \left(0.18 + 0.55 \frac{n}{N}\right)$$

Donde:

R_o= Radiación solar si no existiera atmósfera (mm/día)
 n= número de horas sol reales (medición con heliógrafo)
 N= número máximo teórico de horas sol

La zona de estudio no cuenta con información de horas sol reales, por lo que se procedió a utilizar el criterio mencionado por Sánchez, (2011) en una zona de latitud equivalente, Donde n/N es aproximadamente 0.8 para los meses de verano, 0.6 para primavera y otoño, y 0.4 para invierno.

3.4.2.4 Cálculo de la evapotranspiración potencial, método Jensen-Heise

Una vez generada la cartografía de cada una de las variables, se calculó la ETP de la superficie de estudio de manera mensual.

$$ETP = C_T(T - T_x) \cdot R_s$$

Donde:

ETP= evapotranspiración mm/mes

R_s=Radiación solar incidente a nivel del suelo (mm/mes)

T=temperatura media mensual

C_T y T_x son variables calculadas mediante las siguientes expresiones:

$$C_T = \frac{1}{38 - \frac{h}{152.5} + \frac{380}{e_2 - e_1}}$$

$$T_x = -2.5 - 0.14(e_2 - e_1) - \frac{h}{550}$$

h= altura, en este caso es igual al DEM

Las ecuaciones fueron realizadas por medio del algebra de mapas.

3.4.3 Ecurrimientos:

Para la generación de la cartografía de escurrimientos, la única información obtenida fue el de caudal base (Ecurrimientos a la salida de la cuenca). El primer paso fue calcular promedio en mm/m² de escurrimiento anual que aporta la superficie de la cuenca.

$$E_{prom} = \frac{V_{fb}}{S}$$

Donde:

E_{prom}= Ecurrimiento media anual de la cuenca (mm/m²)

V_{fb}= Volumen de flujo base anual (mm)

S= Superficie de la cuenca (m²)

Los valores de escurrimientos están en función de la disponibilidad de agua de precipitación, y la capacidad del suelo de generar escurrimientos, por lo que para la generación de la cartografía de esta variable, se utilizó el mapa de precipitaciones y el de conductividad hidráulica.

3.4.1 Factor de escurrimiento

En el entendido que cada metro cuadrado de la cuenca aporta cierto porcentaje a la generación de flujo base, se utilizó la cartografía de conductividad hidráulica (generado a partir de pruebas de infiltración) para la generación de un coeficiente, que multiplicado por valores de precipitación estimaran el aporte de cada pixel al flujo base.

Píxeles con valores altos de conductividad hidráulica son los que captan mayor agua de infiltración, píxeles con valores bajos de conductividad generan altas escurrimientos y bajos valores de infiltración, esta relación se muestra en la Figura 28:

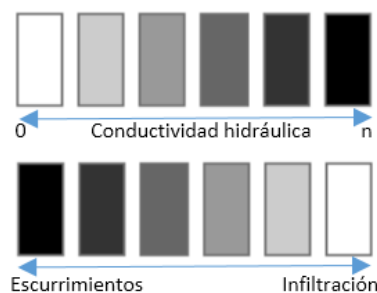


Figura 28. Relación de la conductividad hidráulica con los escurrimientos y la infiltración

Para la generación del factor de escurrimiento, los valores de conductividad hidráulica se estandarizaron:

$$K_{est} = \frac{K_{map}}{V_{max}}$$

Donde:

K_{est} = Conductividad hidráulica estandarizada (Mapa).

K_{map} = Mapa interpolado de conductividad hidráulica (m/día)

V_{max} = Valor máximo de conductividad hidráulica obtenido en las pruebas de infiltración (m/día)

Cada pixel en el mapa generado indica de manera proporcional el aporte posible del pixel al volumen de escurrimientos. Valores cercanos a 0 indican altos volúmenes de escurrimientos disminuyendo de manera lineal al aproximarse a 1, donde los valores de escurrimientos pueden llegar a ser nulos. Por lo tanto el coeficiente se invierte para multiplicarlo por el aporte (precipitación) y estimar de acuerdo a la disponibilidad de agua la cantidad de escurrimientos estimados para la superficie discretizada.

$$F_i = 1 - K_{est}$$

$$E_{est} = F_i * P$$

Donde:

F_i = Factor de escurrimientos

K_{est} = Conductividad hidráulica estandarizada.

E_{est} = Mapa de Escurrimientos estimados (mm/m² anual)

P = Mapa generado de precipitación

Se calcula el promedio de escurrimientos del mapa de Escurrimiento estimados, y el valor se ajusta con el valor promedio (mm/m² anual) medido por la estación hidrométrica. La siguiente ecuación ajusta equitativamente los valores de escurrimientos aportados por pixel al flujo base.

$$E_r = (FB_{med}/E_{est-med}) * E_{est}$$

Donde:

E_r = Mapa de Escurrimientos reales (mm/m² anual)

E_{est} = Mapa de Escurrimientos estimados (mm/m² anual)

$E_{est-med}$ = Valor promedio de los escurrimientos estimados (mm/m² anual)

FB_{med} = Valor promedio de los escurrimientos medidos en la estación hidrométrica (mm/m² anual)

El valor promedio de escurrimientos reales calculados (mm/m² anual) debe ser igual al valor promedio medido en la estación hidrométrica.

3.4.4 Infiltración

La tabla 12 muestra el balance hídrico parcial de la zona de estudio para 1989. Los valores de precipitación fueron medidos en las estaciones climáticas, los datos de flujo base para el cálculo de escurrimiento medio se obtuvo de la estación hidrométrica de la cuenca, el valor de la ETP es una medida calculada por posición, esta se aproxima a Evapotranspiración real (ETR) dependiendo de la disponibilidad de agua, factor que en la cuenca es mayor que la ETP por lo tanto ETP y ETR son aproximados.

| Infiltración | Escurrimientos | Evapotranspiración | Precipitación |
|--------------|----------------|--------------------|---------------|
| 306 mm | 566 mm | 779 mm | 1651 mm |
| 18.5 % | 34.2 % | 47.2 % | 100 % |

Tabla 12. Balance hídrico parcial de la zona de estudio, 1989

El cálculo de la infiltración en el balance fue mediante la siguiente fórmula:

$$I = P - ETP - E_r$$

Donde:

I= Infiltración (mm/m² anual)

P= Precipitación (mm/m² anual)

ETP= Evapotranspiración (mm/m² anual)

E_r= Escurrimientos reales (mm/m² anual)

El valor de infiltración fue calculado despejando la variable de la ecuación del balance hídrico parcial. Estos valores son valores promedio para la cuenca. Para obtener la distribución de la infiltración de la superficie de la zona de estudio, se utilizó la cartografía generada para realizar a través del álgebra de mapas el balance hídrico con las variables discretizadas.

La cartografía generada con valores de infiltración tiene un promedio de valores igual al del balance obtenido a groso modo, comprobando así que en conjunto, los valores de los píxeles distribuyen la infiltración sobre la superficie de la cuenca con base en la disponibilidad y movimiento del agua considerando las variables mencionadas.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Validación de la clasificación supervisada

Se obtuvieron 204 sitios de muestreo, 104 de manera presencial y 100 más a partir de imágenes de mayor resolución (imágenes RAPIDEYE, 5 m de resolución espacial) y el programa Google Earth.

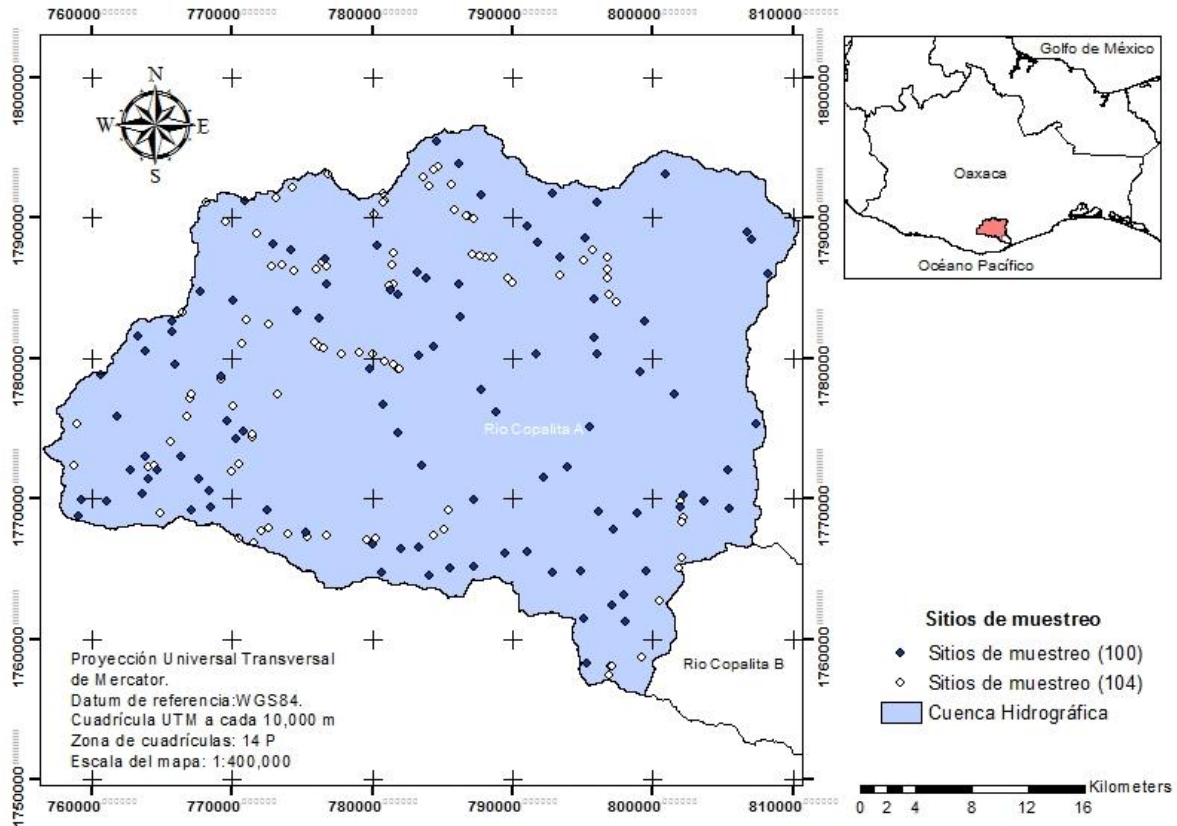


Figura 29. Sitios de muestreo para la validez de la clasificación supervisada de imágenes LANDSAT.

La clasificación por tipos de suelo de las imágenes satelitales obtuvo un índice de Kappa de 0.62 y precisión del 75.49 % lo que indica que la imagen clasificada representa de manera adecuada (buena) la realidad.

| | | Clasificación supervisada 2015 | | | | | | | | | | Totales | Precisión |
|--|-----|--------------------------------|------|------|-----|------|------|------|------|-----|-----|---------|-----------|
| | | BM | BC | BE | SC | SSC | SP | VI | ZP | ZDV | CA | | |
| Trabajo de campo, INEGI y Google Earth | BM | 15 | 4 | | | 1 | | 1 | | | | 21 | 71.4 |
| | BC | 2 | 59 | 4 | | 1 | 1 | 2 | 2 | 3 | | 74 | 79.7 |
| | BE | 2 | 2 | 13 | | 1 | | | 2 | 2 | | 22 | 59.0 |
| | SC | | | | 2 | | | | | | | 2 | 100.0 |
| | SSC | | | | | 7 | 1 | | | | | 8 | 87.5 |
| | SP | | 1 | | | 6 | 19 | 2 | | | | 28 | 67.9 |
| | VI | | 1 | | | 1 | 1 | 11 | 1 | | | 15 | 73.3 |
| | ZP | | | | | | | | 9 | 1 | | 10 | 90.0 |
| | ZDV | 1 | | | | | | 1 | 3 | 14 | | 19 | 73.7 |
| CA | | | | | | | | | | 5 | 5 | 100.0 | |
| Totales | | 20 | 67 | 17 | 2 | 17 | 22 | 17 | 17 | 20 | 5 | 204 | 80.3 |
| Precisión | | 75 | 88.0 | 76.5 | 100 | 41.2 | 86.4 | 64.7 | 52.9 | 70 | 100 | 75.5 | |
| | | 2 | 6.7 | 1.7 | 0.2 | 1.7 | 2.2 | 1.7 | 1.7 | 2 | 0.5 | | |

Tabla 13. Análisis de precisión para la clasificación supervisada de 2015. (BM-bosque mesófilo, BC-bosque de coníferas, BE-bosque de encino, SC-selva caducifolia, SSC-selva subcaducifolia, VI-Vegetación inducida, ZP-zona poblada, CA-cuerpos de agua)

De acuerdo a la matriz de confusión (Tabla 13), se observó que la clasificación de mayor confusión fue la selva subcaducifolia, confundida por el modelo mayormente con la selva perennifolia. De los 67 sitios levantados en bosques de coníferas, 4 fueron tomados por el modelo como bosque mesófilo, 2 como bosque de encino, 1 como selva perennifolia y 1 como vegetación inducida. De igual forma, de los 20 sitios levantados como bosque mesófilo, 2 fueron confundidos con bosque de coníferas, 2 como bosque de encino, y 1 como zona desprovista de vegetación. De los 17 sitios de bosque de encino, 4 fueron confundidos con bosque de coníferas. Se realizaron 17 sitios de observación en zonas pobladas, pero el modelo clasificó 3 como zonas desprovistas de vegetación, 2 como bosque de encino, 2 bosque de coníferas y 1 como vegetación inducida. Se tomaron también 20 sitios de observación en zonas desprovistas de vegetación de los cuales el sistema marcó 3 como bosque de coníferas, 2 como bosque de encino y 1 como zona poblada.

La clasificación obtuvo buenos indicadores de confiabilidad en general, no obstante hubo algunas confusiones de coberturas de uso de suelo. La resolución espacial de las imágenes es de 30 metros lo que significa que cada pixel cubre una superficie del suelo de esa magnitud. Esta podría ser la razón de confusión del sistema ya que el sensor remoto realiza un promedio de la energía reflejada por las distintas coberturas dentro de un mismo pixel. Se observó también que algunas coberturas son semejantes y de difícil identificación al momento de realizar los sitios de observación.

4.2 Uso de suelo y vegetación 1986-2015

La Figura 30 muestra los índices de vegetación de diferencia normalizada de 1986 al 2015, las zonas verdes indican vegetación vigorosa, los tonos amarillos a rojos son zonas desprovistas de vegetación.

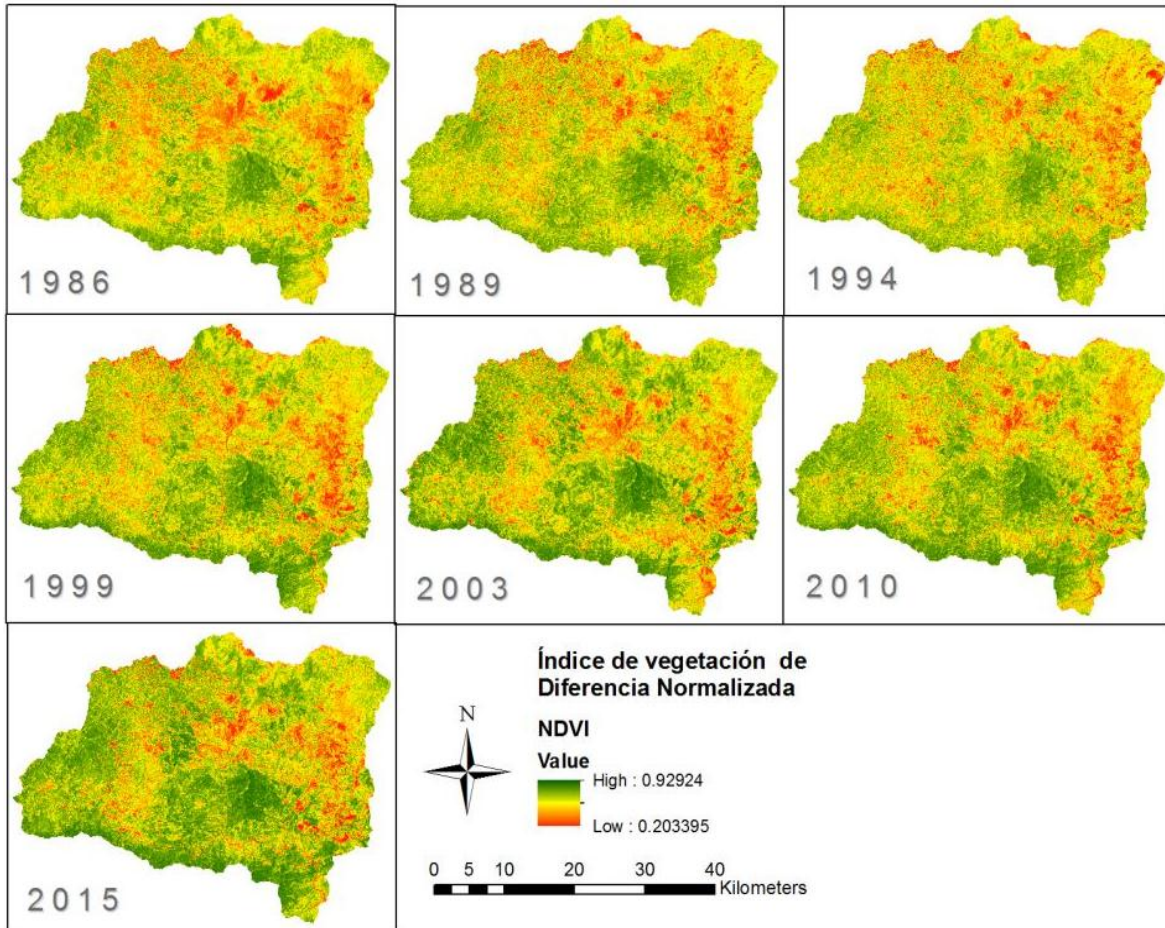


Figura 30. Índice de vegetación de Diferencia normalizada 1986- 2015

Se puede observar mediante análisis visual, que las zonas desprovistas de vegetación disminuyeron gradualmente a razón del aumento de cobertura de vegetación para la cuenca en años recientes.

Las zonas que disminuyeron en superficie son: zona desprovista de vegetación, vegetación inducida, selva perennifolia, selva caducifolia y bosque de coníferas. Las superficies que aumentaron son el bosque de encino y bosque mesófilo de montaña (Figura 31).

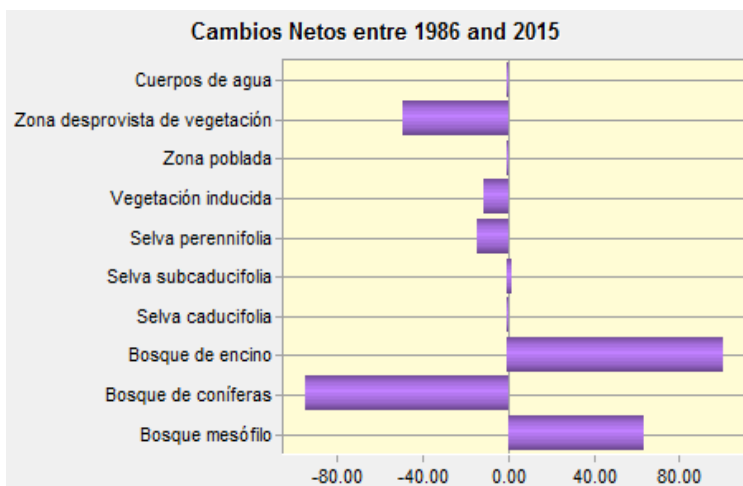


Figura 31. Cambios netos en la estructura de vegetación, 1986-2015.

La superficie de la cuenca que en 1986 estaba desprovista de vegetación ha disminuido, remplazada en gran parte por bosque de coníferas (21.75 km²) y bosque de encino (20.12 km²). La superficie original de bosque de coníferas disminuyó, de 579 a 484 km² siendo reemplazada por bosques de encino (79.9 km²) y por bosque mesófilo (43.19 km²). La zona poblada aumentó, abarcando superficies que anteriormente eran; Bosque de coníferas (0.82 km²), vegetación inducida (0.14 km²), zona desprovista de vegetación (0.32 km²) y bosque mesófilo (0.06 km²). La superficie de selva caducifolia y subcaducifolia aumentó 0.6 y 2.32 km² respectivamente reemplazando parte de la selva perennifolia y vegetación inducida. 14.23 km² de selva perennifolia fue reemplazada por bosque mesófilo (7.32 km²) y bosque de coníferas (1.46 km²).

De manera general se observa que las coberturas de bosques y selvas aumentaron para el 2015 (Tabla 14).

| Cobertura | 1986 (km ²) | 2015 (km ²) | Superficie aumentada % |
|----------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| Bosque mesófilo | 178.90 | 242.12 | 35.5 |
| Bosque de coníferas | 579.05 | 484.05 | -16.4 |
| Bosque de encino | 49.39 | 150.99 | 206.5 |
| Selva caducifolia | 3.66 | 4.26 | 15.7 |
| Selva subcaducifolia | 35.60 | 37.92 | 6.6 |
| Selva perennifolia | 175.67 | 161.44 | -8.1 |
| Vegetación inducida | 188.15 | 176.59 | -6.2 |
| Zona poblada | 5.38 | 6.16 | 15.1 |
| Zona sin vegetación | 114.77 | 65.78 | -42.8 |
| Cuerpos de agua | 2.72 | 3.98 | 47.3 |

Tabla 14. Superficies de las coberturas de vegetación de 1986 y 2015.

La Figura 32 muestra las contribuciones y pérdidas por tipos de vegetación entre mapas.

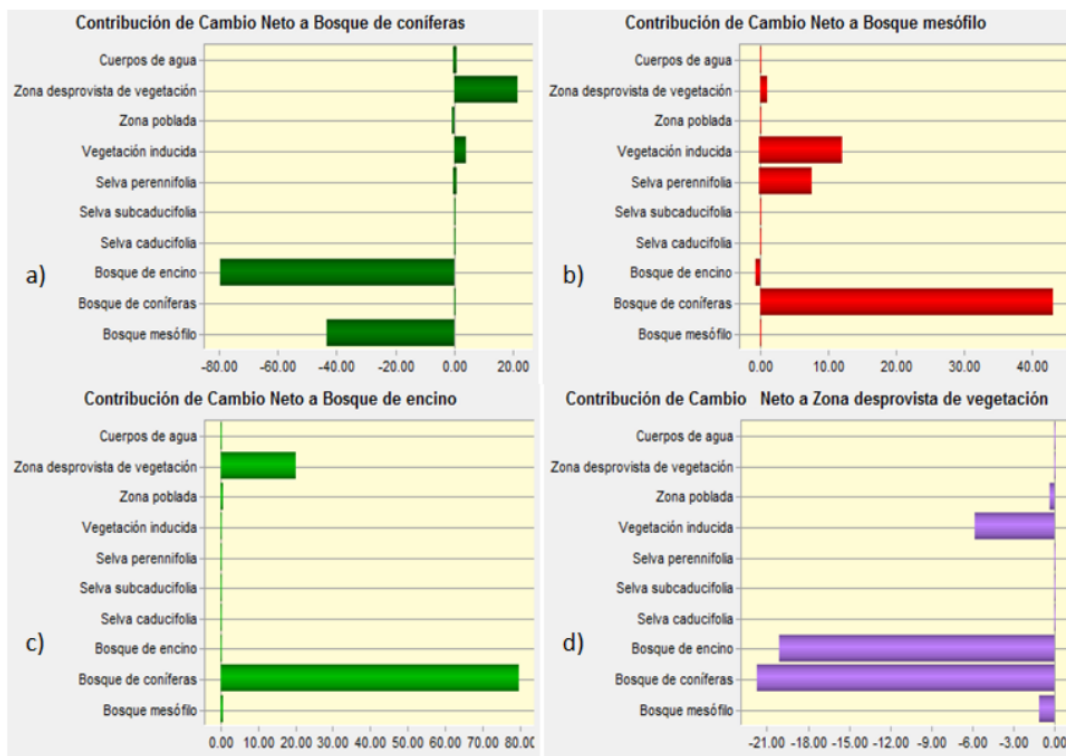


Figura 32. Contribución neta de cambio por vegetación en km^2 el inciso a) indica los cambios netos a bosque de coníferas, b) cambio neto a bosque mesófilo de montaña, c) Cambio neto a bosque de encino, d) cambio neto a zona desprovista de vegetación.

Referente a cobertura vegetal, se obtuvo lo contrario de algunos trabajos de investigación en la misma zona, enfocados a recursos hídricos, los cuales mencionan que la cuenca tendría problemas de desabasto a razón de la disminución de los ecosistemas forestales (Rodríguez, 2012; Ramírez, 2014). Estos estudios se realizaron para periodos de tiempo similares con la diferencia de que no realizaron análisis de cambios de uso de suelo.

Los mapas de vegetación (1986 Figura 33 y 2015 Figura 34) fueron realizados mediante las imágenes satelitales; es de resaltar que las zonas amarillas que indican zonas desprovistas de vegetación disminuyeron de 1986 a la actualidad.

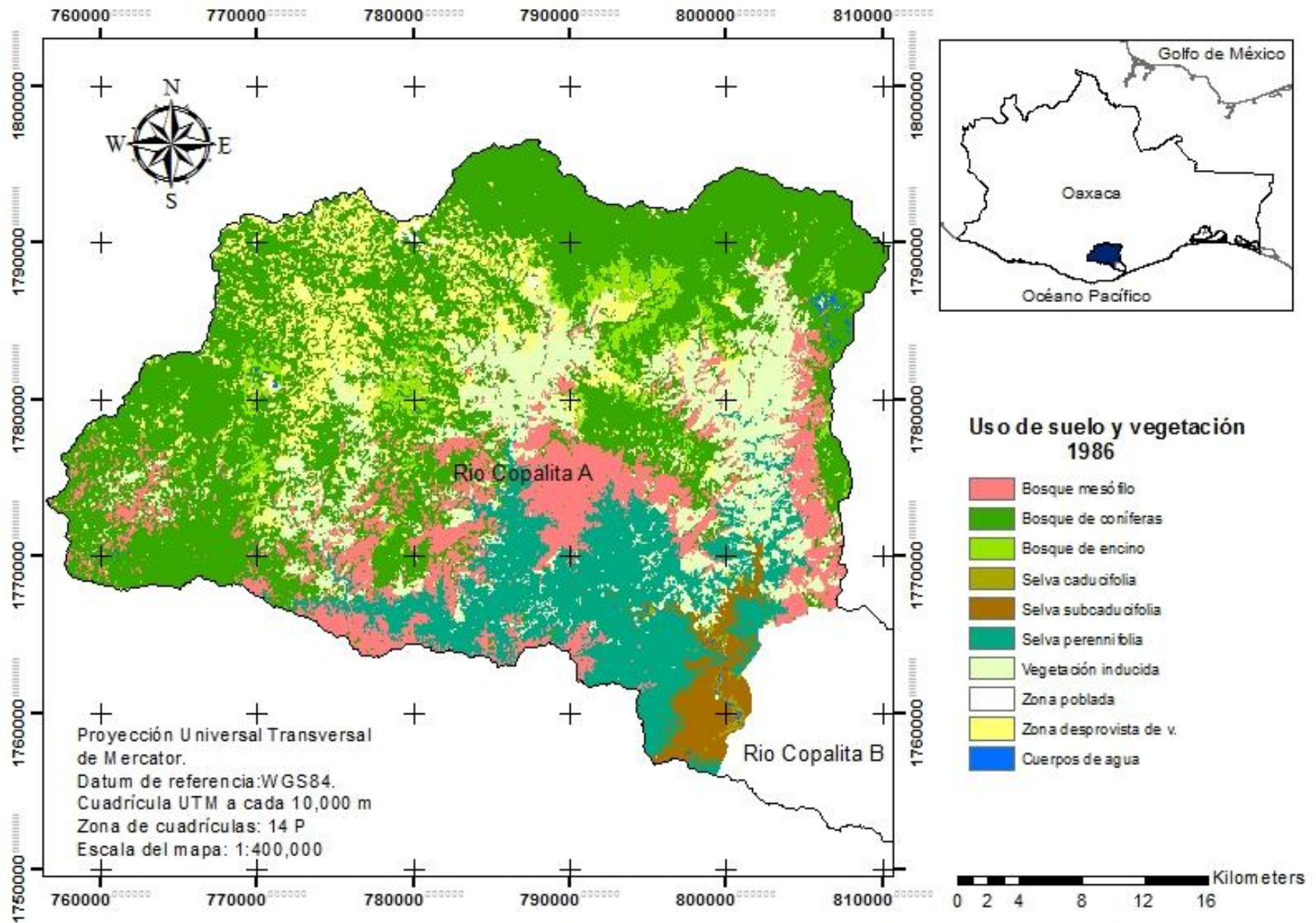


Figura 33. Uso de suelo y vegetación de 1986 por el método de clasificación supervisada

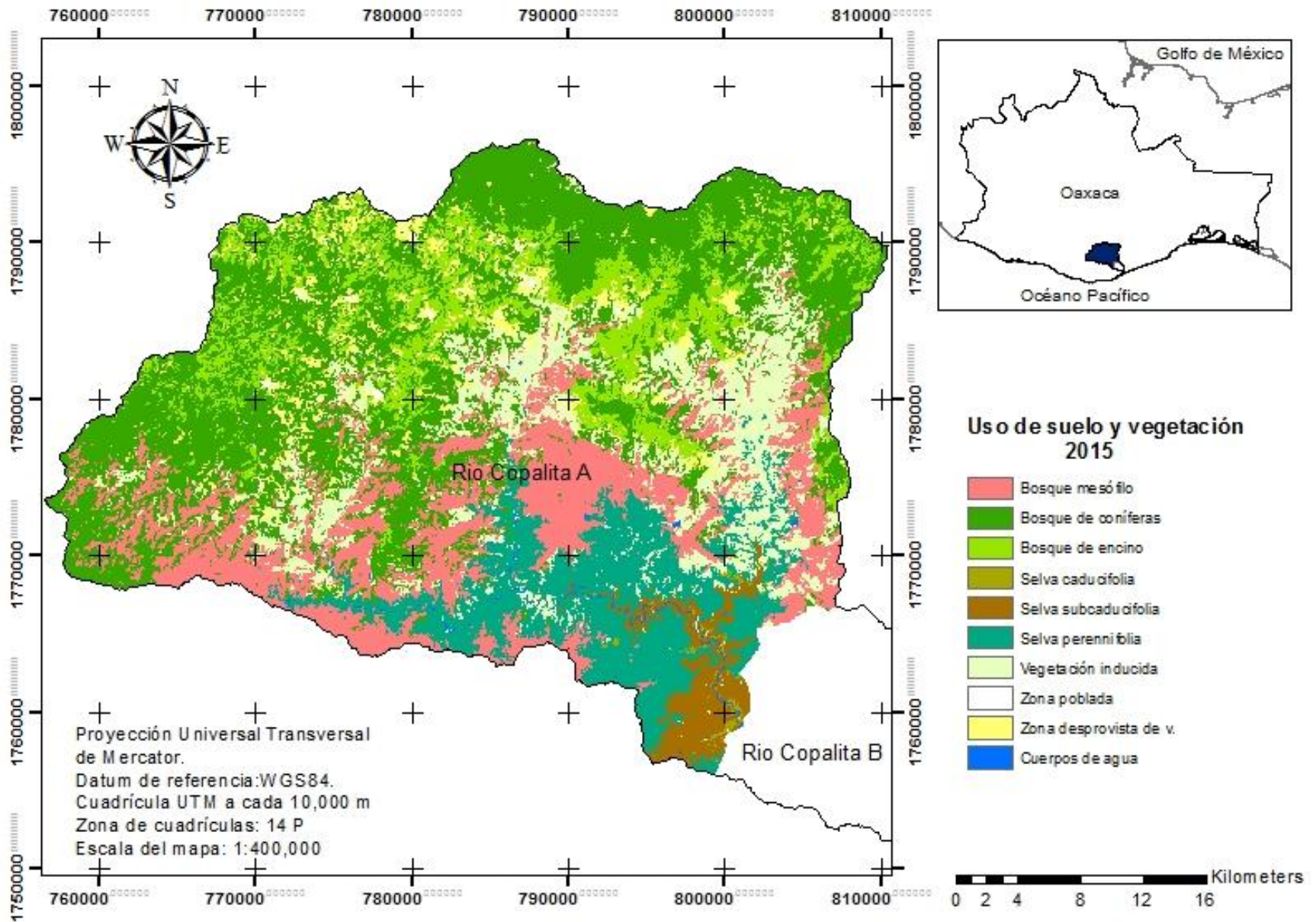


Figura 34. Uso de suelo y vegetación de 2015 por el método de clasificación supervisada

4.3 Ganancias y pérdidas del bosque mesófilo de montaña

El bosque mesófilo aumentó superficie sustituyendo a otros tipos de coberturas de la siguiente manera: 1.06 km² de zona desprovista de vegetación, 12.14 km² de vegetación inducida, 7.7 km² de Selva perennifolia, 43.19 km² de Bosque de coníferas y fue sustituido en 0.8 km² por superficie de bosque de encino. La Figura 35 muestra las ganancias, pérdidas y persistencias de este tipo de bosque en la cuenca para el periodo de estudio.

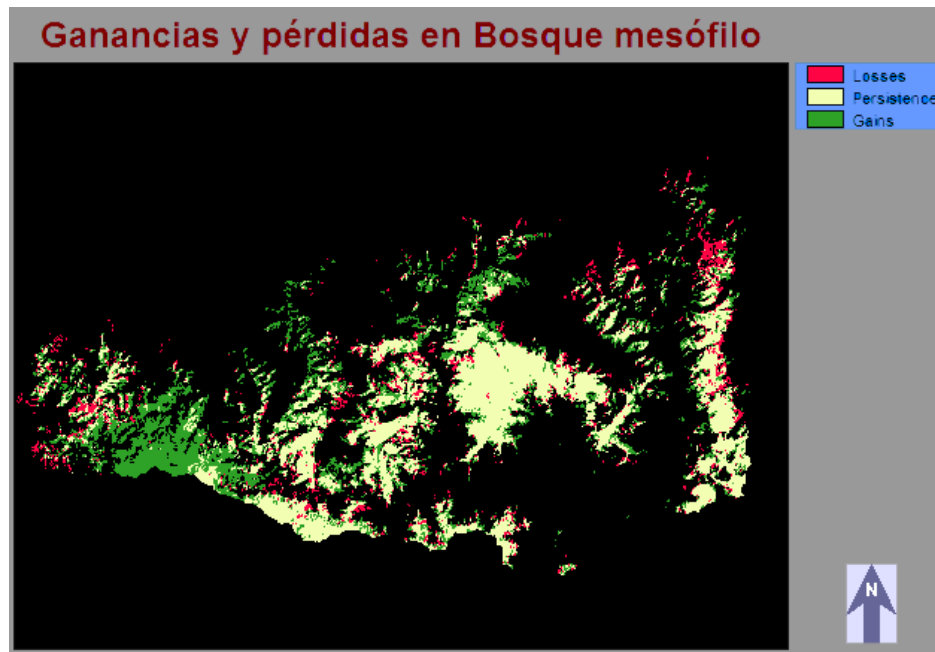


Figura 35. Cobertura espaciotemporal del bosque mesófilo de montaña, 1986-2015

De acuerdo a las estimaciones a nivel nacional de Toledo *et al.* (2011), la superficie de bosque mesófilo en México se ha reducido, también menciona que este ecosistema en la cuenca Río Copalita está muy fragmentado. Los resultados avalan la fragmentación de este ecosistema, pero indican lo contrario con respecto a su superficie. El aumento en cobertura de este ecosistema no puede generalizarse para todo el país, ya que son las condiciones específicas de la cuenca las que han propiciado la recuperación de este tipo de bosque.

4.3 Análisis de predicción mediante cadenas de Markov

Cada uno de los píxeles de una imagen satelital es representada numéricamente (valores digitales de las imágenes satelitales). Esta característica de las imágenes satelitales, permite la realización de predicciones.

El análisis predictivo de cambios de uso de suelo mediante cadenas de Markov, consistió en vincular las probabilidades de cambios de vegetación dentro de una matriz en un tiempo t , basado solo en el estado anterior del mismo sistema. Con cada par de estados (a_i, a_j) se establece la probabilidad p_{ij} de que a_j suceda inmediatamente después de que suceda a_i (Privault, 2013).

La proyección realizada para 2030 (Tabla 15), indica que las coberturas de menor probabilidad de permanencia son: zonas pobladas (34%), zonas desprovistas de vegetación (45%), y selva caducifolia (68%).

| Dado: | Probabilidad de cambio a: | | | | | | | | | |
|-------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | BM | BC | BE | SC | SSC | SP | VI | ZP | ZDV | CA |
| BM | 0.89 | 0.06 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| BC | 0.07 | 0.76 | 0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| BE | 0.00 | 0.20 | 0.73 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.01 | 0.05 | 0.00 |
| SC | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.68 | 0.16 | 0.04 | 0.03 | 0.00 | 0.00 | 0.09 |
| SSC | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.87 | 0.09 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| SP | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.88 | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| VI | 0.07 | 0.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.03 | 0.78 | 0.00 | 0.02 | 0.00 |
| ZP | 0.00 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.34 | 0.52 | 0.00 |
| ZDV | 0.00 | 0.28 | 0.16 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.08 | 0.03 | 0.46 | 0.00 |
| CA | 0.00 | 0.56 | 0.00 | 0.02 | 0.07 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.32 |

Tabla 15. Probabilidad de permanencias y cambios mediante cadenas de Markov

Las coberturas que aseguran mayor probabilidad de permanencia son: Bosque mesófilo (88%), selva perennifolia (88%), selva subcaducifolia (88%), vegetación inducida (77%), bosque de coníferas (76%), y bosque de encino (72%).

De acuerdo a las probabilidades de permanencias y cambios de las superficies entre coberturas, se calcularon las superficies de cada tipo de suelo para 2030 (Tabla 16). Las coberturas que aumentarán en superficie son bosque de encino (19%), bosque mesófilo (10.6%), selva caducifolia (4.9%), selva subcaducifolia (2.3%) y cuerpos de agua (1.7%). Las coberturas de uso de suelo que disminuirán son: Zonas desprovistas de vegetación (14.6%), bosques de coníferas (6.9%), zonas pobladas (4.3%), selva perennifolia (3.6%) y vegetación inducida (3.6%).

| Cobertura | 1986 | 2015 | 2030 | Aumento de superficie (%) |
|-----------|--------|--------|--------|---------------------------|
| BM | 178.9 | 242.12 | 267.85 | 10.6 |
| BC | 579.05 | 484.05 | 450.42 | -6.9 |
| BE | 49.39 | 150.99 | 179.80 | 19.1 |
| SC | 3.66 | 4.26 | 4.47 | 4.9 |
| SSC | 35.6 | 37.92 | 38.78 | 2.3 |
| SP | 175.67 | 161.44 | 155.69 | -3.6 |
| VI | 188.15 | 176.59 | 170.19 | -3.6 |
| ZP | 5.38 | 6.16 | 5.89 | -4.3 |
| ZDV | 114.77 | 65.78 | 56.15 | -14.6 |
| CA | 2.72 | 3.98 | 4.05 | 1.7 |

Tabla 16. Superficies por tipos de suelo para 2030 mediante cadenas de Markov

El aumento de poblaciones de encinos puede ser explicado a razón de que estos tipos de bosques son beneficiados por las perturbaciones y abandono de tierras agrícolas, además de que su regeneración está mayormente adaptada a condiciones de luz solar directa en comparación a otros ecosistemas.

El bosque mesófilo requiere de condiciones específicas de humedad y calor para la generación de neblina (variables en aumento en la cuenca), cuya existencia tiene un papel fundamental en la dinámica de estos bosques al proporcionar un ambiente termo regulado y favorecer la presencia de una gran diversidad de flora y fauna (Leija *et al.*, 2011)

4.4 Estimación de conductividad hidráulica y capacidad de infiltración

Hubo dificultad en el acceso de algunas zonas por la falta de carreteras, derrumbes y caminos que actualmente no son funcionales. El número de sitios levantados en estas condiciones fueron 28 de 39 pruebas de infiltración (tamaño de muestra necesario para un intervalo de 95 % de confianza y un 5 % de error).

La Tabla 17 muestra el resumen de los datos obtenidos de las pruebas de infiltración para el cálculo de conductividad hidráulica y capacidad de infiltración:

| N | Sitio | x | y | t ₁ | t ₂ | h ₁ | h ₂ | F ₀ | F _b | K Horton | Pearson | C-Infil | K m/día |
|----|-------|--------|---------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------|---------|---------|---------|
| 1 | 4 | 769559 | 1789687 | 60 | 100 | 25.2 | 24.4 | 0.4 | 0.440 | -0.1 | 0.98 | 38.2 | 10.5 |
| 2 | 21 | 776760 | 1786547 | 240 | 510 | 29.6 | 26.6 | 0.04 | 0.013 | -0.03 | 0.94 | 11.2 | 5.1 |
| 3 | 39 | 780756 | 1791155 | 90 | 210 | 26.8 | 17.5 | 0.086 | 0.083 | 0.0003 | 0.96 | 71.8 | 46.0 |
| 4 | 11 | 776809 | 1780700 | 600 | 1200 | 33.5 | 33.3 | 0.04 | 0.001 | -0.06 | 0.96 | 0.5 | 0.1 |
| 5 | 24 | 771078 | 1782771 | 360 | 1140 | 31.5 | 25 | 0.009 | 0.140 | -0.03 | 0.96 | 8 | 3.8 |
| 6 | 1 | 784764 | 1793696 | 600 | 1800 | 29.4 | 20 | 0.02 | 0.009 | -0.02 | 0.91 | 7.5 | 4.2 |
| 7 | 3 | 786833 | 1790127 | 360 | 1800 | 34.8 | 34.4 | 0.001 | 0.001 | 0.0001 | 0.89 | 0.5 | 0.1 |
| 8 | 25 | 796819 | 1786320 | 390 | 600 | 24.6 | 20.4 | 0.02 | 0.029 | 0.0003 | 0.94 | 18.0 | 11.6 |
| 9 | 23 | 796795 | 1785671 | 270 | 360 | 22.2 | 20 | 0.2 | 0.067 | -0.02 | 0.97 | 33.7 | 15.0 |
| 10 | 22 | 797402 | 1783955 | 100 | 300 | 25 | 18.4 | 0.12 | 0.037 | -0.03 | 0.95 | 32.2 | 19.9 |
| 11 | 38 | 780056 | 1780350 | 450 | 660 | 25.2 | 22.4 | 0.2 | 0.016 | -0.025 | 0.98 | 13.5 | 7.3 |
| 12 | 7 | 770538 | 1772447 | 210 | 660 | 31.9 | 31.9 | 0.02 | 0.001 | -0.02 | 0.97 | 0.5 | 0.0 |
| 13 | 37 | 773280 | 1777461 | 270 | 1320 | 33.9 | 29.6 | 0.007 | 0.004 | -0.006 | 0.94 | 3.5 | 1.7 |
| 14 | 19 | 764941 | 1768972 | 1320 | 1560 | 22.6 | 19.4 | 0.08 | 0.024 | -0.01 | 0.95 | 20.3 | 8.4 |
| 15 | 31 | 771474 | 1774413 | 135 | 660 | 29.8 | 15.9 | 0.1 | 0.025 | -0.02 | 0.97 | 21.7 | 15.5 |
| 16 | 40 | 771226 | 1767038 | 540 | 2400 | 29.8 | 19.5 | 0.0007 | 0.004 | -0.005 | 0.95 | 8.78 | 3.0 |

Continúa...

| | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|--------|---------|------|------|------|------|------|-------|--------|------|------|------|
| 17 | 29 | 764049 | 1772665 | 570 | 1800 | 29.1 | 21.3 | 0.08 | 0.008 | -0.04 | 0.97 | 6.6 | 3.3 |
| 18 | 14 | 766927 | 1777130 | 360 | 780 | 32.2 | 22.2 | 0.1 | 0.046 | -0.001 | 0.89 | 39.8 | 12.4 |
| 19 | 18 | 802177 | 1768634 | 660 | 2100 | 27.8 | 18.3 | 0.02 | 0.008 | -0.002 | 0.95 | 6.7 | 3.8 |
| 20 | 13 | 802009 | 1769866 | 660 | 840 | 31.6 | 19.7 | 0.1 | 0.069 | 0.0009 | 0.9 | 59.6 | 34.0 |
| 21 | 34 | 802083 | 1765842 | 225 | 1080 | 31.6 | 23.4 | 0.02 | 0.009 | -0.004 | 0.86 | 7.6 | 4.6 |
| 22 | 20 | 799247 | 1758657 | 600 | 1140 | 35.2 | 22.2 | 0.1 | 0.055 | -0.008 | 0.95 | 47.7 | 11.1 |
| 23 | 2 | 797062 | 1758021 | 660 | 960 | 31.2 | 20.7 | 0.06 | 0.036 | -0.002 | 0.96 | 31.4 | 17.7 |
| 24 | 17 | 784363 | 1767397 | 960 | 1440 | 31.6 | 22.1 | 0.04 | 0.022 | -0.005 | 0.91 | 18.8 | 9.7 |
| 25 | 28 | 785414 | 1769141 | 660 | 1560 | 34 | 21 | 0.1 | 0.015 | -0.06 | 0.95 | 13.3 | 6.9 |
| 26 | 10 | 775402 | 1767339 | 270 | 2400 | 34.1 | 32.5 | 0.03 | 0.001 | -0.01 | 0.98 | 0.89 | 0.3 |
| 27 | 30 | 759027 | 1775328 | 90 | 2400 | 32.7 | 29.8 | 0.2 | 0.002 | -0.04 | 0.99 | 1.87 | 0.5 |
| 28 | 28 | 758765 | 1772367 | 1020 | 1320 | 32.6 | 24.4 | 0.04 | 0.029 | -0.01 | 0.95 | 24.9 | 12.5 |

Tabla 17. Valores puntuales de conductividad hidráulica y capacidad de infiltración

Se obtuvieron valores del coeficiente de Pearson superiores al 0.9 entre los datos estimados mediante la expresión de Horton y la tasa de infiltración para el cálculo de la capacidad de infiltración.

Los valores de conductividad hidráulica y capacidad de infiltración son proporcionales, en promedio la primera equivale a un 45 % del segundo valor.

El rango de valores de conductividad es de 0 a 46 m/día. Los rangos de valores para capacidad de infiltración van de 0.5 a 71.81 m/día.

La Tabla 18 muestra la distribución de frecuencias de los datos de conductividad hidráulica, se observa que los datos se acumulan mayormente de 0 a 15.2 m/día (89 % de los datos), hay dos datos que salen notablemente de este rango.

| intervalos de clase | | | fi | Fi | hi | f % |
|---------------------|--------------|----------------|----|----|------|-------|
| lim inferior | lim superior | marca de clase | | | | |
| 0 | 6 | 3 | 13 | 13 | 0.46 | 46.43 |
| 6.01 | 12.01 | 9.01 | 7 | 20 | 0.25 | 25.00 |
| 12.02 | 18.02 | 15.02 | 5 | 25 | 0.18 | 17.86 |
| 18.03 | 24.03 | 21.03 | 1 | 26 | 0.04 | 3.57 |
| 24.04 | 30.04 | 27.04 | 0 | 26 | 0.00 | 0.00 |
| 30.05 | 36.05 | 33.05 | 1 | 27 | 0.04 | 3.57 |
| 36.06 | 42.06 | 39.06 | 0 | 27 | 0.00 | 0.00 |
| 42.07 | 48.07 | 45.07 | 1 | 28 | 0.04 | 3.57 |
| | | | 28 | | 1 | 100 |

Tabla 18. Distribución de frecuencias de los datos de conductividad hidráulica

A partir de la gráfica de distribución de frecuencias (Figura 36), se aprecia que el conjunto de datos no sigue una distribución normal.

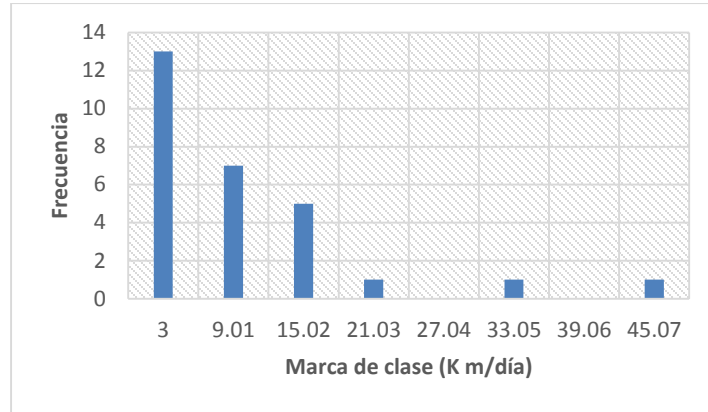


Figura 36. Distribución de frecuencias

Para determinar si existe alguna correlación entre los valores de la conductividad hidráulica y algunos valores de su localización en espacio, se realizaron las siguientes correlaciones: Conductividad hidráulica con: Altura sobre el nivel del mar, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado, valor de Reflectancia de la superficie en el infrarrojo cercano (SWIR 2), temperatura y pendiente del terreno.

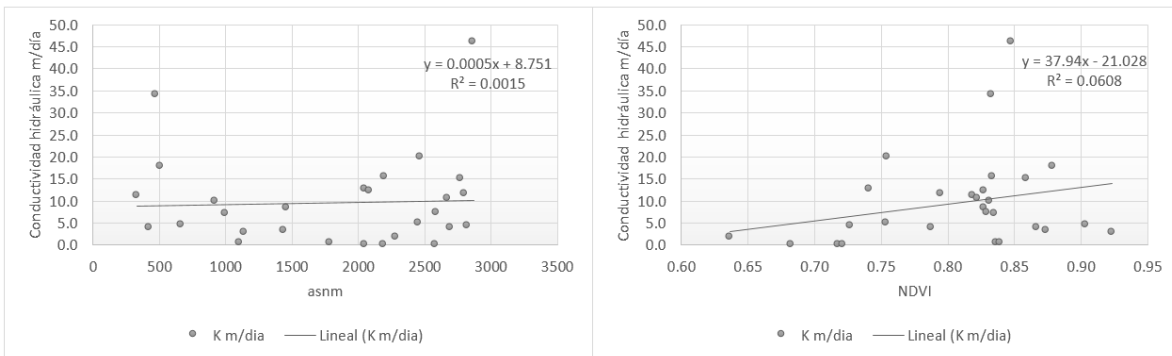


Figura 37. Correlación lineal de la conductividad hidráulica con la altura sobre el nivel del mar (ASNM) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

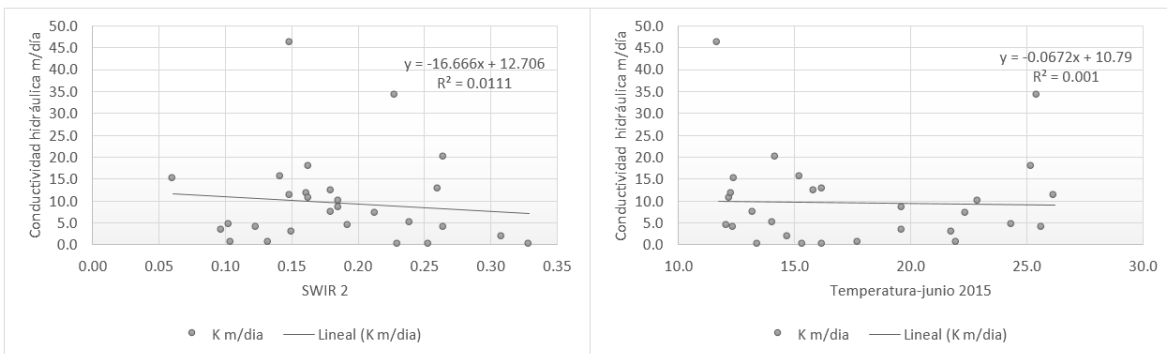


Figura 38. Correlación lineal de la conductividad hidráulica con los valores de Reflectancia de la superficie en el infrarrojo cercano (SWIR 2) y la temperatura de junio de 2015.

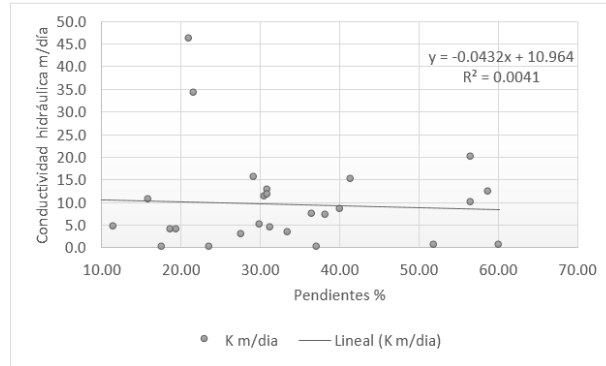


Figura 39. Correlación lineal de la conductividad hidráulica con la pendiente del terreno

Las gráficas 37, 38 y 39 muestran que no hay correlación alguna entre estas variables.

A partir de diagramas de caja, los datos de conductividad hidráulica se dividieron por tipos de vegetación y por tipos de suelo:

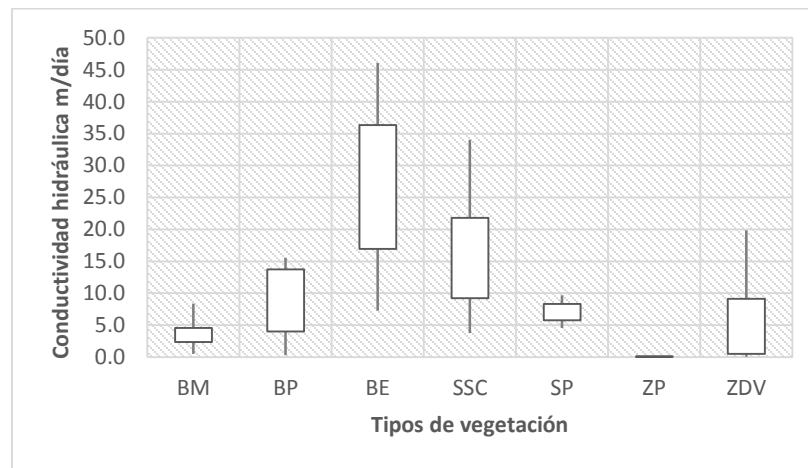


Figura 40. Diagramas de caja de la conductividad hidráulica por tipos de vegetación

Los diagramas de caja y bigotes de la conductividad hidráulica por tipos de vegetación (Figura 40), indican poca variabilidad en los datos de bosque mesófilo, teniendo este valores menores que los demás tipos de usos de suelo, exceptuando los valores de las zonas pobladas, que por ser superficies casi impermeables tienen valores de conductividad cercanos a 0. La selva perennifolia presenta también valores con poca variabilidad (4.6 a 8.3 m/día).

La mayor variabilidad de los datos de conductividad se presentan en el bosque de encino, los rangos en este tipo de bosque van de 7.3 a 46 m/día. La selva subcaducifolia igualmente presenta datos de gran variabilidad. Es en bosque de encino y selva subcaducifolia en donde se presentaron los valores más altos de la conductividad hidráulica y capacidad de infiltración.

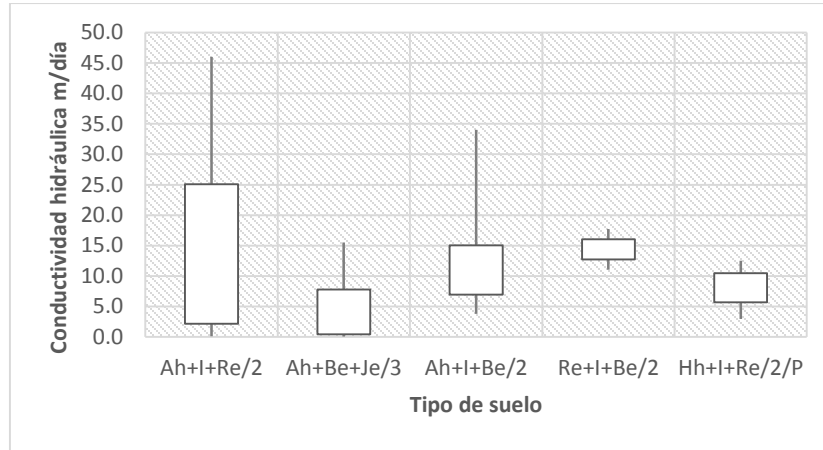


Figura 41. Diagramas de caja de la conductividad hidráulica por tipos de suelo

Los diagramas de caja de la conductividad hidráulica por tipos de suelo muestran menor variabilidad entre los promedios de conductividad hidráulica que por tipos de vegetación (Figura 41).

Tomando en cuenta el comportamiento de los valores tomados de la conductividad hidráulica en las pruebas de infiltración (Figura 42), se utilizó el método de Distancia Inversa Ponderada (IDW, Inverse Distance Weighted) del programa ArcMap 10.1 para la interpolación de los datos.

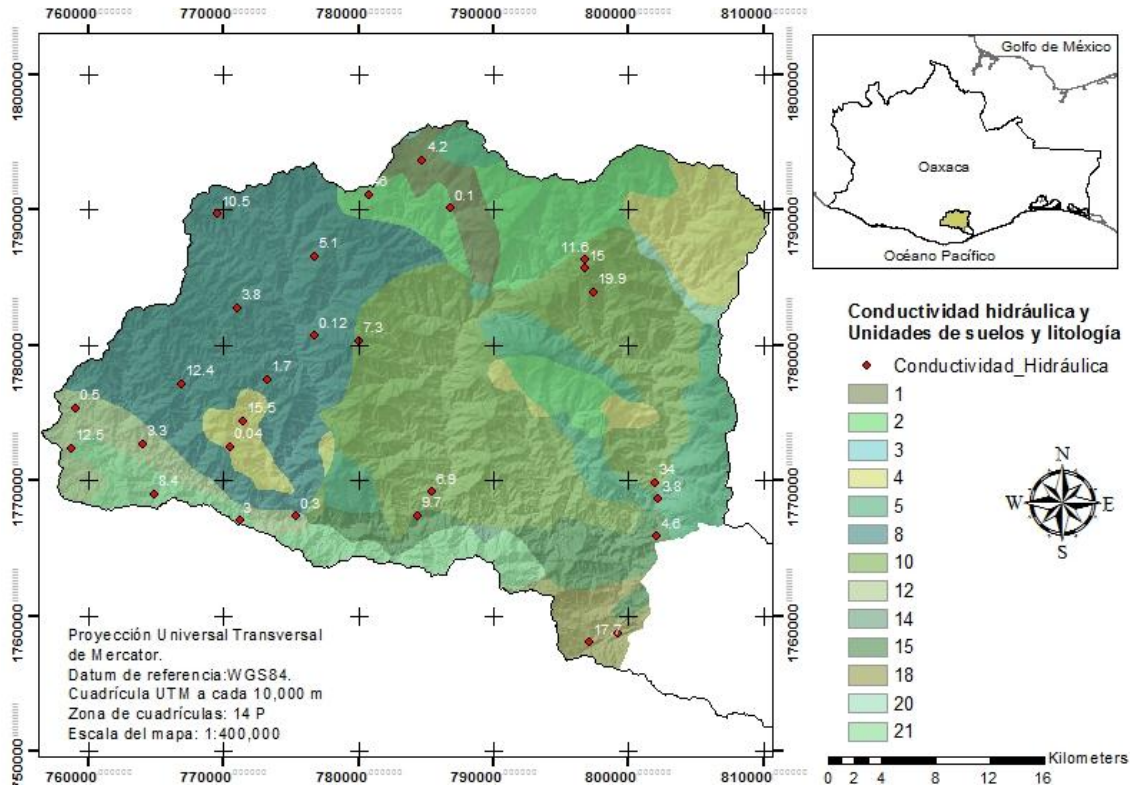


Figura 42. Conductividad hidráulica por tipos de suelo y litología

El siguiente mapa (Figura 43) muestra la distribución de la conductividad hidráulica en la superficie de la cuenca, la escala va de blanco a azul intenso al aumentar los valores de conductividad.

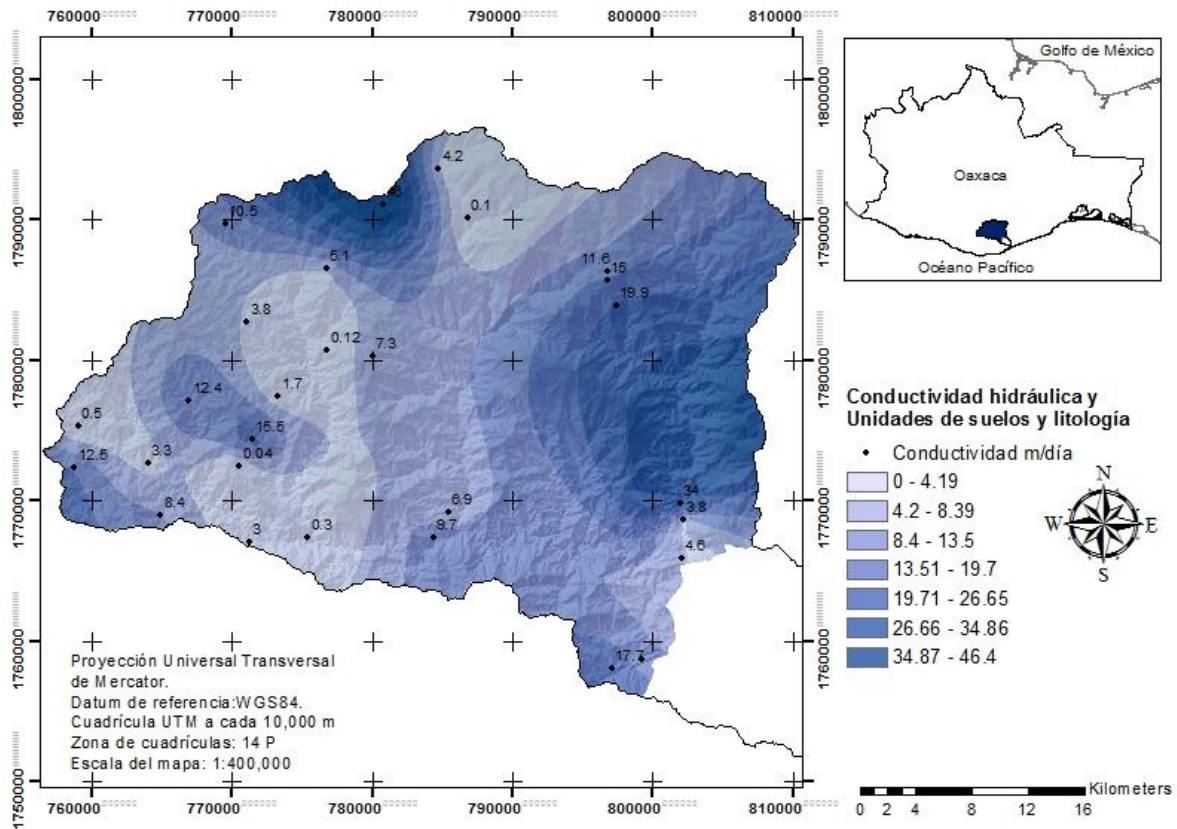


Figura 43. Conductividad hidráulica interpolada

4.5 Variables climatológicas

De las estaciones climatológicas que están distribuidas cerca de la zona de estudio, se tomó solo la información de las estaciones de San Mateo Río Hondo y San Miguel Suchixtepec, ya que estas son las que se encuentran dentro del perímetro de la cuenca, además de ser las únicas con información completa para el periodo de estudio.

La gráfica de la Figura 44 muestra un incremento en el promedio anual de precipitación en los años más recientes, esto basado en las pendientes positivas de las ecuaciones de las líneas de tendencia central (1.81 y 1.14 respectivamente). Se obtuvieron coeficientes de determinación bajos ya que una línea no representa

adecuadamente las variaciones de la precipitación a través de los años, pero da una idea de la tendencia que estos valores siguen.

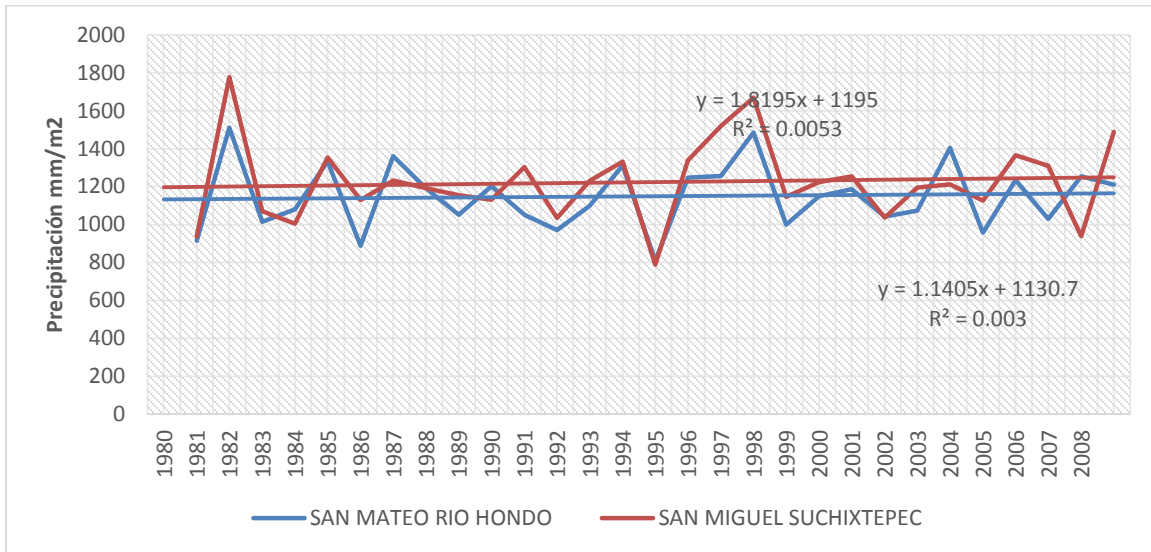


Figura 44. Distribución de los datos de precipitación anual periodo 1980-2008.

La temperatura media tuvo un comportamiento uniforme a través del tiempo, con una tendencia ligera de incremento. Los valores de San Miguel Suchixtepec son estimados de mejor manera por una ecuación de tendencia central, en esta, se obtuvo un coeficiente de determinación de 0.62. Ambas líneas muestran una pendiente positiva (0.0093 y 0.0727 respectivamente), que da a entender un aumento en la temperatura media en los años más actuales (Figura 45).

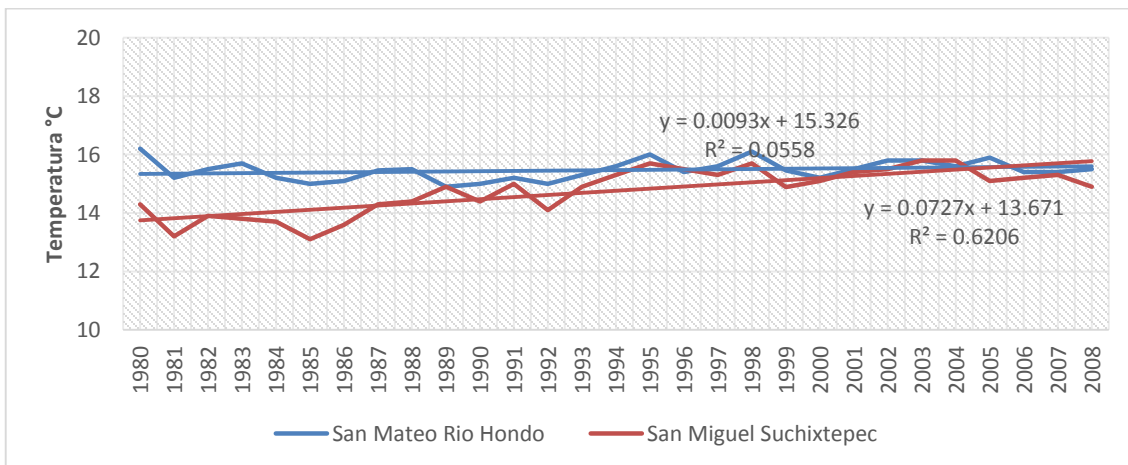


Figura 45. Temperatura media observada, periodo 1980-2008.

Es probable que esta tendencia de aumento en los promedios anuales de temperaturas y precipitación esté asociada al aumento de coberturas arbóreas.

4.6 Balance hídrico

El balance hídrico anual indica que hubo mayor precipitación en el año de 1989 de la cual, el 47.2 % salió de la cuenca en forma de evapotranspiración, 18.5 % como infiltración y 34.3 % en forma de escurrimientos (Tabla 19).

Comparando las variables con el año de 1986 se observa que la evapotranspiración es igual al 61.1% del total de entradas, esto puede ser explicado a razón de mayores temperaturas durante el año y a la menor precipitación registrada por las estaciones (Tabla 19).

Los volúmenes de escurrimiento registrados por la estación hidrométrica para los dos años analizados (1986, 1989) fueron distintos en cantidad (580,548.01 miles de m³ para 1986 y 754,359.62 miles de m³ para 1989), pero tomando en cuenta la cantidad de agua de entrada (precipitaciones), reportaron escurrimientos similares en proporción. Para 1986 los escurrimientos representaron el 33 % de la precipitación total y para 1989 el 34.3 %.

Valores mayores de evapotranspiración en conjunto con menores cantidades de precipitación dieron como resultado menor proporción de agua infiltrada para 1986 (6% del total de entradas en comparación con el 18.5% del total de 1989).

| Variables | 1986 | | 1989 | |
|--------------------|------------|-------|------------|-------|
| | Media (mm) | % | Media (mm) | % |
| Precipitación | 1319.8 | 100.0 | 1651.3 | 100.0 |
| Evapotranspiración | 805.7 | 61.1 | 779.6 | 47.2 |
| Infiltración | 78.6 | 6.0 | 305.9 | 18.5 |
| Escurrimientos | 435.4 | 33.0 | 565.8 | 34.3 |

Tabla 19. Balance general de la cuenca (1986 1989)

Para ambos años, la época de lluvias comenzó en abril y terminó en noviembre, registrando la mayor precipitación los meses de junio. El comportamiento de la evapotranspiración a lo largo del año inicio con valores bajos, aumentando ligeramente a mediados del año y disminuyendo al concluir el año de una manera constante, en función de la temperatura (Figuras 46 y 47).

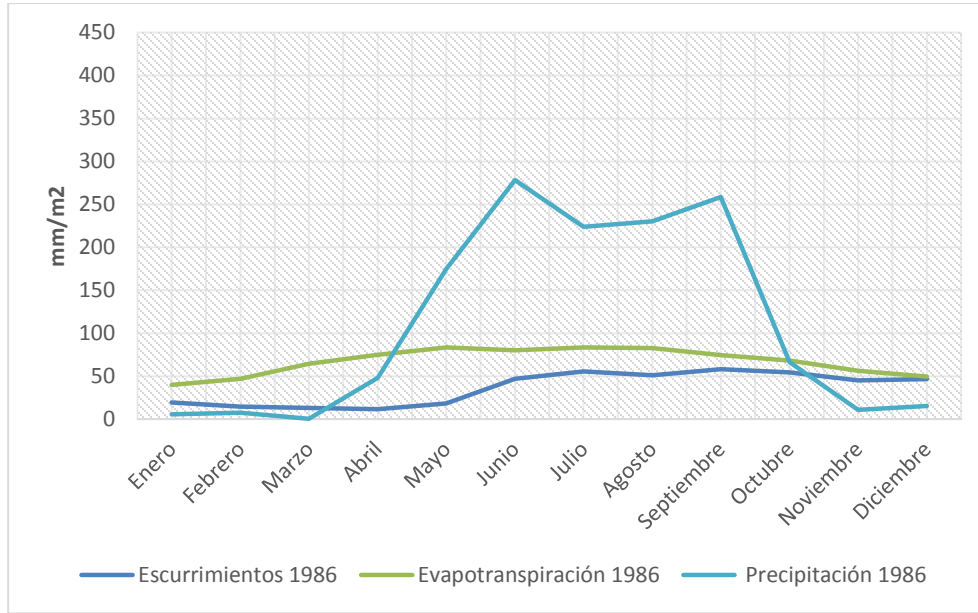


Figura 46. Balance hídrico mensual (1986)

Los escurrimientos se comportaron de una manera distinta, el caudal base para ambos años fue registrado de enero hasta finales de mayo. Los volúmenes de escurrimiento aumentaron tiempo después del inicio de las precipitaciones. En el año de 1989 se observa claramente que los volúmenes en los meses de septiembre y octubre aumentaron, aunque para estas fechas el registro de precipitaciones indicaba un descenso. Se esperaba que los escurrimientos aumentaran a razón de aumentos en las precipitaciones pero los registros indican un desfase entre estas variables.

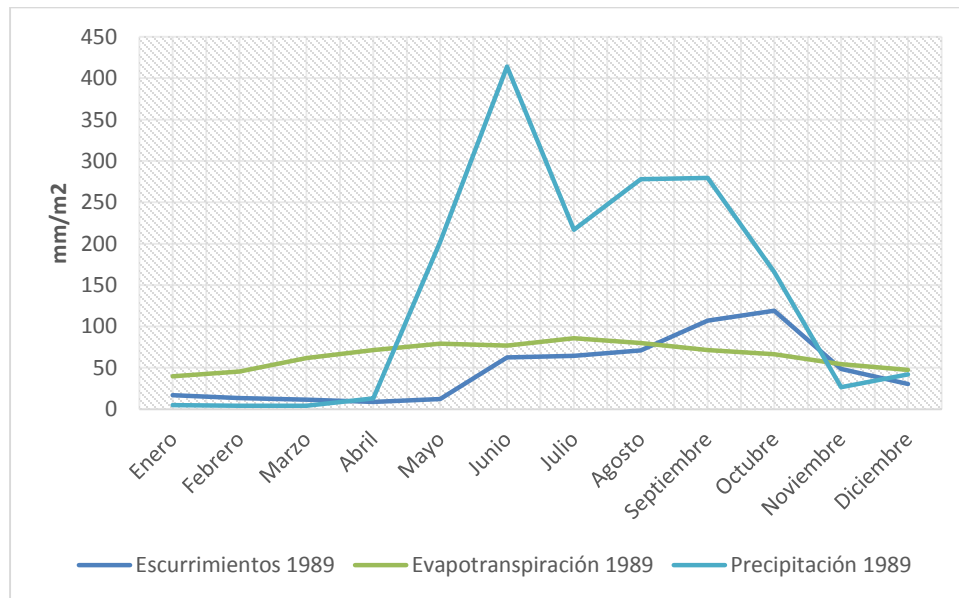


Figura 47. Balance hídrico mensual (1989)

Se obtuvo la cartografía para la realización del balance (precipitación, escurrimientos, evapotranspiración e infiltración) a una resolución espacial de 30 metros (Figura 48 y 49).

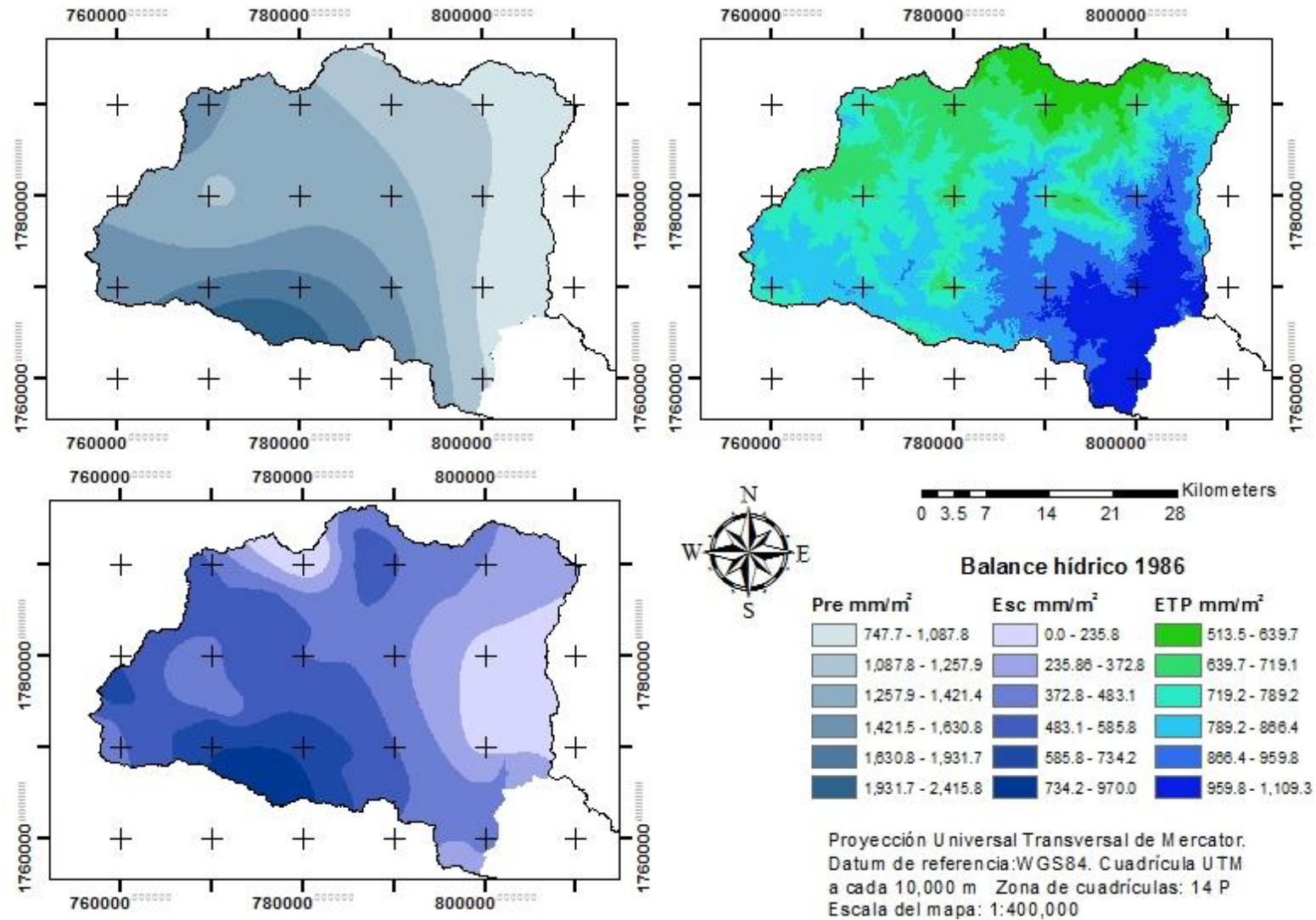


Figura 48. Balance general para el año 1986

A pesar de que los balances se realizaron para años cercanos (1986-1989), los patrones climáticos no son semejantes. La precipitación en 1986 se concentró en la zona inferior izquierda de la cuenca, para 1989 hubo dos zonas de concentración, las partes superior e inferior izquierdas.

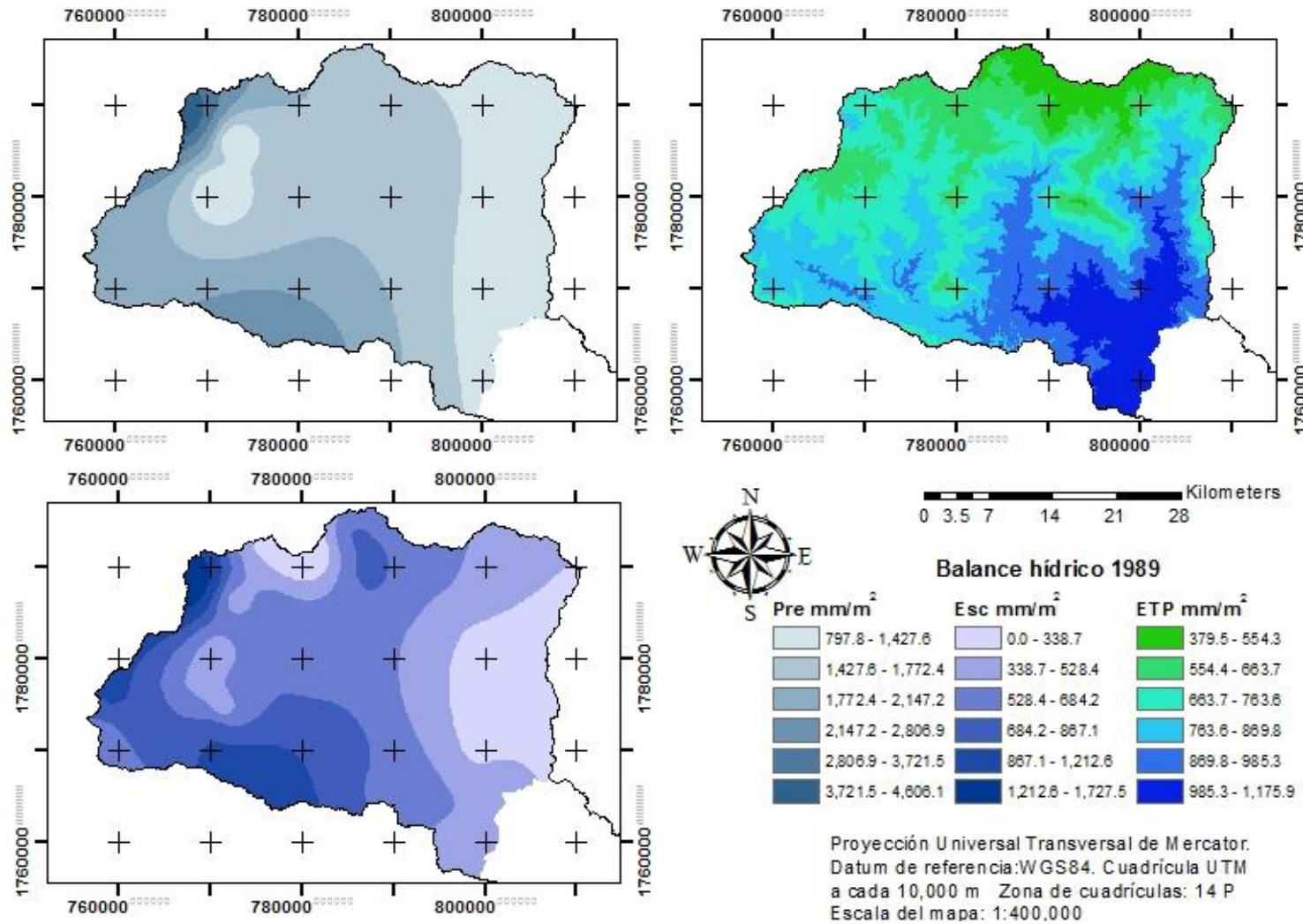


Figura 49. Balance general para el año 1989

Dependiendo de la disponibilidad de agua (entrada por precipitaciones) a lo largo de la cuenca, las demás variables (Salidas: evapotranspiración, escurrimientos, infiltración) son modificadas. Cualquier punto sobre la superficie de la cuenca que tenga alto potencial para producir escurrimientos está condicionado a la cantidad de precipitación que se produzca sobre él; puntos con menor potencial pueden generar escorrentías mayores, si sobre el mismo, la cantidad de precipitación es elevada. En los mapas obtenidos, los escurrimientos se concentraron sobre superficies con baja conductividad hidráulica y altos valores de precipitación.

La variable evapotranspiración está igualmente ligada a la disponibilidad de agua. En la mayor parte de la cuenca, la disponibilidad no presenta limitante. Las zonas elevadas registran valores bajos de evapotranspiración (500-700 mm/m² para 1986, 370-550 mm/m² para 1989), las zonas bajas altos valores (800-1100 mm/m² para 1986, 850-1175 mm/m² para 1989).

La disponibilidad de agua por precipitación y sus patrones de distribución condicionan a las demás variables del balance hídrico (Evapotranspiración, Escurrimiento, Infiltración).

4.6.1 Estimación de la infiltración, cuenca Río Copalita

Para ambos años la superficie localizada en la parte baja de la cuenca obtuvo valores negativos. Estos mapas fueron obtenidos mediante álgebra de mapas, despejando a la infiltración de la ecuación del balance. Las partes negativas son superficies sobre las que la precipitación no fue suficiente para cubrir los requerimientos de evapotranspiración y escurrimientos. Estos valores indican que estas zonas son susceptibles a deficiencias hídricas a lo largo del año así como posibles problemas de salinidad debido a los altos valores de evapotranspiración (las selvas caducifolia, subcaducifolia, parte de la perenne y zonas de vegetación inducida se ubican sobre la parte negativa) (Figuras 50 y 51).

El rango de infiltración para el balance de 1989 es mayor (0-2186 mm/m²) que los valores de infiltración de 1986 (0-761 mm/m²), al igual la superficie de valores negativos es mayor en el balance de 1986. Esto se refleja en los balances generales, en los que para 1986 la infiltración representó solo el 6 % de las entradas y para 1989 el 18.5 %.

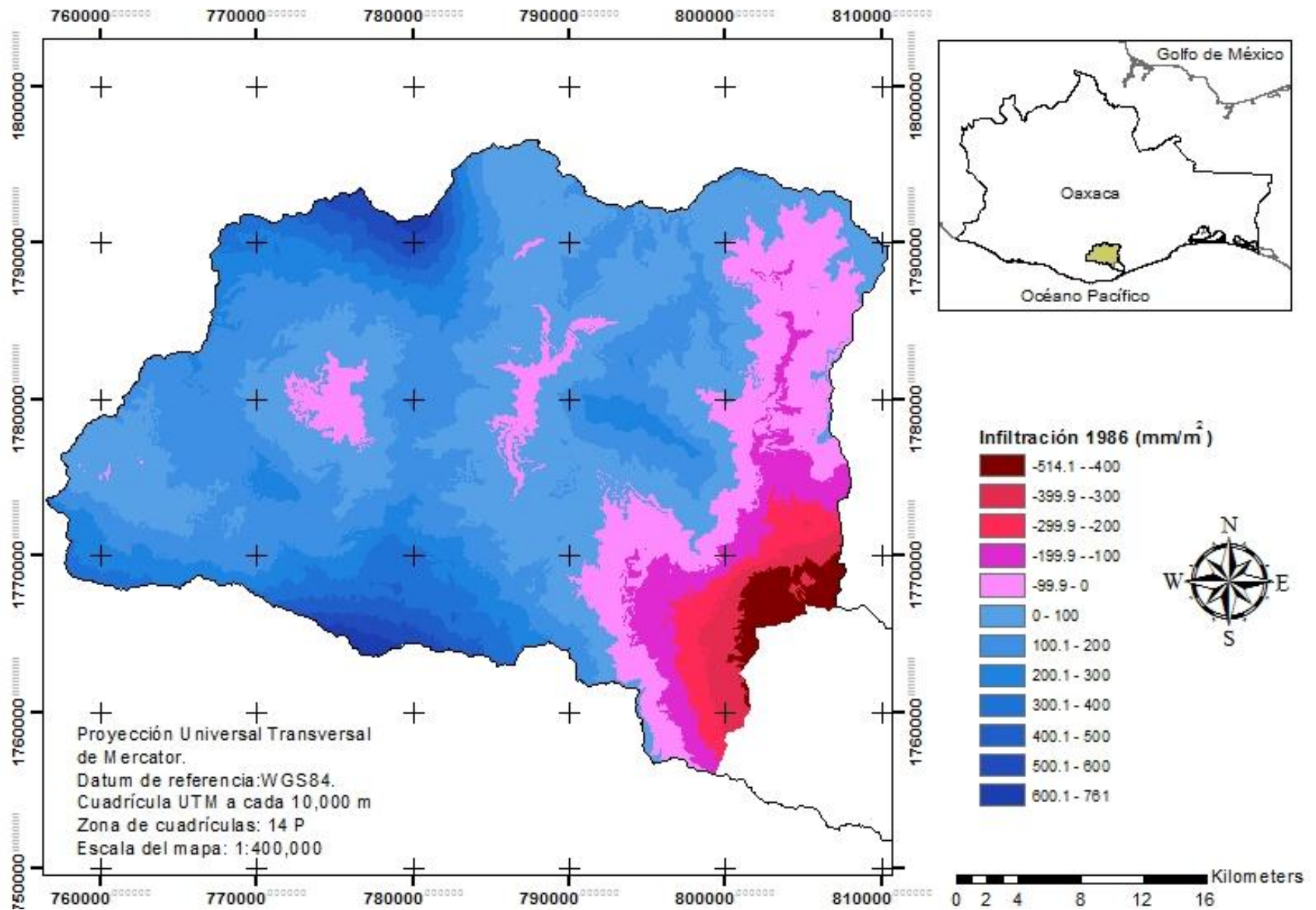


Figura 50. Mapa de infiltración de la superficie de la cuenca (1986)

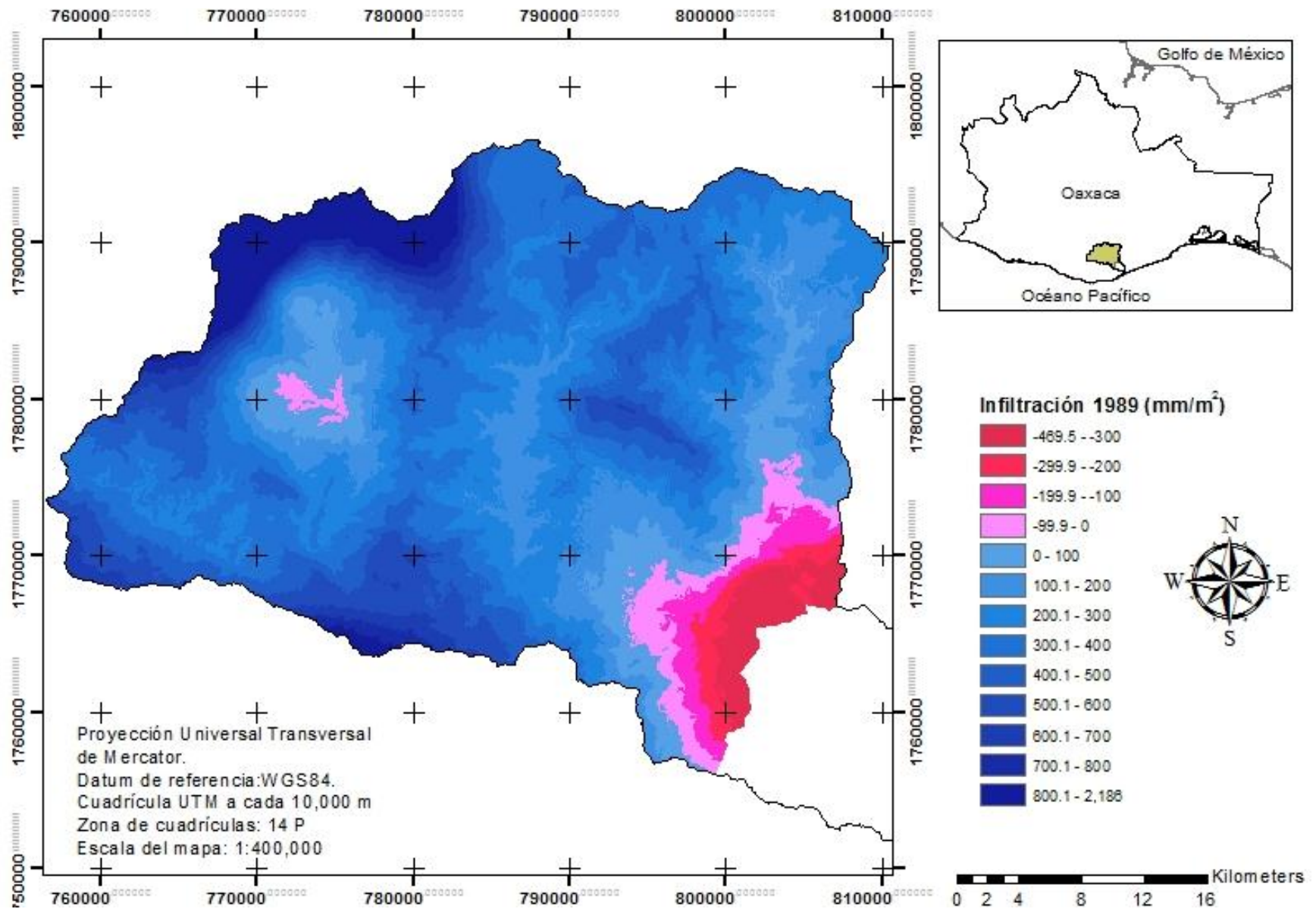


Figura 51. Mapa de infiltración de la superficie de la cuenca (1989)

4.6.1.1 Infiltración y bosque mesófilo

Parte de la superficie de bosque mesófilo tiene altos rangos de infiltración (500-600 mm/m² para 1986 y 700-800 mm/m² para 1989), pero el bosque mesófilo ubicado en la porción derecha del mapa se ubica sobre superficie con deficiencias hídricas (Figura 52). Es posible que la clasificación por tipos de suelo pueda tener deficiencias, aunque haya obtenido valores aceptables de confiabilidad (índice de Kappa de 0.62 y precisión del 75.49 %), ya que estos tipos de bosque se dan solo en ciertas condiciones de humedad. La superficie de bosque mesófilo con deficiencias hídricas es mayor para el balance de 1986. La mayor parte de la superficie de este ecosistema se encuentra sobre altos rangos de infiltración.

Las condiciones hídricas condicionan la ubicación de los ecosistemas. Es importante considerar todas las variables para saber si efectivamente es este ecosistema el que aporta mayores cantidades a la recarga hídrica por medio de la infiltración.

Las Figuras 53 y 54 reflejan que aún dentro de un mismo tipo de vegetación (bosque mesófilo) el comportamiento espacial de las variables es distinta.

Es el conjunto de propiedades las que confieren diferencias entre variables: estructura, profundidad y tipo de suelo, entre otros, influyen en los valores de escurrimientos e infiltración. Altura sobre el nivel del mar, radiación solar, disponibilidad de agua, estructura de la vegetación influyen en la evapotranspiración. El comportamiento de las variables en el flujo del agua cambia de acuerdo a su ubicación.

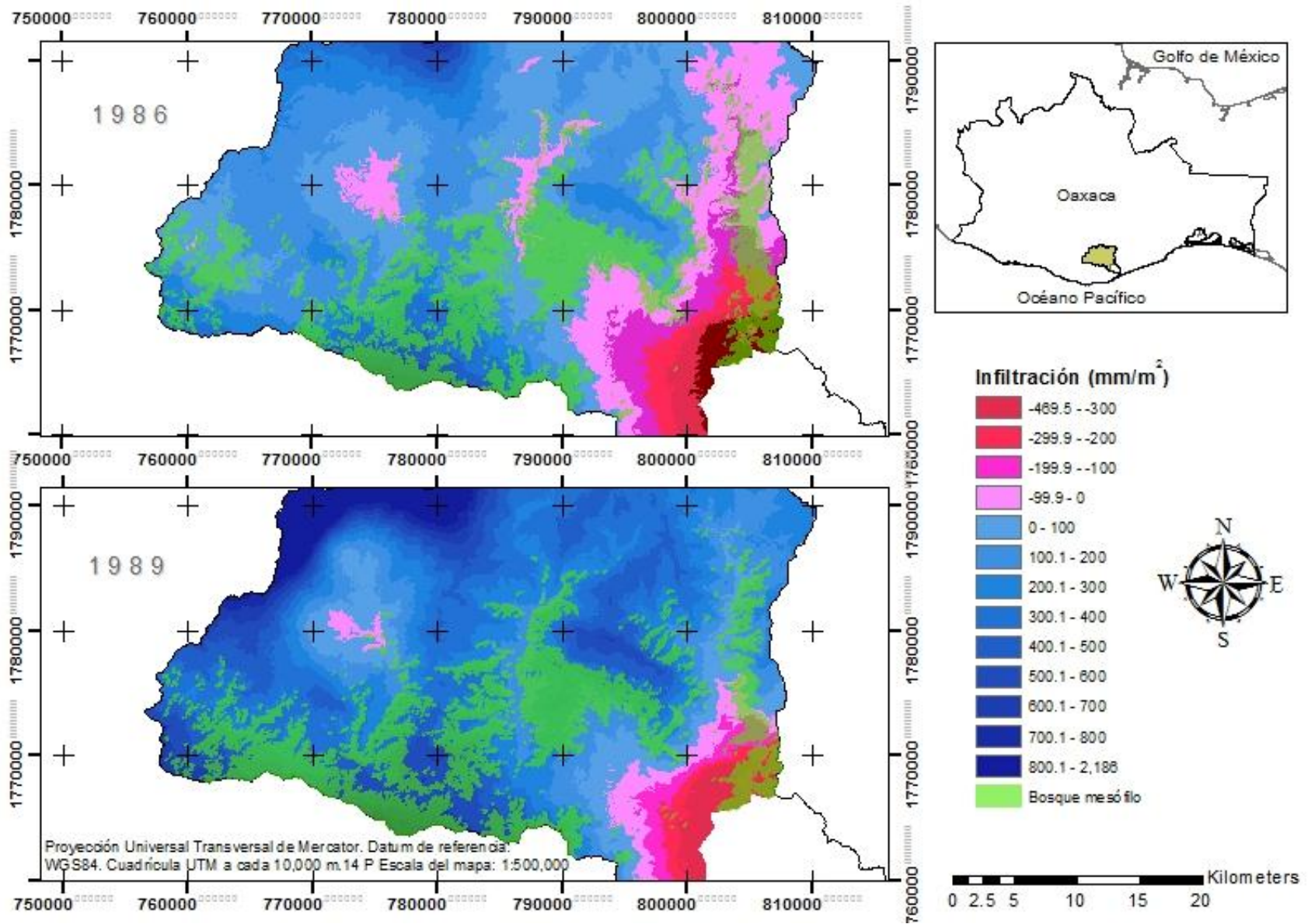


Figura 52. Mapa de infiltración de la superficie de la cuenca y bosque mesófilo (1986-1989)

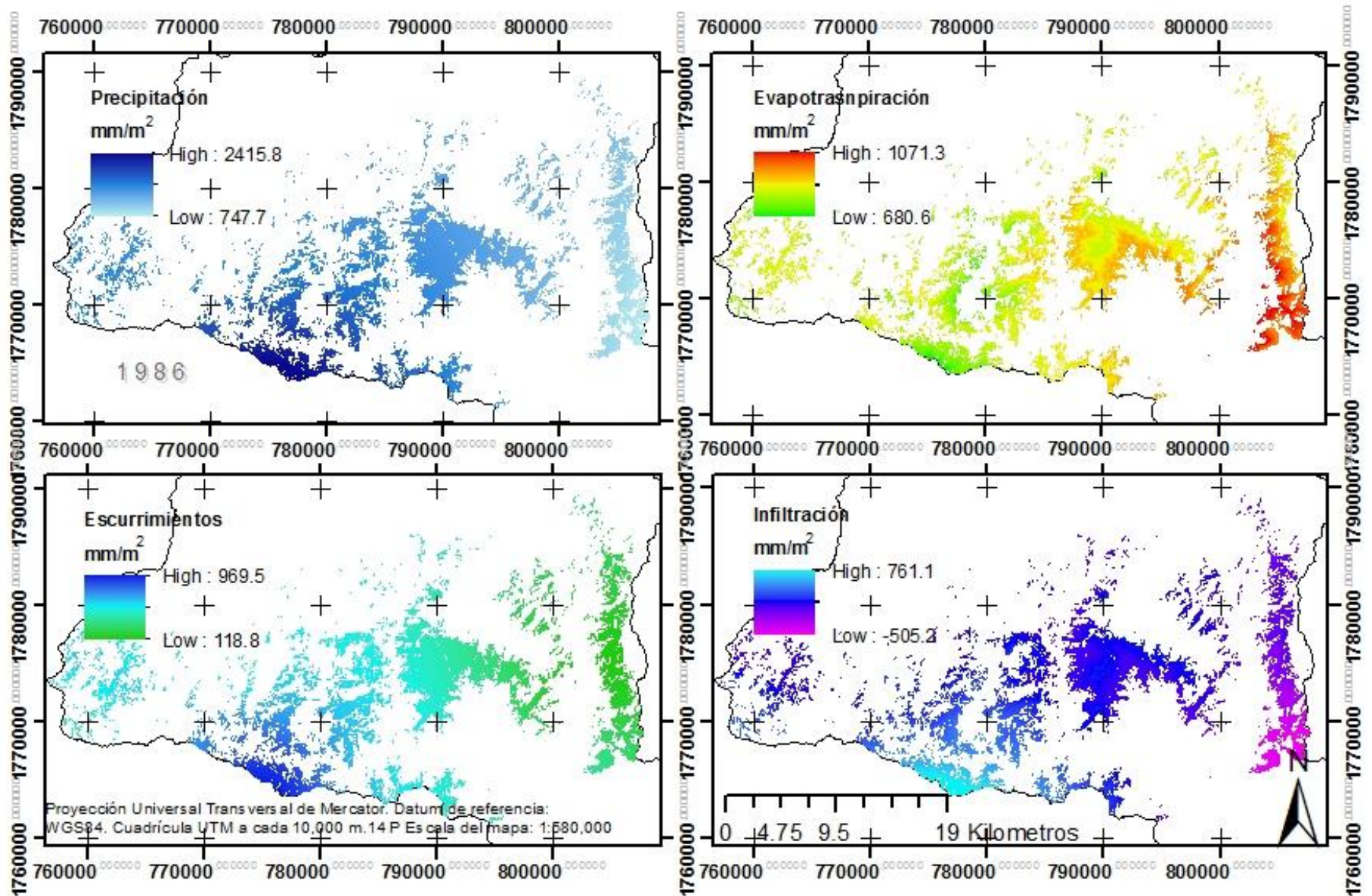


Figura 53. Variables hídricas en el bosque mesófilo (1986)

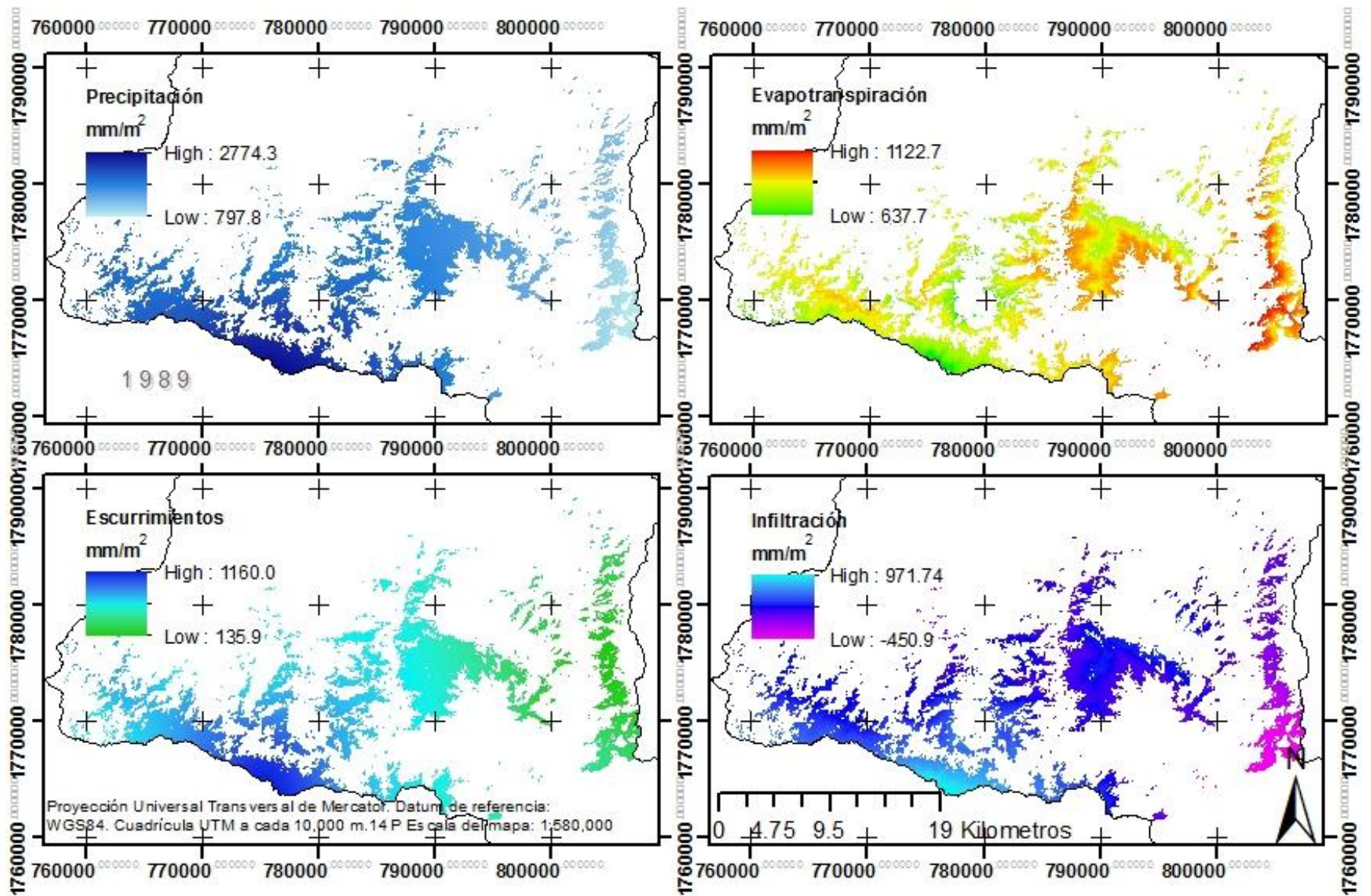


Figura 54. Variables hídricas en el bosque mesófilo (1989)

4.6.2 Balance hídrico y usos de suelo y vegetación

Se muestran primeramente los datos resultantes de las variables, considerando superficies por tipos de suelo y vegetación, con el fin de saber qué tipo de ecosistema aporta mayores valores netos en la dinámica del balance hídrico de la cuenca. Posteriormente se estiman los porcentajes de las variables por tipos de ecosistemas sin considerar superficies con el fin de establecer el uso del agua por tipos de suelo y vegetación.

Tomando en cuenta la superficie de cada tipo de uso de suelo y vegetación, la superficie con mayores valores de precipitación son: (para 1986 y 1989) bosque de coníferas, bosque mesófilo, selva perennifolia y vegetación inducida. Las superficies con menores cantidades de precipitación son: (para ambos balances) zona poblada y selva caducifolia (Tabla 21 y 22).

Para 1986 las superficies con mayor aporte de infiltración son: bosque de coníferas y zona desprovista de vegetación, seguidas por el bosque mesófilo, y las de menor aporte fueron: selva caducifolia, vegetación inducida y las selvas subcaducifolia y perennifolia. Para 1989 las superficies con mayor aporte son: bosque de coníferas y bosque mesófilo seguidas por zona desprovista de vegetación, y las de menor aporte fueron selva caducifolia, zona poblada y bosque de encino.

| Balance 1986 miles de m ³ | | | | | |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------|--------------|----------------|-----------|
| Tipo de vegetación/variable | Superficie km ² | Precipitación | Infiltración | Escurrimientos | ETP |
| Bosque mesófilo | 178.8 | 252,808.8 | 15,142.4 | 83,948.1 | 153,737.8 |
| Bosque de coníferas | 579.9 | 756,746.1 | 73,430.6 | 257,897.0 | 425,451.6 |
| Bosque de encino | 49.2 | 61,436.5 | 5,668.4 | 20,584.4 | 35,181.0 |
| Selva caducifolia | 3.6 | 3,994.7 | -1,213.5 | 1,359.5 | 3,849.8 |
| Selva subcaducifolia | 35.6 | 40,629.9 | -9,540.4 | 13,243.9 | 36,945.6 |
| Selva perennifolia | 175.8 | 249,320.9 | 1,645.2 | 81,708.7 | 166,027.8 |
| Vegetación inducida | 188.0 | 233,216.8 | 204.6 | 68,994.6 | 164,042.0 |
| Zona poblada | 5.3 | 7,032.6 | 1,510.2 | 1,846.6 | 3,677.4 |
| Zona desprovista de vegetación | 114.2 | 151,401.3 | 18,327.4 | 50,103.4 | 82,975.9 |
| Cuerpos de agua | 2.7 | 2992.0 | 0.0 | 0.0 | 2,360.1 |

Tabla 20. Balance hídrico por tipos de uso de suelo y vegetación considerando superficies (1986)

Los mayores valores de escurrimientos en 1986 se dieron en el bosque de coníferas, seguido de bosque mesófilo y selva perennifolia. Los valores altos para 1989 fueron para el bosque de coníferas, bosque mesófilo, zona desprovista de

vegetación y selva perennifolia. Los valores más bajos de escurrimientos para 1986 fueron los de selva caducifolia y zona poblada. Para 1989 los valores más bajos fueron para la zona poblada y selva caducifolia.

| Balance 1989 miles de m ³ | | | | | |
|--------------------------------------|----------------------------|---------------|--------------|----------------|-----------|
| Tipo de vegetación/variable | Superficie km ² | Precipitación | Infiltración | Escurremientos | ETP |
| Bosque mesófilo | 196.0 | 347,205.0 | 54,591.9 | 124,088.2 | 168,541.9 |
| Bosque de coníferas | 624.9 | 1,040,608.0 | 247,549.5 | 364,233.3 | 428,926.6 |
| Bosque de encino | 20.9 | 32,689.9 | 7,754.9 | 10,998.4 | 13,928.4 |
| Selva caducifolia | 6.6 | 8,622.9 | -1,150.9 | 2,681.3 | 7,090.8 |
| Selva subcaducifolia | 59.0 | 81,959.3 | -10,329.1 | 27,670.4 | 63,445.9 |
| Selva perennifolia | 155.0 | 263,155.8 | 23,425.8 | 89,171.0 | 150,639.3 |
| Vegetación inducida | 100.3 | 146,953.6 | 15,837.1 | 41,937.9 | 89,214.3 |
| Zona poblada | 3.1 | 5,784.8 | 1,896.1 | 1,893.6 | 2,002.2 |
| Zona desprovista de vegetación | 167.2 | 273,747.4 | 67,184.4 | 91,385.3 | 115,258.4 |
| Cuerpos de agua | 0.3 | 446.1 | 0.0 | 0.0 | 324.3 |

Tabla 21. Balance hídrico por tipos de uso de suelo y vegetación considerando superficies (1989)

Los valores altos de evapotranspiración para 1986 fueron de: el bosque de coníferas, selva perennifolia, vegetación inducida y bosque mesófilo. Los valores altos para 1989 fueron de: bosque de coníferas, bosque mesófilo y selva perennifolia. Los valores bajos de evapotranspiración fueron de la zona poblada y selva caducifolia (ambos años).

Los tipos de uso de suelo y vegetación que aportan mayor volúmenes a la infiltración en la cuenca son bosque de coníferas, bosque mesófilo y zonas desprovistas de vegetación, estos resultados son influenciados por la magnitud de la superficies de estos ecosistemas.

4.6.3 Balance hídrico (porcentajes)

Para poder comparar los tipos de vegetación sin influencia de la superficie, se estimaron los porcentajes: el 100 % de agua de entrada (precipitación) se distribuye en las tres variables (Infiltración, escurrimientos y evapotranspiración) de salida.

| Balance por tipos de vegetación 1986 | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------|
| Tipo de vegetación/variable | Precipitación (%) | Infiltración (%) | Escurrimientos (%) | ETP (%) |
| Bosque mesófilo | 100.0 | 6.0 | 33.2 | 60.8 |
| Bosque de coníferas | 100.0 | 9.7 | 34.1 | 56.2 |
| Bosque de encino | 100.0 | 9.2 | 33.5 | 57.3 |
| Selva caducifolia | 100.0 | -30.4 | 34.0 | 96.4 |
| Selva subcaducifolia | 100.0 | -23.5 | 32.6 | 90.9 |
| Selva perennifolia | 100.0 | 0.7 | 32.8 | 66.6 |
| Vegetación inducida | 100.0 | 0.1 | 29.6 | 70.3 |
| Zona poblada | 100.0 | 21.5 | 26.3 | 52.3 |
| Zona desprovista de vegetación | 100.0 | 12.1 | 33.1 | 54.8 |
| Cuerpos de agua | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 78.9 |

Tabla 22. Balance hídrico porcentual por tipos de uso de suelo y vegetación (1986)

En el balance de 1986 se contempla que la superficie con mayores índices de infiltración fue la zona poblada (21.5 %), bosque mesófilo (6 %) tiene menores índices de infiltración que la zona desprovista de vegetación (12.1 %), bosque de coníferas (9.7 %) y bosque de encino (9.2 %) (Tabla 23).

Para 1989 el bosque mesófilo aumentó su cantidad porcentual de agua infiltrada (15.7 %) pero se mantuvo debajo de las superficies de mayor aporte por m²: zona poblada (32.8 %), zona desprovista de vegetación (24.5 %) y los bosques de coníferas y encino (23.8 y 23.7) (Tabla 24).

| Balance por tipos de vegetación 1989 | | | | |
|--------------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------|
| Tipo de vegetación/variable | Precipitación (%) | Infiltración (%) | Escurrimientos (%) | ETP (%) |
| Bosque mesófilo | 100.0 | 15.7 | 35.7 | 48.5 |
| Bosque de coníferas | 100.0 | 23.8 | 35.0 | 41.2 |
| Bosque de encino | 100.0 | 23.7 | 33.6 | 42.6 |
| Selva caducifolia | 100.0 | -13.3 | 31.1 | 82.2 |
| Selva subcaducifolia | 100.0 | -12.6 | 33.8 | 77.4 |
| Selva perennifolia | 100.0 | 8.9 | 33.9 | 57.2 |
| Vegetación inducida | 100.0 | 10.8 | 28.5 | 60.7 |
| Zona poblada | 100.0 | 32.8 | 32.7 | 34.6 |
| Zona desprovista de vegetación | 100.0 | 24.5 | 33.4 | 42.1 |
| Cuerpos de agua | 100.0 | 0.0 | 0.0 | 72.7 |

Tabla 23. Balance hídrico porcentual por tipos de uso de suelo y vegetación (1989)

Comparando la variable de escurrimientos, se observó que para 1989 hubo un aumento en los escurrimientos del bosque mesófilo a tal punto de llegar a ser la superficie con mayores escurrimientos.

En general se observa que los menores valores de evapotranspiración corresponden a bosque mesófilo, bosque de coníferas y bosque de encino. Los mayores valores pertenecen en orden de magnitud a la selva caducifolia, selva subcaducifolia y selva perennifolia.

La Figura 55 representan (de mayor a menor) el orden de magnitud de las variables del ciclo hidrológico por tipos de uso de suelo y vegetación:

| Balance 1986 | | | Balance 1989 | | |
|--------------|----------------|------------|--------------|----------------|------------|
| Infiltración | Escurremientos | ETP | Infiltración | Escurremientos | ETP |
| ZP 21.5 % | BC 34.1 % | SC 96.4 % | ZP 32.8 % | BM 37.5 % | SC 82.2 % |
| ZDV 12.1 % | SC 34 % | SSC 90.9 % | ZDV 24.5 % | BC 35 % | SSC 77.4 % |
| BC 9.7 % | BE 33.5 % | CA 78.9 % | BC 23.8 % | SP 33.9 % | CA 72.7 % |
| BE 9.2 % | BM 33.2 % | VI 70.3 % | BE 23.7 % | SSC 33.8 % | VI 60.7 % |
| BM 6.0 % | ZDV 33.1 % | SP 66.6 % | BM 15.7 % | BE 33.6 % | SP 57.2 % |
| SP 0.7 % | SP 32.8 % | BM 60.8 % | VI 10.8 % | ZDV 33.4 % | BM 48.5 % |
| VI 0.1 % | SSC 32.6 % | BE 57.3 % | SP 8.9 % | ZP 32.7 % | BE 42.6 % |
| SSC -23.5 % | VI 29.6 % | BC 56.2 % | SSC -12.6 % | SC 31.1 % | ZDV 41.2 % |
| SC -30.4 % | ZP 26.3 % | ZDV 54.8 % | SC -13.3 % | VI 28.5 % | BC 41.2 % |
| | | ZP 52.3 % | | | ZP 34.6 % |

Figura 55. Orden de magnitud de las variables por tipos de uso de suelo y vegetación (1986,1989)

Se obtuvieron resultados poco esperados como que la zona poblada y zona desprovista de vegetación es la que aporta mayor agua de infiltración por m².

Las variaciones en los patrones climáticos tienen influencia en los resultados de las variables del balance hídrico, la precipitación concentrada sobre la superficie del bosque mesófilo (balance 1989), incrementó su aporte a la infiltración pero aumentó más su aporte hacia los escurrimientos.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Mediante el análisis de imágenes satelitales (1986-2015) se pudo deducir con una precisión de 75.49 % y un índice de kappa de 0.62 que los ecosistemas vegetales aumentaron en comparación con años anteriores.

La superficie de bosque mesófilo de montaña incrementó 35 % de 1986 a 2015. La predicción (2030) mediante cadenas de Markov infiere altas probabilidades de permanencia del bosque mesófilo (88 %) de la cuenca junto con los demás ecosistemas preferentes por sus servicios ambientales (selva perennifolia (88 %), selva subcaducifolia (88 %), bosque de coníferas (76 %), y bosque de encino (72 %)). Se considera que la cuenca Río Copalita es un caso especial de recuperación y su importancia radica en la diversidad de servicios irremplazables que ofrece.

Los datos de las estaciones de la cuenca Río Copalita (periodo 1980-2008) muestran un incremento en la temperatura media anual aproximada de 1.5 °C. Estos valores junto con la disponibilidad de agua, abandono de actividades agropecuarias, forestales y proyectos de reforestación, pueden ser los factores que han propiciado la recuperación de los ecosistemas.

No se encontró correlación alguna entre los valores de conductividad y algunas propiedades físicas de la cuenca (Altura sobre el nivel del mar, pendiente del terreno, temperatura), así como con las imágenes multiespectrales de su superficie (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado, valor de reflectancia de la superficie en el infrarrojo cercano (SWIR 2)).

Los valores de conductividad hidráulica y capacidad de infiltración no son homogéneos aún dentro de un mismo uso de suelo y vegetación o tipos de suelo.

El análisis hídrico mostró un desfase entre los momentos de mayor precipitación y los de mayores volúmenes de escurrimientos, desfase que pudo ser provocado por las masas forestales de la cuenca, éstas disminuyen la velocidad del agua hacia la salida de la misma, asegurando la continuidad del flujo base en la época de estiaje.

De las variables de salida, la evapotranspiración es la mayor influencia en la disminución de valores de infiltración.

Los mayores rangos de infiltración se centraron en las partes altas de la cuenca (parte aguas superior e inferior izquierdo) donde los valores de evapotranspiración son menores, la conductividad hidráulica es alta y son zonas con abundantes precipitaciones. Los rangos menores de infiltración y zonas con probables

deficiencias hídricas se localizaron en las porciones de menor altitud, zonas con mayor potencial de evapotranspiración y menor cantidad de lluvia.

La mayor parte de la superficie de bosque mesófilo tiene altos rangos de infiltración (500-600 mm/m² para 1986 y 700-800 para 1989). Una pequeña parte cayó sobre zonas con posibles deficiencias hídricas (20.4 % del bosque mesófilo de 1986 y 10.4 % para 1989), lo que no corresponde con las necesidades hídricas de este ecosistema. Es probable que la clasificación por tipos de suelos tenga deficiencias en al clasificar este tipo de bosque.

Para determinar qué tipo de ecosistema es el que aporta mayor infiltración para recarga en una cuenca, es necesario considerar todos los factores que influyen en el ciclo hidrológico. A pesar de que el bosque mesófilo no es el que aporta mayores cantidades a este proceso, es el que mejor se adapta a las condiciones imperantes en la superficie en que se distribuye, ya que no son los tipos de vegetación los que dicta las condiciones hídricas si no que las condiciones hídricas establecen a los usos de suelo y vegetación.

Superficies sin cobertura o pobladas pueden tener mayores valores de infiltración, pero generan alteraciones al sistema natural. El papel de los bosques y selvas en el ciclo hidrológico es generar estabilidad, que asegure la continua producción de recursos hídricos a lo largo del año.

CAPÍTULO 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abtew, W. y Melesse, A. 2013. *Evaporation and Evapotranspiration Measurements and Estimations*. Springer Dordrecht Heidelberg New York London
- Aceves, T. 2012. *El bosque mesófilo de montaña en México: amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible*, México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Andreu, J., Alcalá, F., Vallejos, Á. y Pulido, A. 2011. Recharge to mountainous carbonated aquifers in SE Spain: Different approaches and new challenges. *Journal of Arid Environments*, 75, 1262-1270.
- Angelone, S., Garibay, M., Cauhapé, M. 2006. Universidad Nacional del Rosario, Facultad de Ciencias exactas, ingeniería y agrimensura.
- Ariza, A. 2013. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission), Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia, 2013.
- Arriaga, L., Espinoza, J., Aguilar, C., Martínez, E., Gómez, L., Y Loa, E. 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad, México. Extraído de <http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/Tlistado.html>
- Asensio, S., Ramón, H. y Blanquer, J., 2014. *Características del infiltrómetro de doble anillo (Anillos de Munz)*. Escuela técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. Extraído de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7840/AD%20Infiltrometro.pdf>
- Bens, O., Wahl, N. A., Fischer, H., y Hüttl, R. F. 2007. *Water infiltration and hydraulic conductivity in sandy cambisols: impacts of forest transformation on soil hydrological properties*. *European Journal of Forest Research*, 126(1), 101-109. Doi: 10.1007/s10342-006-0133-7
- Bruijnzeel, L. 2004. "Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees?" *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104(1): 185-228.
- Buczko, U., Bens, O. y Hüttl, R. 2006. Water infiltration and hydrophobicity in forest soils of a pine-beech transformation chrono sequence. *Journal of Hydrology*, 331, 383-395.
- Caballero, L. A., Easton, Z. M., Richards, B. K., y Steenhuis, T. S. 2013. Evaluating the bio-hydrological impact of a cloud forest in Central America using a semi-distributed water balance model. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 61(1), 9. Doi: 10.2478/jhh-2013-0003
- Calvão, T. y Pessoa, M. F. 2015. Remote sensing in food production - a review. *Emirates Journal of Food and Agriculture*, 27(2), 138.

- Chander, G., Markham, B. y Helder, D. 2009. "Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment* 113(5): 893-903.
- Chuvienco, E. 2008 Teledetección ambiental, La observación de la Tierra desde el espacio, 3 edición, Editorial Ariel Ciencia, 588 pag.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2014. Datos de las estaciones climatológicas. (Revisado en septiembre de 2014). Recuperado de smn.cna.gob.mx/climatologia/.../estacion/EstacionesClimatologicas.kmz
- Custodio, E., Llamas, M. 1983. Hidrología subterránea. Tomo II. Segunda edición, Ediciones Omega. Barcelona, España 1393-1407, 2239-2255 pp.
- Donia, N. 2013. Application of remotely sensed imagery to watershed analysis a case study of Lake Karoun, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 6, 3217-3228.
- Durham, B., Rinck, S. y Guendert, D. 2003. Integrated Water Resource Management through reuse and aquifer recharge. *Desalination*, 152, 333-338.
- Fries, A., Rollenbeck, R., Naub, T., Peters, T. y Bendix, J. 2012. Near surface air humidity in a megadiverse Andean mountain ecosystem of southern Ecuador and its regionalization. *Agricultural and Forest Meteorology*, 152, 17-30.
- Gaberšček, A., y Murlis, J. 2011. The role of vegetation in the water cycle. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 11(3-4), 175-181. Doi: 10.2478/v10104-011-0046-z
- Gabriels, D., Lobo, D., Pulido, M. 2006. Métodos para determinar la conductividad hidráulica saturada y no saturada de los suelos. Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. Instituto de Edafología, UCV. Extraído de <http://saber.ucv.ve/jspui/handle/123456789/4158>
- García, A., Ordóñez, M., y Briones, M. 2004. Biodiversidad de Oaxaca. Universidad Nacional Autónoma de México. Primera edición. México. 107-108 pp.
- Gómez, L., y Arriaga, L. 2007. Modeling the Effect of Climate Change on the Distribution of Oak and Pine Species of Mexico. *Conservation Biology*, 21(6), 1545-1555.
- Guevara, E., y Cartaya, H. 2004. Hidrología Ambiental. Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, Venezuela.
- Hernández, M. Y López, G. 2005. La cuenca Hidrológica, Unidad Ecológica de Manejo. Universidad Autónoma Chapingo. Primera edición en español. Estado de México. 9-36 pp.
- Huang, J., Wu, P. y Zhao, X. 2013. Effects of rainfall intensity, underlying surface and slope gradient on soil infiltration under simulated rainfall experiments. *CATENA*, 104, 93-102.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). Modelos Digitales de Elevación. (Revisado 28 de mayo 2014) obtenido de

- <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>
- Jain, P. 2004. Remote sensing through satellites: a tutorial review. *Microwave Journal*.
<http://go.galegroup.com/ps/i.do?id=GALE%7CA126852667&v=2.1&u=pu&it=r&p=AONE&sw=w&asid=22a015467334b021ff017acca153c71b>
- Khare, D., Patra, D., Mondal, A., y Kundu, S., 2014. Impact of land use/land cover change on run-off in a catchment of Narmada river in India. *Applied Geomatics*, 7(1), 23-35. Doi: 10.1007/s12518-014-0148-6
- Krishnaswamy, J., Bonell, M., Venkatesh, B., Purandara, B., Rakesh, K., Lele, S., Kiran, M., Reddy, V. y Badiger, S. 2013. The groundwater recharge response and hydrologic services of tropical humid forest ecosystems to use and reforestation: Support for the “infiltration-evapotranspiration trade-off hypothesis”. *Journal of Hydrology*, 498, 191-209.
- Leija, E., Reyes, H., Fortanelli, J., y Palacio, G. 2011. Situación actual del bosque de niebla en el estado de San Luis Potosí, México. Investigación y Ciencia, 3+.Informe Académico. Web. 30 Sept. 2014.
<http://go.galegroup.com/ps/i.do?id=GALE%7CA357263967&v=2.1&u=pu&it=r&p=IFME&sw=w&asid=7ef5bae6f4e496e48a13cad835f8316d>
- Minasny, B. y George, B., Chapter 12. 1999. The measurement of soil hydraulic properties in the field. Describing, Analysing and Managing Our Soil. First Edition. University of Sydney. Published jointly by The University of Sydney and the Australian Soil Science Society Inc. (NSW Branch). pp. 185- 204
- Monsalve, S. 1999. Hidrología en la Ingeniería (2da Edición ed.). Colombia.
- Muñoz, L. E. & López-Blanco, J. 2008. Land use/cover changes using Landsat TM/ETM images in a tropical and biodiverse mountainous area of central-eastern Mexico. *International Journal of Remote Sensing*, 29, 71-93.
- Muñoz, L. E., Geissert, D. R., Holwerda, F., y McDonnell, J. J., 2015. Factors influencing stream water transit times in tropical montane watersheds. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, 2015, 10975-11011. Doi: 10.5194/hessd-12-10975-2015
- Muñoz, L. E., Holwerda, F., Alvarado, M. S., Geissert, D., Marín, B., Gómez, A., Bruijnzeel, L. 2015. Efectos hidrológicos de la conversión del bosque de niebla en el centro de Veracruz, México. *Bosque (Valdivia)*, 36, 395-407.
- Muñoz, L. E., y McDonnell, J. J. 2013. Land use change effects on runoff generation in a humid tropical montane cloud forest region. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17(9), 3543-3560. Doi: 10.5194/hess-17-3543-2013
- Nájera, M. 2009 ¿Privatización o gestión social de los recursos hídricos? *Revista El cotidiano*, número 155, 103-114. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=32512745012>


- Návar, J. 2011. Stemflow variation in Mexico's northeastern forest communities: Its contribution to soil moisture content and aquifer recharge. *Journal of Hydrology*, 408, 35-42.
- Neris, J., Tejedor, M., Rodríguez, M., Fuentes, J. y Jiménez, C. 2013. Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain). *CATENA*, 108, 50-57.
- Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales
- Notaro, M. 2008. Response of the mean global vegetation distribution to interannual climate variability. *Climate Dynamics*, 30(7-8), 845-854. Doi: 10.1007/s00382-007-0329-7
- Patino, J. E., y Duque, J. C. 2013. A review of regional science applications of satellite remote sensing in urban settings. *Computers, Environment and Urban Systems*, 37, 1-17. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2012.06.003>
- Perkins, K. S., Nimmo, J. R., Medeiros, A. C., Szutu, D. J., y Allmen, E. 2014. Assessing effects of native forest restoration on soil moisture dynamics and potential aquifer recharge, Auwahi, Maui. *Ecohydrology*, 7(5), 1437-1451. Doi: 10.1002/eco.1469
- Petrou, Z. I., Manakos, I., y Stathaki, T. 2015. Remote sensing for biodiversity monitoring: a review of methods for biodiversity indicator extraction and assessment of progress towards international targets. *Biodiversity and Conservation*, 24(10), 2333-236
- Privault, N. 2013. *Understanding Markov Chains: Examples and Applications* (Vol. 2013). Singapore: Springer Singapore.
- Ramírez, H. 2014. Aplicación del modelo SWAT para el análisis de flujo base en una cuenca Mexicana del pacífico sur. Tesis de maestría, Colegio de Postgraduados. Estado de México.
- Roa, M. C., Brown, S., Schreier, H. y Lavkulich, L. M. 2011. The role of land use and soils in regulating water flow in small headwater catchments of the Andes. *Water Resources Research*, 47(5). Doi: 10.1029/2010wr009582
- Rodríguez, D. 2012. Disponibilidad de agua y riesgo hidrológico en los escurrimientos de la cuenca del Río Copalita, con un modelo estocástico. Tesis de maestría, Escuela superior de ingeniería y arquitectura, Instituto Politécnico Nacional. México Distrito Federal.
- Ruggenthaler, R., Meibl, G., Geitner, C., Leitinger, G., Endstrasser, N. y Schöberl, F. 2015. Investigating the impact of initial soil moisture conditions on total infiltration by using an adapted double-ring infiltrometer, *Hydrological Sciences Journal*, DOI: 10.1080/02626667.2015.1031758

- Sánchez, F. J. 2011. Hidrología - Hidrogeología. Universidad de Salamanca, 10 pp. (En: <http://hidrologia.usal.es>)
- Sáenz, L., y Mulligan, M., 2013. The role of cloud affected forests (CAFs) on water inputs to dams. *Ecosystem Services*, 5, e69-e77. Doi: 10.1016/j.ecoser.2013.02.005
- Schmugge, T., Kustas, W. Ritchie, J. Jackson, T. y Rango, A. 2002. Remote sensing in hydrology. *Advances in Water Resources*, 25, 1367-1385.
- Seiler, K. P., y Gat, J. R. 2007. Groundwater Recharge from Run-off, Infiltration and Percolation: *Water Science and Technology Library 55*. DE: Springer Verlag.
- Shammas, M. 2007. Impact of the Al-Qara mountain fog water forest on groundwater recharge in the Salalah coastal aquifer, Sultanate of Oman. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 7, 37-49.
- Tarback, E., Lutgens, F. y Tasa, D. 2005. Ciencias de la Tierra. Madrid: Pearson Educación S. A. 736 p.
- Téllez, O., y Dávila, P. 2003. Protected Areas and Climate Change: a Case Study of the Cacti in the Tehuacán-Cuicatlán Biosphere Reserve, México. *Conservation Biology*, 17(3), 846-853. Doi: 10.1046/j.1523-1739.2003.01622.x
- Teillet, P. M., Guindon, B., y Goodenough, D. G. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8(2), 84-106. Doi: citeulike-article-id:4235614
- Toledo, T. 2012. El bosque mesófilo de montaña en México: amenazas y oportunidades para su conservación y manejo sostenible. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. 196 p.
- Toledo, T., Meave, J., González, M., y Ramírez, N. 2011. Tropical montane cloud forests: Current threats and opportunities for their conservation and sustainable management in Mexico. *Journal of Environmental Management*, 92(3), 974-981. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.11.007>
- Usha, K., y Singh, B. 2013. Potential applications of remote sensing in horticulture-A review. *Scientia Horticulturae*, 153, 71-83. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2013.01.008>
- Van der Meer, F. D., Van der Werff, H. M. A., Van Ruitenbeek, F. J. A., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., Woldai, T. (2012). Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), 112-128. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002>
- Van der Meer, F., Hecker, C., van Ruitenbeek, F., Van der Werff, H., de Wijkerslooth, C., y Wechsler, C. 2014. Geologic remote sensing for geothermal exploration: A review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33, 255-269. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.05.007>

- Wang, H. y Huang, C. 2012. Investigating the spatial heterogeneity of a subtropical montane cloud forest plantation with a QuickBird image. *International Journal of Remote Sensing*, 33, 7868-7885.
- Williams, G. 2007. El bosque de niebla del centro de Veracruz: ecología, historia y destino en tiempos de fragmentación y cambio climático. Xalapa, Veracruz, México: Instituto de Ecología, A.C., Xalapa, Ver, 208 p.
- Wu, D., Zhao, X., Liang, S., Zhou, T., Huang, K., Tang, B., y Zhao, W. 2015. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Global Change Biology*, 21(9), 3520-3531. Doi: 10.1111/gcb.12945
- Xu, J., y Zhao, D. 2014. Review of coral reef ecosystem remote sensing. *Acta Ecologica Sinica*, 34(1), 19-25. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chnaes.2013.11.003>
- Zhang, Y., Chen, M., Zhou, W., Zhuang, C. y Ouyang, Z. 2010. Evaluating Beijing's human carrying capacity from the perspective of water resource constraints. *Journal of Environmental Sciences*, 22, 1297-1304.
- Zhao, Z., Benoy, G., Chow, T. L., Rees, H. W., Daigle, J. L., y Meng, F. R. 2010. Impacts of accuracy and resolution of conventional and LiDAR based DEMs on parameters used in hydrologic modeling. *Water Resources Management*, 24(7), 1363-1380. Doi: 10.1007/s11269-009-9503-5

ANEXOS

Anexo 1 Formato de comisión para la realización de pruebas de infiltración en la cuenca Río Copalita

| | | |
|---|--|--------------------------------|
|  | INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL CIIDIR UNIDAD OAXACA SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEPARTAMENTO DE INVESTIGACIÓN FORMATO DE AVISO DE COMISIÓN | Código: PO-CIIDIROAX-01-F22 |
| | | Versión: 01 |
| | | Página: 01 |

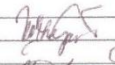
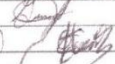
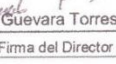

Domicilio: Hornos No. 1003, Col. Noche Buena, Sta. Cruz Xoxocotlán, C.P. 71230, A.P. 674. Teléfonos: Oaxaca (951) 51 701610, 5 1 71199, 51 70500; desde la Cd. de México: 55 729 8000 ext. 82700.
 En internet: www.ciidrooaxaca.ipn.mx. Correo electrónico: ciidrooaxaca@ipn.mx, investigacionoaxaca@ipn.mx

(Proyectos con financiamiento SIP, externo y vinculados)

En virtud de la presente orden de comisión, se solicita a todas las autoridades civiles y militares del país, brinden oportuno y eficaz auxilio cuando lo solicite(n) el(los) comisionado(s), para asegurar el interés del ramo y para perseguir los delitos que en su contra se cometieran

Sta. Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. A 8 de junio de 2015

DATOS DEL(OS) BENEFICIARIO(S)

| Nombre | R.F.C. | Puesto (Director de proyecto, participante, estudiante) | *Clave de identificación | Firma |
|--|------------|---|--------------------------|---|
| Ladron de Guevara Torres María de los Angeles | LATA550917 | Director | 17877 |  |
| Salvador Isidro Belmonte Jiménez | BEJS610326 | participante | 3747 |  |
| Gilberto Gallardo Castillo | | estudiante | A150059 |  |
| Guillermo Jaciel Hernández Osorio | | estudiante | A140052 |  |
| Nombre y clave del proyecto: 20151899 Variación temporal de la infiltración ligada a la cobertura de bosque mesófilo a partir de imágenes de satelitales Landsat en la subcuenca Río Copalita | | | | María A. Ladrón de Guevara Torres Nombre y Firma del Director de Proyecto |

*Número de empleado, registro de estudiante, RFC (honorarios)

DATOS DE LA COMISIÓN

Lugar: Cuenca del Río Copalita, Oaxaca Durante 10 día(s), del 15 de junio al 24 de junio de 2015

Motivo de la comisión: Realización de pruebas de infiltración. Obtención de puntos de control

Transporte: Aéreo Terrestre x * Vehículo oficial * Requisitar datos recuadro correspondiente

SIN VIATICOS *CON VIATICOS *Requisitar datos en el siguiente recuadro

Sírvase a cubrir viáticos por concepto de: Anticipados Devengados

| Lugares y periodos de la comisión | Cuota diaria | No. de días | No. de personas | Importe \$ |
|-----------------------------------|--------------|-------------|-----------------|------------|
| Cuenca del Río Copalita, Oaxaca | | 10 | 4 | |

Observaciones y origen de los recursos:
 SIP COFAA CONACYT OTRO: 03 JUN 2015

***SÓLO SI USA VEHICULO OFICIAL**
 DPTO. DE CAPITAL HUMANO Y RECURSOS FINANCIEROS

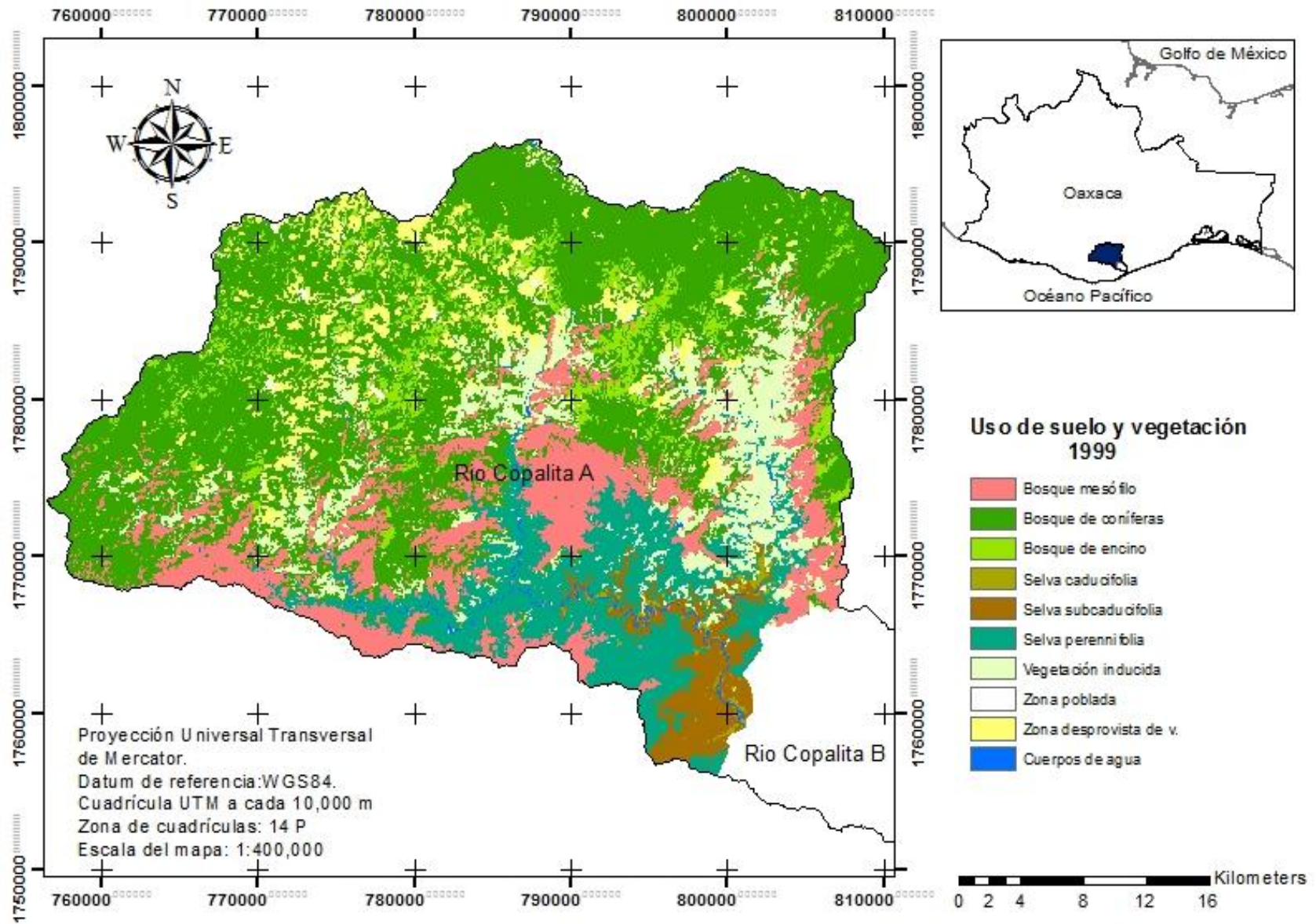
Resguardo Temporal de Vehículo Oficial

| | | |
|---|---|--|
| Fecha de salida: | Fecha de regreso: | |
| Vehículo: <u>Silverado</u> | Modelo: | Placas: <u>PW 31796</u> |
| Color: | No. de Serie: | No. de inventario: |
| Herramientas y/o accesorios: Llave de tuercas <input type="checkbox"/> Señalamientos <input type="checkbox"/> Cable pasacorriente <input type="checkbox"/> Llanta de refacción <input type="checkbox"/> Gato con maneral <input type="checkbox"/> | | |
| Kilometraje de salida: <u> </u> | Kilometraje de regreso: <u> </u> | |
| Vo. Bo.  María A. Ladrón de Guevara Torres Nombre y firma del conductor | R10495216 No. de licencia de conducir | Vo. Bo.  ING. CARLOS MARTÍN PÉREZ Jefe del Dpto. de Recursos Materiales y Servicios |

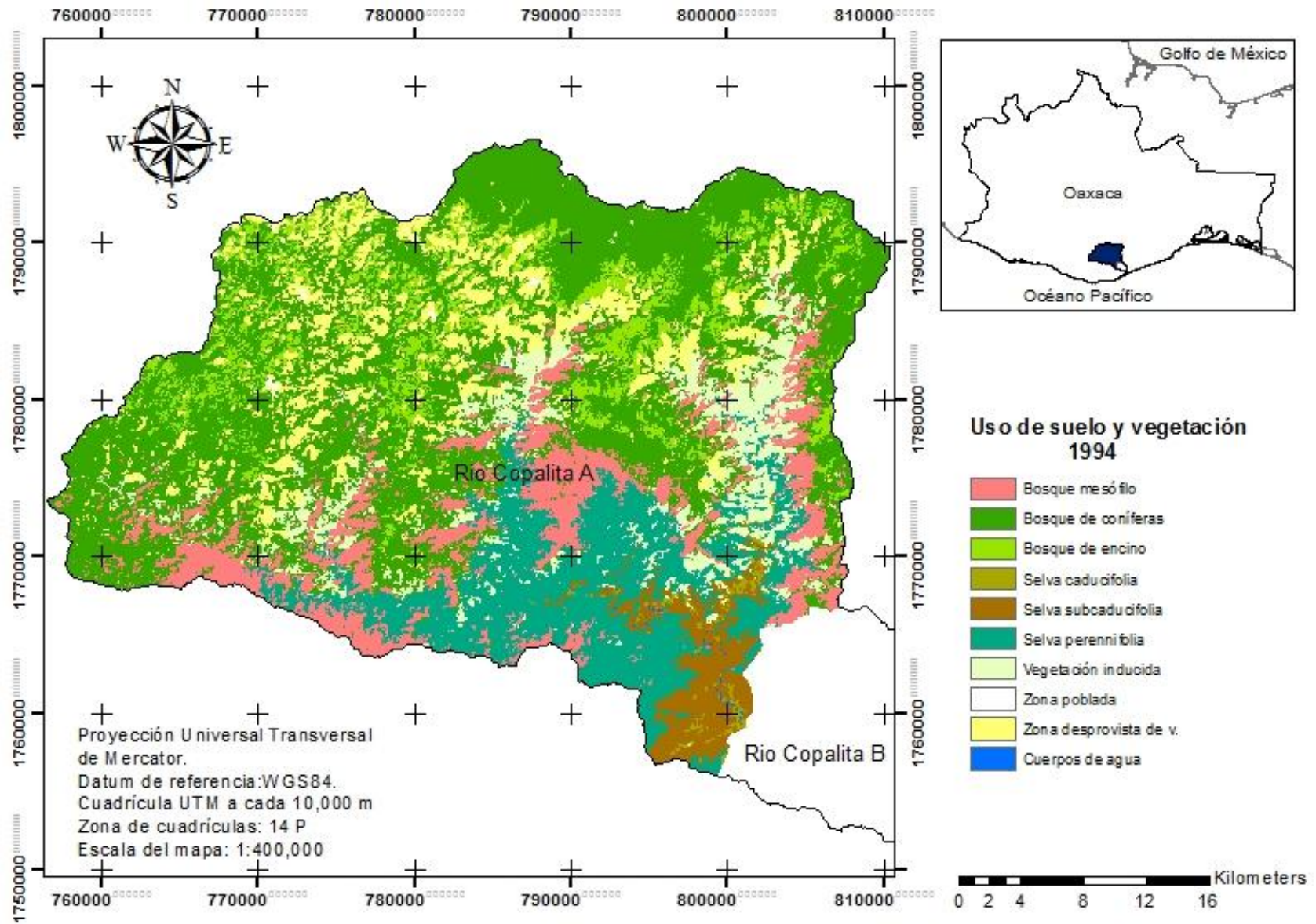
FIRMA Y SELLOS DE AUTORIZACIÓN

| | | |
|--|--|-------|
| Vo. Bo.  MC Graciela González Pérez Nombre y Firma del Jefe de Departamento | ENCARGADO DE LA DIRECCIÓN DEL CIIDIR UNIDAD OAXACA  DR. JOSÉ RODOLFO MARTÍNEZ Y CÁRDENAS | SELLO |
|--|--|-------|

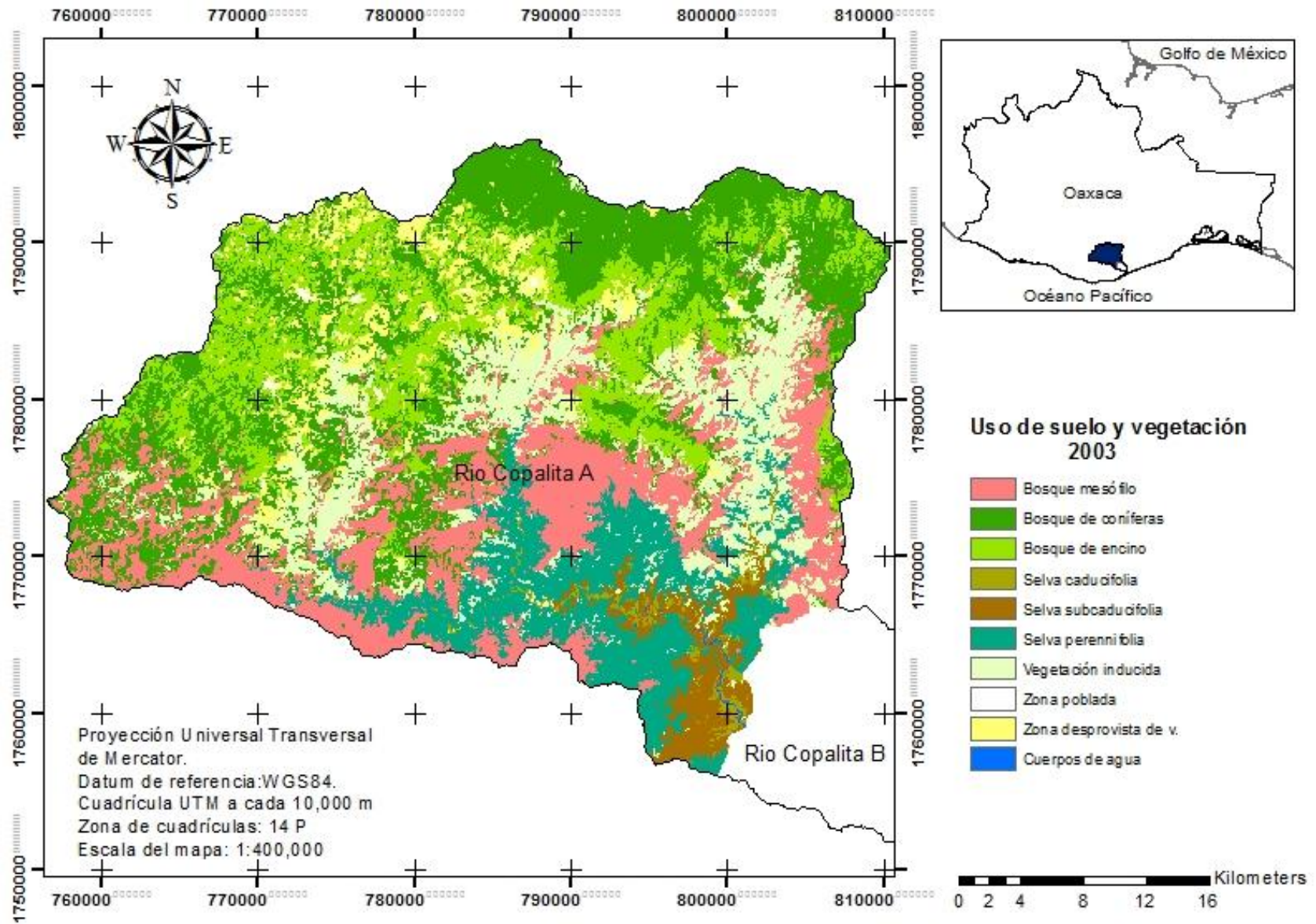
Anexo 2. Uso de suelo y vegetación 1999



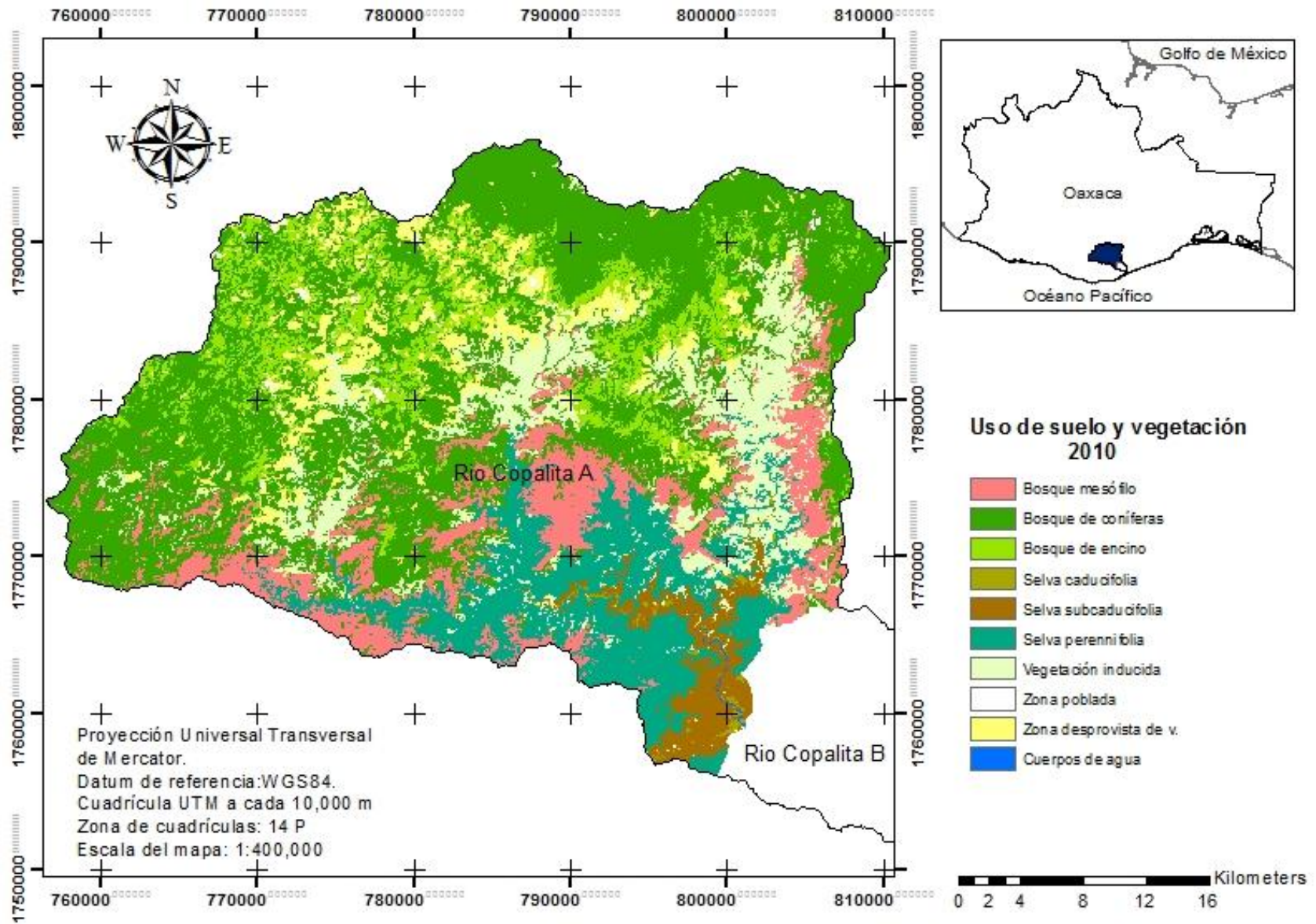
Anexo 3. Uso de suelo y vegetación 1994



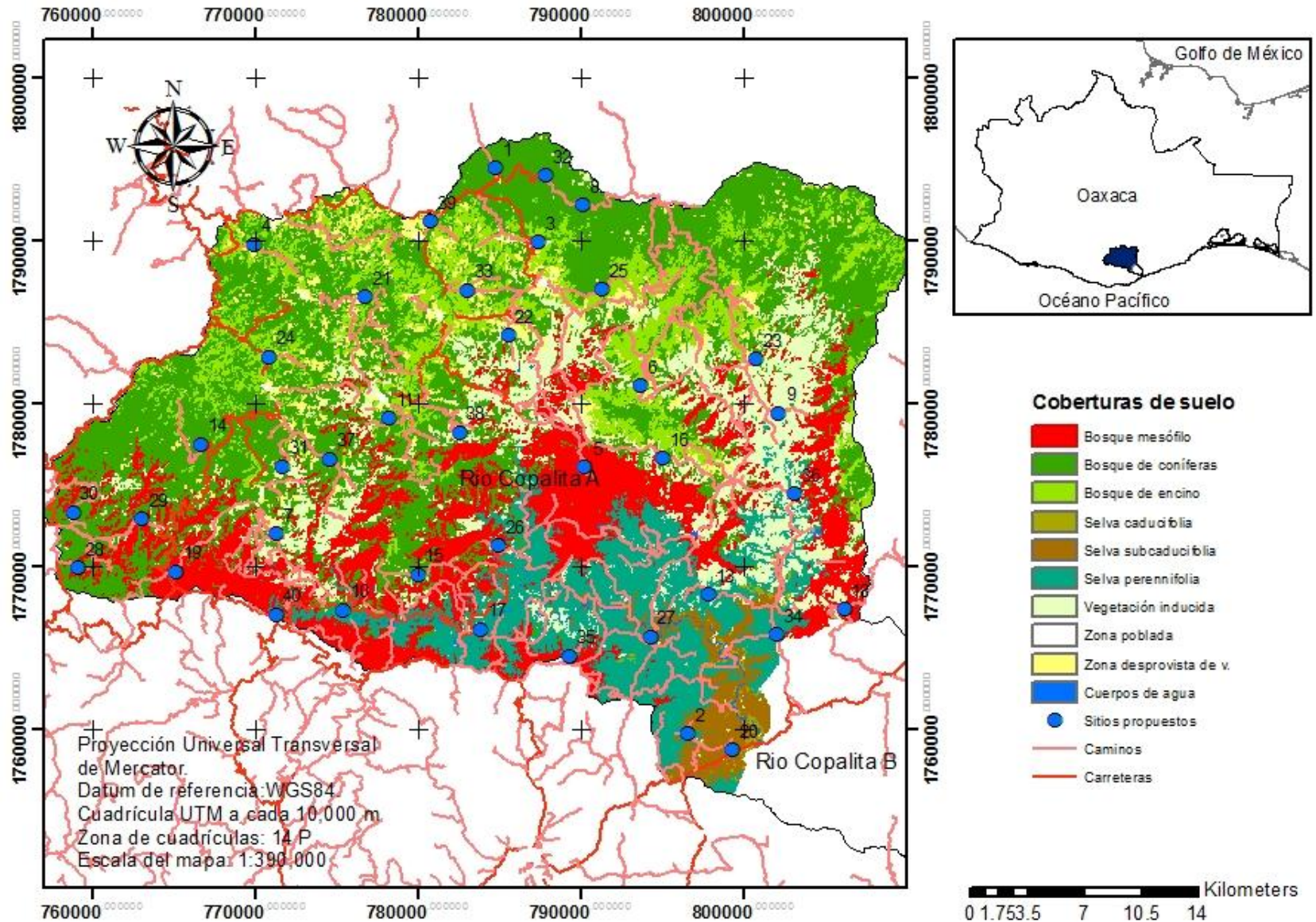
Anexo 4. Uso de suelo y vegetación 2003



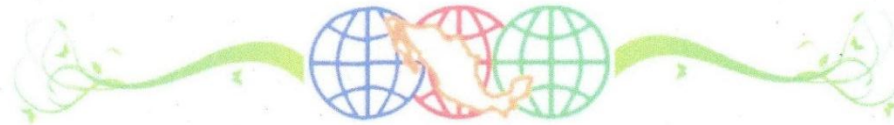
Anexo 5. Uso de suelo y vegetación 2010



Anexo 6. Sitios de muestreo sobre las coberturas de suelo, cuenca Río Copalita



PRODUCTIVIDAD



4° Congreso Nacional de investigación en **Cambio Climático**

El Centro de Estudios en Energía y Ambiente de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, como coordinador de la Sede Regional Istmo - Golfo

Entrega la presente

CONSTANCIA

A

Guillermo Jaciel Hernández Osorio

Por exponer el trabajo:

Análisis temporal de la cobertura del bosque de niebla en la subcuenca río Copalita

Heroica Puebla de Zaragoza a los 24 días del mes de octubre de 2014.

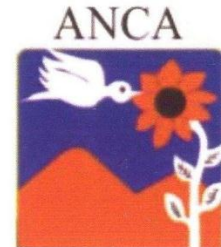
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla.

Dr. Carlos Gay García
Coordinador General
del 4CNICC2014

Dr. Apolonio Juárez Núñez
Coordinador de la Región
Istmo-Golfo del 4CNICC2014



**La BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
Y LA ACADEMIA NACIONAL DE CIENCIAS AMBIENTALES**



Otorgan la presente

CONSTANCIA

A: Belmonte J. S. I., Hernández O. G. J., Ladrón de Guevara T. M. de los Á.

Por su participación con la ponencia ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL MEDIANTE LA INTERACCIÓN DEL BALANCE HIDROLÓGICO Y EL ÍNDICE DE VEGETACIÓN NORMALIZADA EN LA SUBCUENCA RIO COPALITA en el marco del XIV Congreso Internacional y XX Congreso Nacional de Ciencias Ambientales, “*El aprovechamiento sustentable de los recursos naturales nos beneficia a todos*” 2015 Año Internacional de los Suelos, realizado el 3, 4 y 5 de junio del año en curso, en el Complejo Cultural Universitario.

Puebla, Pue. Junio, 2015

Dra. Maria Laura Sampedro Rosas
Presidenta
Academia Nacional de Ciencias Ambientales

M. C. Miguel Angel Valera Pérez
Secretario
Academia Nacional de Ciencias Ambientales





**5^{to} Congreso Nacional
de Investigación en
Cambio Climático**



La Universidad Iberoamericana Puebla, como responsable de la Coordinación de la Sede Regional Istmo-Golfo del 5° Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático, entrega la presente

CONSTANCIA

al

**Ing. Guillermo Jaciel Hernández
Osorio, S.I. Belmonte Jiménez y
M.A. Ladrón de Guevara Torres**

Por su participación en el

5° Congreso Nacional de Investigación en Cambio Climático

En el que participó en la Mesa 7 con el tema: "Predicción espacial de bosques y selvas en la cuenca del río Copalita mediante percepción remota". La presentación se llevó a cabo el Miércoles 14 de octubre de 2015, de las 9:00 a las 10:00 horas en el Auditorio B206 de la Universidad Iberoamericana Puebla.

Cholula Puebla, 14 de octubre de 2015

Dr. Carlos Gay García
Coordinador General del 5° CNICC
Coordinador PINCC de la UNAM

Dr. Benjamín Ortiz Espejel
Director del Instituto de Investigaciones
Interdisciplinarias en Medio Ambiente
Xabier Gorostiaga S.J.

