



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE
HIDALGO**

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES METALÚRGICAS Y
MATERIALES**

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA



**“Identificación y estudio de los suelos
hidrofóbicos en la microcuenca del río San Pedro
en Angangueo, Michoacán”**

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRA EN CIENCIAS

con Especialidad en

Geociencias y Planificación del territorio

Presenta

Biól. Nancy Alanis González

Asesor

Dr. Víctor Manuel Hernández Madrigal

Co-asesor

Dr. Antonio Jordán López

Morelia, Michoacán, Junio de 2016

ÍNDICE

CONTENIDO	Pág.
Índice de figuras	III
Índice de tablas	V
Resumen	VI
Abstract	VII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Justificación	3
1.2. Objetivo general	4
1.2.1. Objetivos particulares	4
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Repelencia al agua o hidrofobicidad	5
2.2. Repelencia al agua en suelos	7
2.3. Factores generadores de la repelencia al agua en suelos	8
2.3.1. Factores bióticos	9
2.3.2. Factores abióticos	12
2.3.3. Incendios.....	14
2.4. Efectos de la repelencia al agua en suelos	15
2.5. Métodos para determinar repelencia al agua en suelos	17
CAPÍTULO 3. ANTECEDENTES	19
3.1. Antecedentes: Relación entre la vegetación y suelos hidrofóbicos	20
3.1.1. Internacionales	20
3.1.2. México.....	21
3.1.3. Michoacán.....	21
CAPÍTULO 4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	23
4.1. Localización del área de estudio	23
4.2. Descripción del medio físico	24
4.2.1. Fisiografía	24
4.2.2. Hidrología.....	25
4.2.3. Suelos	27
4.2.4. Geología.....	29
4.2.5. Uso de suelo y vegetación.....	31
4.2.6. Clima	36
CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS	37
5.1. Diseño experimental	37
5.2. Caracterización físico-química de los suelos	40
5.3. Repelencia al agua en suelo.....	42
5.4. Mineralogía del suelo repelente al agua.....	43
CAPÍTULO 6. RESULTADOS	45
6.1. Caracterización del suelo.....	45
6.2. Mineralogía del suelo repelente al agua.....	47

6.3. Repelencia al agua en suelo	51
6.3.1. Intensidad de la repelencia al agua en suelo bajo diferentes especies de árboles	51
6.3.2. Persistencia de la repelencia al agua en suelo bajo diferentes especies de árboles	53
CAPÍTULO 7. Análisis de resultados	55
7.1. Relación entre la intensidad y la persistencia de la repelencia al agua en suelo	55
7.2. Relación entre la intensidad de la repelencia al agua en suelo y la cubierta vegetal	55
7.3. Relación entre la intensidad de la repelencia al agua en suelo y las propiedades del suelo	58
CAPÍTULO 8. DISCUSIÓN	60
CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	63
Referencias bibliográficas	64

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	Pág
Figura 1. Ángulo de contacto entre la gota de agua y un sólido repelente (a) y un sólido no repelente (b). Tomado de Jaramillo (2006).....	5
Figura 2. Formación de gotas en una superficie sólida	6
Figura 3. Representación de una molécula de carácter anfifílico (parte superior), y secuencia de cambios en la orientación de moléculas anfifílicas sobre una superficie mineral en contacto con el agua (a partir de Tschapek, 1964; Ma'shum y Farmer, 1985; Velmulapalli, 1993). Tomado de Cerdà y Jordán, 2010	7
Figura 4. Localización de la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2013)	23
Figura 5. Orientación de laderas en la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2013)	24
Figura 6. Pendientes de la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2013).....	25
Figura 7. Tributarios de la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2013)	26
Figura 8. Mapa edafológico de la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2013)	27
Figura 9. Ejemplo de Andosol húmico	28
Figura 10. Ejemplo Andosol ócrico.....	28
Figura 11. Geología de la microcuenca del río San Pedro. Fuente: Carta Geológico Minera E14A26	30
Figura 12. Uso de suelo y vegetación de la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2009). Modificado por Alcántara	31
Figura 13. Bosque de oyamel (a), bosque de oyamel-pino-encino (b) y bosque mixto (c)	34
Figura 14. Agricultura de temporal sobre la ladera de un cerro	36
Figura 15. Climograma, estación meteorológica Chincua correspondiente al período 1951-2010.....	37
Figura 16. Puntos de muestreo para medir intensidad y persistencia de la RA del suelo	38
Figura 17. Transecto N-S para el muestreo de RA en suelos (a); prueba WDPT y MED en campo (b)	38
Figura 18. Puntos de los transectos en bosque de oyamel, oyamel-pino-encino y pino-encino	39
Figura 19. Muestreo de RA en suelos bajo diferente cobertura vegetal.....	40
Figura 20. Muestreo de suelos.....	41

Figura 21.	Difractómetro de rayos X D8 Advance	43
Figura 22.	Equipo para técnica de espectrometría infrarroja: a) Troquel, b) pastilla y c) espectrofotómetro	44
Figura 23.	Difractograma de suelo repelente al agua	48
Figura 24.	Comparativa de muestras de suelo repelente al agua e hidrofílicas	49
Figura 25.	Espectro IR de transmitancia de montmorillonita.....	50
Figura 26.	Comparativa de espectros IR de muestra de suelo repelente al agua e hidrofílica.....	50
Figura 27.	Intensidad de las clases de repelencia al agua del suelo (EPT) por especies de árboles y su orientación N-S.....	51
Figura 28.	Persistencia de las clases de repelencia al agua del suelo (WDPT) por especies de árboles y su orientación N-S.....	53
Figura 29.	Número de observaciones de EPT de suelos RA de oyamel-pino-encino y bosque de pino-encino para diferentes coberturas, suelo desnudo, arbustos (M), arbustos y herbáceas (M+H), árboles (A), árboles y arbustos (A+M) y árboles, arbustos y herbáceas (A+M+H)	57
Figura 30.	Análisis de componentes principales de la intensidad de suelos RA (LN(EPT) y variables físicas y químicas: pH, carbono orgánico (CO), cationes intercambiables (Ca ⁺² , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y contenido de arenas y arcillas para suelos bajo cedros, oyamel, encinos y pinos. (A) Casos; (B) Variables	59

ÍNDICE DE TABLAS

CONTENIDO	Pág
Tabla 1. Principales fuentes de sustancias hidrofóbicas del suelo (Doerr, et al., 2000).....	9
Tabla 2. Especies de plantas superiores asociadas con la repelencia al agua (Doerr, et al., 2000)	10
Tabla 3. Clases de WDPT utilizada por diferentes autores para clasificar la persistencia de la repelencia al agua en los suelos. (Jordán, et.al. 2010)	17
Tabla 4. Clases de etanol utilizadas en la clasificación de la repelencia al agua. Equivalencia con la molaridad del etanol y la tensión superficial aparente. (Doerr, et.al. 2002)	18
Tabla 5. Clases de pendiente por Van Zuidam (1986 y área dentro de la microcuenca.....	25
Tabla 6. Uso del suelo y vegetación de la microcuenca del río San Pedro	32
Tabla 7. Clases de EPT de acuerdo a Doerr (1998)	42
Tabla 8. Clases de WDPT de acuerdo a Wessel (1988)	43
Tabla 9. Propiedades físicas y químicas del suelo (media \pm desviación estándar) bajo diferentes especies de árboles	46
Tabla 10. Intensidad de RA en suelo (clases de EPT, media y rango entre paréntesis) para especies de árboles, orientación (N: Norte; S: Sur) y distancia desde el tronco.....	52
Tabla 11. Persistencia de la RA en suelo (clases de WDPT, media y rango entre paréntesis) para especies de árboles, orientaciones (N: Norte; S: Sur) y distancia desde el tronco.....	54
Tabla 12. Porcentaje de cobertura de: oyamel, pino, cedro, encino, total de árboles, arbustos y herbáceas para bosques de oyamel, oyamel-pino-encino y pino-encino en el área de estudio	56

RESUMEN

Los residuos orgánicos producto de la descomposición de la materia orgánica, liberan compuestos hidrófobos que pueden inducir la repelencia al agua (RA) en el suelo, inhibir la infiltración e incrementar las tasas de escurrimiento superficial y erosión del suelo. Existe una importante cantidad de estudios publicados de casos internacionales sobre RA del suelo, pero muy pocas investigaciones corresponden a México y particularmente a Michoacán. En esta investigación se estudió la RA en suelos de la microcuenca del río San Pedro del municipio de Angangueo, Mich., bajo cuatro tipos de especies forestales: encino, cedro, pino y oyamel. Se analizó la distribución espacial de RA del suelo en relación con el dosel de los árboles, la cubierta vegetal, propiedades químicas del suelo (pH, CaCO_3 , el contenido de C orgánico y cationes intercambiables), propiedades físicas (textura) y minerales. Se evaluó la persistencia y la intensidad de RA del suelo con las pruebas de tiempo de penetración de la gota de agua y la prueba de etanol respectivamente. Los resultados indicaron que la RA del suelo no se relacionó con las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de éste, pero si se observó una relación con los diferentes tipos de cobertura vegetal. La proporción de suelos repelentes al agua aumentó de acuerdo a la secuencia: suelo desnudo > arbustos y plantas herbáceas > arbustos > árboles de oyamel, oyamel-pino-encino, y bosque de pino-encino, es decir, suelos bajo el dosel de coníferas mostraron los niveles más severos de RA. Se encontró además que la intensidad de la RA es inversamente proporcional con la distancia a los troncos de los árboles, lo que contribuye a crear un patrón de distribución irregular de RA del suelo. En promedio, la RA comienza a desaparecer a partir de los 7 m en cedros, pinos y oyameles, y a los 3 m en los encinos. La distribución espacial de RA del suelo también está condicionada por gradientes microclimáticos, por esta razón, la persistencia e intensidad de RA del suelo son en general más bajas en las zonas sombreadas (transectos al norte de los troncos de los árboles), donde se espera que el promedio del contenido de humedad del suelo sea más alto durante el año. La RA del suelo está condicionada fuertemente al tipo de vegetación y las especies forestales proveen residuos orgánicos que generan la más alta repelencia en esta zona.

Palabras clave: repelencia al agua, suelo, cobertura vegetal, Andosol, bosque templado.

ABSTRACT

Organic residues the product of the decomposition of organic matter, release hydrophobic compounds to the soil that may induce soil water repellency (WR), which may inhibit infiltration and increase runoff and soil erosion. There is a significant amount of international studies published on soil WR but few research correspond to particularly Mexico and Michoacan. This research studies soil WR in soils from San Peter river microbasin in Angangueo, Michoacan under four types forest species: oak, cedar, pine and fir. It analyzed the spatial distribution of soil WR in relation with tree canopy, vegetation cover and main soil chemical (pH, CaCO₃, organic C content and exchangeable cations) and physical properties (texture). The water drop penetration time and the ethanol tests were used to assess persistence and intensity of soil WR, respectively. The results indicated that the soil RA was not related to the physical, chemical and mineralogical soil properties, but it was observed a relationship with the different types of vegetation cover. The proportion of water-repellent soil increased following the sequence: bare soil > shrubs and herbaceous plants > shrubs > trees from fir, fir-pine-oak and pine-oak forest, that is, soil below the canopy shows the most severe levels of WR.

It was further found that the intensity of WR is inversely proportional to the distance to the tree trunks, contributing to create a patchy pattern of soil WR. On average, WR begins to fade from 7 meters in cedar, pine and fir, and 3 meters in oak. The spatial distribution of soil WR is also conditioned by microclimatic gradients, as persistence and intensity of soil WR were usually lower in shaded areas (north transects from the tree trunks), where soil moisture content is expected to be higher on average through the year. The soil WR is strongly conditioned to the type of vegetation and forest species provide organic waste generated the highest repellency in this area.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso natural no renovable a corto y mediano plazo, y es la base de los ecosistemas terrestres que proveen de servicios ambientales, entre los que se encuentra el dar soporte y suministrar nutrientes a las plantas, indispensables para el ecosistema como para la vida humana (PNUMA, 2000) en consecuencia su protección y conservación son fundamentales. A pesar de que el tema de degradación del suelo está ligado directamente a las actividades del ser humano, no todos son provocados por él, existen procesos naturales que dan lugar a propiedades en el suelo que pueden generarla. En las últimas décadas se ha investigado sobre suelos donde las tasas de infiltración del agua son bajas o nulas (DeBano, 1981; Doerr y Tomas, 2000), a esto se le conoce como repelencia al agua o hidrofobicidad.

La repelencia al agua (RA) en suelos puede tener su origen en sustancias orgánicas hidrofóbicas presentes en la superficie del suelo (DeBano, 1981), producto de sustancias excretadas por raíces, organismos vegetales (Reeder y Jurguense, 1979), animales, hongos (Hallett *et al.*, 2003) y microorganismos. Además, se ha relacionado con el clima (Jaramillo, 2006), textura del suelo (DeBano, 2000; Doerr *et al.*, 2000), la materia orgánica, humus y acidez (Diehl, 2013), y mineralogía (Mataix-Solera *et al.*, 2013; Jordán *et al.*, 2010). Sin embargo, también se ha demostrado que tras un incendio forestal el suelo puede sufrir cambios en sus propiedades generando, aumentándolo o destruyendo la hidrofobicidad (Reeder y Juergensen, 1979; Mallik y Rahman, 1985).

La baja infiltración en el suelo no es el único efecto de la hidrofobicidad también tiene implicaciones en el crecimiento de las plantas, incremento en las tasas de erosión e impermeabilidad, la reducción de la fertilidad del suelo, la transferencia de contaminantes en la superficie y en su interior (DeBano, 2000); inclusive algunos autores como Wondzell y King (2003) y la USGS (U.S. Geological Survey) advierten que en caso de repelencia al agua generada por incendios, ésta puede ser mucho más severa al aumentar la erosión y la posible ocurrencia de flujos de detritos como en Colorado, Nuevo México y Sureste de California (Cannon, 2001), lo cual puede acontecer en años posteriores a los incendios forestales y en respuesta a precipitaciones de alta intensidad. Es importante mencionar que los efectos no sólo son negativos, el incremento en la estabilidad estructural (Blanco-Canqui

et al., 2007) o el secuestro de carbono (Piccolo y Mbagwu, 1989) son unos de los beneficios hasta hoy reconocidos.

Este trabajo partió de la hipótesis, los procesos de remoción en masa ocurren ante la presencia o formación de la RA. Y esto fue causante de los flujos de detritos ocurridos en febrero del 2010 en Angangueo, Mich., pero debido a la falta de trabajos previos sobre el tema fue necesario reconocer esta propiedad, primeramente, por ello, se propuso identificar y estudiar suelos repelentes al agua en Angangueo, Michoacán, así como determinar la manera en que incide la vegetación, los diferentes tipos de asociación vegetal y las propiedades físicas y químicas del suelo en la aparición de la hidrofobicidad. Se utilizaron dos técnicas, tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT) y la prueba de etanol (EPT) para conocer la intensidad y persistencia de la RA del suelo, y se caracterizaron los suelos del área de estudio. Los datos fueron procesados en el programa estadístico Statgraphics XVI.

El presente trabajo se dividió en 9 capítulos. En el primer capítulo se describen los motivos de la realización de la presente investigación y los objetivos que lo guían. El Capítulo 2 contiene el marco teórico de la RA en el suelo con una definición y descripción del tema, los factores bióticos y abióticos que la generan, relación entre los incendios y la RA del suelo, los efectos benéficos y dañinos y los métodos más utilizados en la identificación de la RA. En el Capítulo 3 se abordan los antecedentes en el ámbito internacional, nacional y estatal. En el Capítulo 4 se describió las características principales de la microcuenca del río San Pedro. Dentro del Capítulo 5 se detallan los métodos utilizados para identificar los suelos hidrofóbicos y su relación con las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos y la vegetación. En el Capítulo 6 se describen los resultados entre las relaciones suelos repelentes – vegetación y cobertura, así como, suelos repelentes - propiedades del suelo. En el Capítulo 7 se hace un análisis de los datos estadísticos obtenidos. En el Capítulo 8 se discuten los resultados. Finalmente, en el Capítulo 9 se presentan las conclusiones de la investigación y las recomendaciones

1.1 JUSTIFICACIÓN

Alrededor del mundo y desde inicios del siglo XX se han hecho hallazgos importantes sobre la repelencia al agua, tales como: origen, distribución, métodos de determinación, beneficios y efectos dañinos. A pesar de que en México ya se cuenta con algunas aportaciones es importante seguir caracterizando y profundizando sobre los suelos que presentan hidrofobicidad.

Los efectos provocados por la RA como la disminución en las tasas de infiltración tienen consecuencias hidrológicas y geomorfológicas con afectaciones no sólo en la agricultura, sino también en las zonas forestales, donde México cuenta con un total de 23.46 millones de hectáreas de bosque templado incluidas en los 138 millones de hectáreas de vegetación forestal que ocupa el territorio nacional (CONAFOR, 2013): Lo anterior es importante considerarlo ya que el principal aporte de sustancias hidrofóbicas que generan la RA provienen de la materia orgánica que aporta la vegetación y los microorganismos.

El municipio de Angangueo, fue elegido por ser una zona forestal con bosques de diversas especies sobre un relieve abrupto, antecedentes importantes de incendios forestales, procesos de remoción en masa, y en consecuencia alta susceptibilidad a la erosión. Es de gran importancia determinar para esta zona presencia, origen y severidad de la RA, para que tal información sea incluida en futuros modelos numéricos para la evaluación del escurrimiento superficial y susceptibilidad a los procesos de remoción en masa, y sea integrado en los planes manejo de ecosistemas y de gestión forestal y, evaluación de peligros naturales.

1.2 OBJETIVO GENERAL

Identificar y estudiar los suelos hidrofóbicos en la microcuenca del Río San Pedro en Angangueo, Michoacán.

1.2.1 OBJETIVOS PARTICULARES

- A. Identificar la existencia de suelos hidrofóbicos y su distribución espacial.
- B. Caracterizar las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos hidrofóbicos.
- C. Identificar factores condicionantes y detonantes de la hidrofobicidad.
 - a. Relacionar la intensidad y la severidad de la RA en suelos con la vegetación y el tipo de asociación vegetal.
 - b. Relacionar la intensidad y la severidad de la RA en suelos con las propiedades físicas, químicas y mineralógicas de los suelos.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 REPELENCIA AL AGUA O HIDROFOBICIDAD

El concepto de hidrofobicidad proviene del griego *hidro* que significa agua y *phobos* miedo o temor = repelente, que tiende a no combinarse con, o incapaz de disolverse en agua según *the free dictionary*. Esta definición es una forma simple de explicar este fenómeno, sin embargo, la hidrofobicidad o repelencia al agua (RA) es un concepto mucho más complejo y es necesario profundizar sobre la física y química de las partículas que interactúan.

En la práctica no existe una superficie hidrofóbica debido a que entre un líquido y un sólido siempre existe cierta atracción, pero lo que permite la afinidad o repelencia de una superficie sólida con el agua son las fuerzas de adhesión y cohesión (Doerr *et al.*, 2000). La adhesión es la interacción entre las superficies de distintos cuerpos y cohesión es la atracción entre moléculas de una misma sustancia. Si la atracción entre un líquido y la superficie sólida es mayor que la cohesión interna de las moléculas del primero, el líquido se esparcirá sobre la superficie, si esta atracción es menor, el líquido será rechazado y se forma un menisco cóncavo en el cual se observa un ángulo de contacto (Θ) entre las tres fases: líquido, sólido y vapor. De acuerdo a la Ley de Young- Laplace (Figura. 1) cuando el ángulo de contacto (Θ) se encuentra entre 90° y 0° ($90^\circ \geq \Theta \geq 0^\circ$) el material disperso absorbe agua (superficie hidrofílica) y en el caso contrario $\Theta > 90^\circ$ la presión anticapilar hace impenetrable el material y se produce la repelencia (Cuevas, 2006).

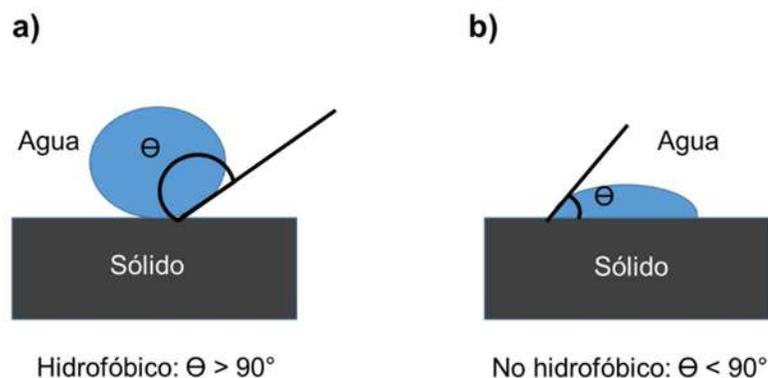


Figura 1. Ángulo de contacto entre la gota de agua y un sólido repelente (a) y un sólido no repelente (b). Tomado de Jaramillo (2006).

El agua tiene un comportamiento muy particular sobre la repelencia, debido a su composición molecular de dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno. Esta estructura le brinda un fuerte carácter dipolar, estableciendo uniones entre moléculas de agua fuertemente unidas mediante puentes de hidrogeno, lo que origina que el agua presente una fuerza de cohesión alta, formando una estructura compacta que la convierte en un líquido casi incompresible.

La dipolaridad del agua, da lugar a una fuerza relativamente fuerte que contrarresta la atracción a superficies cargadas, y si no existen moléculas similares a oponerse a la atracción ejercida por las moléculas del agua, entonces las moléculas de la superficie experimentarán una fuerza de atracción hacia el interior, promoviendo así la reducción de la superficie del agua (Doerr y Thomas, 2000). Si las fuerzas opuestas son mínimas, el agua asumirá una forma esférica (Figura 2).

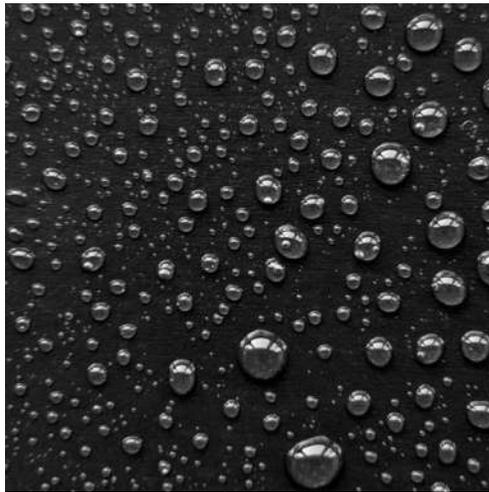


Figura 2. Formación de gotas en una superficie sólida.

Para ampliar la superficie de un líquido, se requiere una cantidad de energía y esto se conoce como tensión superficial. La mayoría de los líquidos tienen una tensión superficial de 20 a $40 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$ a 20°C . La del agua es excepcionalmente alta de $72.75 \times 10^{-3} \text{ N/m}$, por lo que, si una superficie sólida desarrolla una energía molecular de superficie que se acerca a la del agua, esta energía tenderá a contrarrestar las fuerzas dentro de la gota, aumentando así su superficie y extendiéndose así la gota sobre un sólido.

Por lo tanto, las áreas con una superficie libre de energía mayor a $72.75 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$ atraen agua, como es el caso de los minerales principales del suelo y son por lo tanto hidrofílicas

(Tschapek, 1984). Cuanto mayor sea la tensión superficial del sólido, más fuerte es la atracción. Sin embargo, en los sólidos orgánicos suaves, tales como ceras o polímeros orgánicos pueden exhibir superficies con valores de energía libre por debajo de $72.75 \times 10^{-3} \text{ Nm}^{-1}$ y por lo tanto son hidrofóbicas (Zisman, 1964).

El grado de afinidad o repelencia al agua de una superficie viene determinado por las propiedades químicas de su capa externa. En teoría, una capa de sustancias orgánicas con moléculas anfífilas hidrofóbicas puede hacer una superficie mineral hidrofílica repelente al agua (Zisman, 1964) (Figura 3).

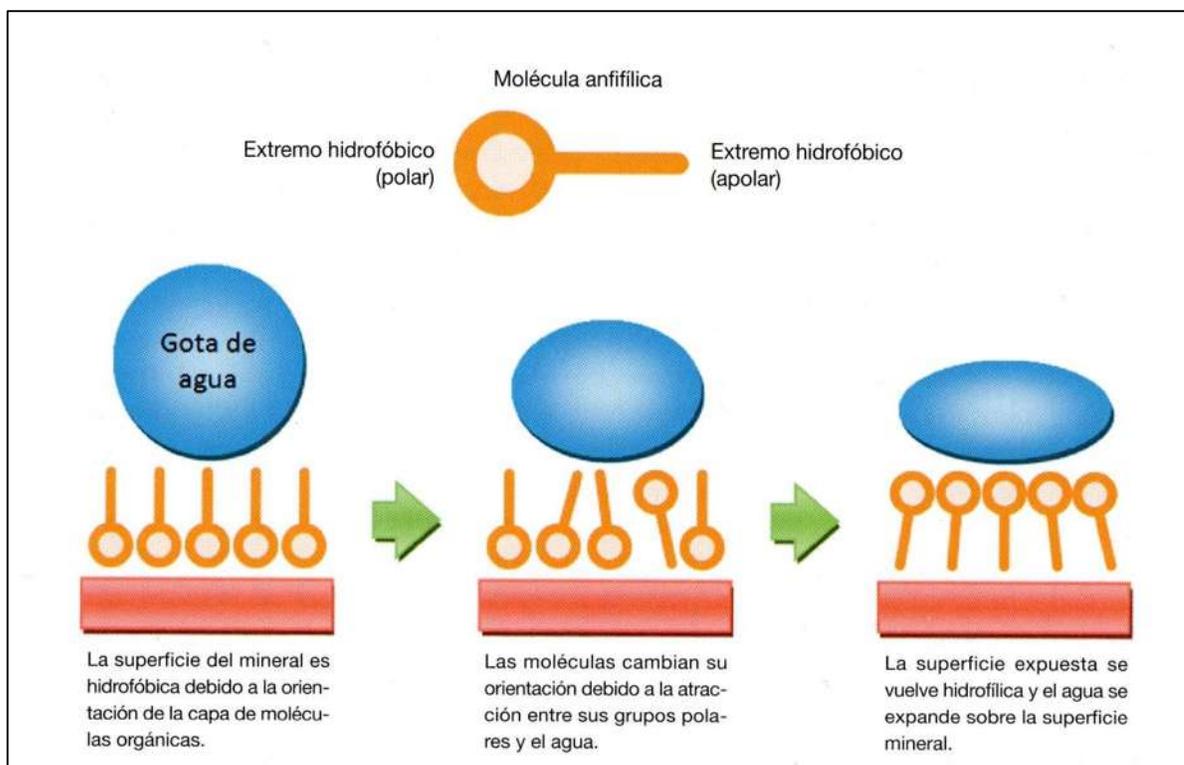


Figura 3. Representación de una molécula de carácter anfífilico (parte superior), y secuencia de cambios en la orientación de moléculas anfífilicas sobre una superficie mineral en contacto con el agua (a partir de Tschapek, 1964; Ma'shum y Farmer, 1985; Velmulapalli, 1993). Tomado de Cerdà y Jordán, 2010.

2.2 REPELENCIA AL AGUA EN SUELOS

La RA en suelos se define como la baja o nula atracción entre las partículas sólidas y las moléculas de agua (Jordán *et al.*, 2013). Los suelos que presentan esta propiedad se

conocen como suelos hidrofóbicos y ofrecen una resistencia intensa a la humectación, disminuyendo la infiltración del agua lo que ocasiona se acumule en la superficie durante períodos de tiempo que pueden oscilar desde unos pocos segundos hasta horas, días o semanas (Doerr y Tomas, 2000).

Es un fenómeno documentado ampliamente en gran cantidad de países y muestra una alta variabilidad, tanto aleatoria, como temporal. Se ha encontrado en diferentes tipos de suelos, contenido de materia orgánica (Cuevas, 2006), textura, origen mineralógico y sobre una amplia variedad de tipos de vegetación, así como diferentes tipos de climas (Jordán *et al.*, 2013). No se manifiesta de manera permanente, se presenta con máxima intensidad en las épocas más secas y en las épocas húmedas disminuye, inclusive llega a desaparecer (Dekker y Ritsema, 1996; Dekker *et al.*, 1998).

Es difícil establecer la distribución y la cobertura de la repelencia, aunque en algunas áreas extensas como en Australia se encuentran afectadas 5 millones de hectáreas, generando hasta un 80% de pérdidas en la producción agrícola (Jaramillo, 2006).

2.3 FACTORES GENERADORES DE LA REPELENCIA AL AGUA EN SUELOS

Los principales causantes de la RA son los compuestos orgánicos hidrofóbicos que provienen de microorganismos vivos o en estado de descomposición, exudados de raíces de plantas, ceras superficiales de las hojas de las plantas, y ciertas especies de hongos (DeBano, 1981, Tabla 1). Estos compuestos recubren de manera más o menos uniforme la superficie de las partículas minerales (Bisdorn *et al.*, 1993; Ma'shum *et al.*, 1988), o que están presentes en el suelo como sustancias intersticiales (Franco *et al.*, 2000)

La identificación de los componentes específicos que causan la repelencia, ha sido el enfoque de la última década en la investigación de suelos. Sin embargo, a pesar de los avances en técnicas analíticas, la identificación exacta de las sustancias responsables en un suelo determinado aún no se ha logrado (Doerr *et al.*, 2000), en parte a la gran cantidad de sustancias responsables en el suelo.

Doerr *et al.*, (2000) dividieron a los compuestos repelentes al agua en dos grupos principales: 1) hidrocarburos alifáticos, los cuales son sustancias que consisten de hidrógeno y carbono con un arreglo de átomos de carbono en una larga cadena, son no

polares (no tienen carga positiva o negativa en cada extremo de la cadena y por consiguiente casi siempre son insolubles en agua; 2) sustancias polares con estructura anfifílica que comprende una cadena de hidrocarburo con un extremo que tiene un grupo funcional con una carga positiva o negativa, este es hidrofílico mientras que el otro extremo es hidrofóbico (Figura 3).

Ambos grupos se consideran causantes de la repelencia al agua, pero las moléculas polares (ácidos grasos y ciertas ceras tales como ésteres y sales de ácidos grasos) parecen ser el principal constituyente de la cubierta hidrofóbica sobre arenas hidrofóbicas (Franco *et al.*, 2000).

Tabla 1. Principales fuentes de sustancias hidrofóbicas del suelo (Doerr, et al., 2000).

Sustancias	Fuente (s)
Alcanos	Bacterias, hongos, algas, plantas superiores
Alquenos	Bacterias, hongos, algas, plantas superiores
Terpenoides	Algunas ceras de plantas
Monocetonas	Bacterias, plantas superiores
Dicetonas	Plantas superiores (p. ej. eucaliptos, pastos)
Poliéster de ácidos grasos	Plantas superiores (p. ej. pinos)

2.3.1 Factores bióticos

Vegetación

Los árboles perenifolios son las especies que más comúnmente se asocian con la repelencia como en el caso de los eucaliptos y pino, ya que contienen una alta cantidad de resinas, ceras o aceites aromáticos (Rodríguez-Alleres *et al.*, 2007; Doerr y Tomas, 2000, Tabla 2). Aunque no se puede asumir que ciertas especies siempre induzcan repelencia al agua bajo condiciones naturales (Bravo-Espinosa *et al.*, 2012).

El mecanismo de entrada de las sustancias hidrofóbicas en el suelo no está bien descrito, pero sí se sabe que la hojarasca o la actividad de las raíces parecen ser algunas de las causas principales (Reeder y Jurguense, 1979). La RA del suelo también fue encontrada bajo arbustos en áreas templadas (Mallik y Rahman, 1985), matorral mediterráneo, chaparral semi-desertico (DeBano, 1991) y también se asocia con algunos cultivos. Por

ejemplo, en Australia, su desarrollo se ha convertido en una preocupación importante en virtud de la leguminosa azul altramuz (*Lupinus cosentinii*) (Carter *et al.*, 1994).

Tabla 2. Especies de plantas superiores asociadas con la repelencia al agua (Doerr, *et al.*, 2000).

Especies de plantas o tipos de vegetación	
Árboles perennes	Árboles deciduos
<i>Acacia mearnsii</i>	<i>Populus tremuloides</i>
<i>Banksia speciosa</i>	<i>Larix occidentalis</i>
<i>Citrus spp.</i>	
<i>Eucalyptus astringens</i>	Matorrales
<i>Eucalyptus globulus</i>	<i>Adenostoma fasciculatum</i>
<i>Eucalyptus marginata</i>	<i>Adenostoma sparcifolium</i>
<i>Eucalyptus patens</i>	<i>Arctostaphylos spp.</i>
<i>Juniperus osteosperma</i>	<i>Calluna lúlgaris</i>
<i>Pinus banksiana</i>	<i>Chamaespartium spp.</i>
<i>Pinus jeffreyii.</i>	<i>Chrysotamnus spp.</i>
<i>Pinus monophylla</i>	<i>Cistus monspelliensis</i>
<i>Pinus patula</i>	<i>Erica arborea</i>
<i>Pinus pinaster</i>	<i>Vaccinium spp.</i>
<i>Pinus radiata</i>	<i>Ulex europaeus</i>
<i>Pinus resinosa</i>	
<i>Pinus strobus</i>	Gramíneas
<i>Pseudotsuga macropora</i>	<i>Agrostis spp.</i>
<i>Pseudotsuga mentziesii</i>	<i>Erharta calycina</i>
<i>Picea engelmannii</i>	<i>Phalaris spp.</i>
<i>Quercus ilex .</i>	<i>Phragmites spp.</i>
<i>Quercus turbinella</i>	<i>Sphagnum spp.</i>
<i>Quercus suber</i>	<i>Spinifex hisutus</i>
<i>Tsuga canadensis</i>	

Scott (1992) sugirió que la liberación de sustancias hidrofóbicas en el suelo es una manera similar a la alelopatía, utilizado por las plantas para suprimir la germinación de vegetación competitiva y para mejorar la conservación del agua mediante la canalización del agua a profundidad del suelo tras vías de flujo preferencial, mientras que, al mismo tiempo, reducir la evaporación debido a la sequedad parcial de la capa superficial del suelo.

Hongos

A inicios de los años 90's se estudiaba el fenómeno de los "anillos de hadas", estos son círculos formados en el suelo en zonas de pastos, donde la hierba se seca y el suelo se vuelve hidrofóbico. Los estudios sugerían que los micelios de los hongos eran los responsables de la RA (DeBano, 1981; Dekker y Ritsema, 1996), y es posible observarlo en campos de golf. El área del suelo alrededor de las raíces de plantas que se refiere generalmente como la rizosfera, se ha demostrado que tienen mayores niveles de repelencia al agua que en la mayor parte del suelo (Hallett *et al.*, 2003).

En años posteriores se encontró que un amplio grupo de hongos están asociados con la repelencia al agua del suelo y lo componen más de 60 especies de Basidiomicetes, siendo señalados con mayor frecuencia *Amanita muscaria*, *Amanita vaginata*, *Aspergillus sydowi*, *Cortinarius sp*, *Fusarium sp*, *Lactarius deliciosus*, *Marasmius oreades*, *Penicillium nigricans*, *Piloderma bicolor*, *Rhizopogon vinicolor*, *Russula sp* y *Trichoderma sp*.

Sin embargo, se han encontrado resultados contradictorios, ya que algunas especies pueden inducir o inhibir hidrofobicidad bajo ciertas condiciones. Jordán *et al.* (2010) mencionan que Bornemisza en 1964 demostró que *Aspergillus niger* es capaz de inducir repelencia al agua, mientras que Savage *et al.*, (1972), no observaron efectos importantes relacionados con los hongos.

Materia orgánica y humus

La materia orgánica del suelo producto de la actividad biológica y descomposición de la biota del suelo, así como de productos de transformación y acumulados en el tiempo sobre los horizontes superficiales dan origen a lo que se denomina humus. La composición del humus varía de manera considerable entre diferentes tipos de suelos y vegetación, pero se puede dividir en sustancias no húmicas (p. ej. azúcares, aminoácidos, grasas, polisacáridos y proteínas) y sustancias húmicas (Diehl, 2013).

Se ha tratado de establecer la relación entre la materia orgánica del suelo y el grado de repelencia, pero los resultados no han sido concluyentes. En algunos casos solo una pequeña proporción de las variaciones en la RA puede ser explicada por las concentraciones totales de materia orgánica y que no siempre es hidrofóbica, de modo que

es necesario considerar no solo la cantidad total sino también el tipo de materia orgánica (Harper *et al.*, 2000)

Cuevas (2006) coincide con Harper *et al.*, (2000) al determinar las variaciones de la RA bajo dos tipos de manejo (bosque y pradera), encontrando una mayor calidad de materia orgánica bajo el bosque, e infiere que las sustancias repelentes provienen de adiciones recientes de materia orgánica o que corresponden a estados primarios de descomposición, demostrando que el grado de descomposición está relacionado con la RA.

Se ha hecho mucho para caracterizar químicamente sustancias a través de los ácidos húmicos, sin embargo, no todos los ácidos húmicos pueden provocar RA. El análisis de los suelos muestreados debajo de un bosque de oyamel y cicuta en Washington por Singer y Ugolin en 1976 mostró que la repelencia al agua fue altamente correlacionada con la relación de ácidos húmicos-fúlvicos. Chen y Schnitzer en 1978 encontraron que una deficiencia de ácido fúlvico produciría RA y, por el contrario, una amplia oferta de ácido fúlvico aumentaría la humectabilidad del suelo (DeBano, 1981).

2.3.2 Factores abióticos

Acidez del suelo

Varios estudios sobre suelos alcalinos revelan que éstos son menos propensos a la RA comparado con suelos ácidos (Mataix-Solera *et al.*, 2008; Zavala *et al.*, 2009a). Además, se ha probado con éxito la reducción de la repelencia al agua al incrementar el pH en suelos mediante el encalado. Estas observaciones se pueden atribuir a los diferentes efectos que tiene el aumento de la actividad de la degradación de las ceras por las bacterias y el aumento de los ácidos húmicos. Sin embargo, la RA del suelo también se ha encontrado en suelos calcáreos en los países bajos, California y España (Diehl, 2013).

Clima

Se pensaba que la repelencia sólo se presentaba en climas secos y suelos arenosos, sin embargo, éstas no son las únicas condiciones en las que se produce. Se ha registrado en climas húmedos tropicales (Jaramillo *et al.*, 2000), en clima húmedo mediterráneo (Doerr y Thomas, 2000) y en otros climas húmedos del norte de Europa (Doerr *et al.*, 2000).

Suelo

Existen registros en una gran variedad de suelos, desde minerales hasta orgánicos, incipientes a muy evolucionados, fuertemente ácidos a alcalinos, fértiles a poco fértiles, concluyendo que la hidrofobicidad puede presentarse en cualquier tipo de suelo (Jaramillo, 2006).

Textura del suelo

El nivel de repelencia depende de la proporción de partículas de suelo con un revestimiento superficial hidrófobo. Este es influenciado por el área de superficie del suelo que varía considerablemente con la textura del suelo. En el pasado la RA del suelo ha sido asociada a suelos de texturas arenosa (DeBano, 1991), y se explica porque los suelos arenosos tienen una superficie más pequeña por unidad de volumen comparada con suelos de textura fina (Doerr *et al.* 2000).

Muchos suelos de esparcimiento, en particular de los campos de golf, se construyen a partir de suelos arenosos, y son muy propensos al desarrollo de la repelencia al agua (Cisar *et al.*, 2000).

Mineralogía

Se ha observado que determinados tipos de suelos de textura arcillosa con suficiente materia orgánica como para desarrollar repelencia al agua tras la acción del fuego, no lo hacen (Mataix-Solera *et al.*, 2013). Esto puede deberse a la cantidad relativamente baja de materia orgánica frente al contenido de arcilla, tal como han sugerido diversos autores (DeBano, 1981), aunque otros apuntan al origen mineralógico de las arcillas como la causa principal (Lichner *et al.*, 2006, Después de un experimento de laboratorio, Lichner *et al.* (2006) demostraron que illita, montmorillonita y caolinita poseen efectos diferentes sobre la repelencia al agua del suelo. Solamente la caolinita se mostró efectiva a la hora de reducir la persistencia de la repelencia al agua de arena de sílice recubierta con ácido esteárico. Mataix-Solera *et al.* (2013) observaron que la presencia de minerales como la caolinita, dominante en la composición de las arcillas en suelos de España e Israel con igual tipo de vegetación y clima, no favorece el desarrollo de repelencia al agua tras el fuego. Según estos autores, el carácter hidrofílico de la Ca-montmorillonita puede deberse a la presencia de cationes hidratados, aunque la sustitución de estos cationes por moléculas orgánicas mediante diversos tipos de unión puede hacerla hidrofóbica de modo que la caolinita podría ser más importante en la preservación del carácter hidrofílico del suelo que la

montmorillonita o la illita, y más efectiva como agente mejorante de suelos hidrofóbicos (Jordán *et al.*, 2010).

2.3.3 Incendios

El fuego es la principal causa de RA en el suelo (Reeder y Juergensen, 1979; Mallik y Rahman, 1985). El fuego modifica los ciclos biogeoquímicos, produce cambios en la vegetación, suelo, fauna, procesos hidrológicos y geomorfológicos, calidad del agua e incluso cambios en la composición de la atmósfera (Neary *et al.*, 1999).

Cuando un suelo es sometido a temperaturas elevadas se generan sustancias orgánicas de origen pirolítico (los hidrocarburos aromáticos policíclicos son generados por procesos de combustión incompleta de materia orgánica como la madera, el aceite o la grasa animal a altas temperaturas), entre otros hidrocarburos resultantes de la combustión incompleta de biomasa cuyo carácter hidrofóbico intensifica la repelencia al agua en suelo (González *et al.* 2011).

Las propiedades físicas del suelo como la estructura, porosidad y la agregación son afectadas por el incendio. Otras propiedades tales como el contenido de arcilla no se ven afectados fácilmente, excepto en la superficie inmediata del suelo durante un fuego muy intenso (DeBano 1991).

Al igual que en suelos con RA generada de manera natural, los suelos de textura gruesa son más susceptibles a la RA por el calor inducido que los suelos arcillosos de textura fina. Mataix- Solera *et al.* (2014) experimentaron con quemas controladas en suelos calcáreos de España, y propiedad clave que afectó la respuesta de la RA después de la exposición al fuego fue la textura del suelo. Los suelos con contenidos de arena del 72% expuestos a una temperatura de 250 °C y 300 °C mostraron repelencia extrema al agua.

Los efectos de los incendios son muy variados: la formación de la capa repelente al agua, la pérdida de la cubierta vegetal protectora, el aumento del flujo superficial y la erosión o la ocurrencia de deslizamientos de terrenos durante las primeras lluvias siguientes del incendio (Robichaud y Hungerford, 2000). Lo anterior está ligado a los múltiples factores de los que depende el incendio: biomasa disponible, intensidad (temperaturas alcanzadas y duración), área quemada, tiempo desde el último incendio, tipo de suelo, humedad, pendiente y vegetación (Neary *et al.*, 1999). Con respecto a la temperatura se ha demostrado que a registros de 175 °C no hay variaciones importantes, pero a 200°C la

hidrofobicidad se va intensificando; sin embargo, al llegar a los 280 °C y 400 °C ocurre la destrucción de casi todos los compuestos hidrofóbicos (Robichaud y Hungerford, 2000; Jaramillo, 2006).

En cuanto al contenido de materia orgánica, las muestras bajo plantas de pino fueron más propensas a desarrollar repelencia al agua a una temperatura de 250-300 °C, que suelos bajo otras especies. Se confirma que las especies de plantas afectan la calidad de materia orgánica y, por lo tanto, estas son factores clave en el desarrollo de repelencia al agua.

2.4 EFECTOS DE LA REPELENCIA AL AGUA EN SUELOS

Como ya se mencionó, el principal efecto originado por la RA del suelo debido al cambio en las propiedades hídricas de los suelos, es la disminución en las tasas de infiltración lo que conlleva a la reducción en los tiempos de generación del flujo superficial y la intensificación del mismo, desarrollo de vías del flujo, irregularidad en el frente de mojado provocando implicaciones geomorfológicas e hidrológicas, además de los efectos notables sobre la productividad, la producción agropecuaria y forestal; y en sistemas agrícolas, el lavado acelerado de agroquímicos. La RA del suelo puede llevar a una pérdida completa en la capacidad de infiltración de un suelo favoreciendo el flujo superficial, que a su vez origina erosión (Mataix-Solera *et al.*, 2013).

En cuanto a la infiltración en suelos repelentes al agua Wallis *et al.* (1990) encontraron grandes diferencias entre la tasa de infiltración mostrada por dos sitios con suelos arenosos con diferentes grados de repelencia: el sitio menos repelente tuvo una tasa de infiltración, en una prueba de 10 min de duración, equivalente a 204 mmh⁻¹, mientras que en la más repelente la tasa fue de 36.6 mmh⁻¹.

Una capa de superficie repelente hace que el agua de lluvia se estanque, si la precipitación es suficiente y su detención en la superficie se supera, se producirá el flujo superficial. La frecuencia de los huecos a través de esta capa (tales como estructura o grietas por secado, agujeros de raíces, madrigueras y parches de suelos hidrofílico o menos hidrofóbico) y el patrón de los suelos humectables (Wallis y Horne, 1992) determinara si el flujo superficial es generalizado o solamente local (Doerr *et al.*, 2000).

Neris *et al.*, (2013) caracterizaron suelos de Andosol bajo dos coberturas vegetales diferentes de bosque y estudiaron la infiltración, repelencia al agua, flujo superficial y la erosión mediante simulación de lluvia. Los resultados mostraron la influencia de las propiedades del suelo del bosque en la infiltración y el flujo superficial. La RA de la capa superficial se considera un factor clave en la respuesta hidrológica del suelo. Se redujo la infiltración de agua mientras que la cohesión de la capa de mantillo altera las vías de flujo preferencial que permiten el agua de lluvia para llegar a los horizontes minerales subyacentes.

En estudios realizados por Jaramillo (1996) en andosoles volcánicos, resulta que la estructura puede verse afectada por la repelencia, debido a los cambios de humedad en el suelo y esto podría ayudar a acelerar la degradación de los suelos.

Jordán *et al.* (2009) determinaron una relación linear entre la tasa de flujo superficial y la pérdida de suelo. En promedio la pérdida de suelo se incrementaba en más del 40% en suelos con RA que en suelos hidrofílicos. Neris *et al.* (2013) observaron que las tasas de erosión fueron bajas en áreas de bosque, resaltando la función protectora del suelo en estas zonas contra los procesos erosivos.

Los efectos que origina la RA no sólo son negativos. Varios autores señalan que la presencia de compuestos repelentes al agua contribuye al desarrollo de la estructura del suelo, plantean la posibilidad de que la presencia de ceras, grasas y resinas impidan la disgregación de los agregados y aumenten así su estabilidad, al hacerlos impermeables al agua. DeBano (1981) destaca a la RA como uno de los mecanismos que ayudan en la formación y estabilización de la estructura del suelo, debido a la cementación producida con materiales orgánicos que reducen la humectación de los agregados provocada por los compuestos hidrofóbicos.

Aunque Roy *et al.* (1998) encontraron en Canadá un fuerte deterioro estructural que se manifestó como una pulverización completa de los primeros centímetros superficiales (hasta 15 cm) del suelo, en 15 de los 27 sitios con suelos repelentes al agua.

Piccolo (1989) por su parte observó un mejoramiento en la estabilidad de agregados al adicionar materia orgánica rica en componentes hidrofóbicos que en materia orgánica con sustancias hidrofílicas.

2.5 MÉTODOS PARA DETERMINAR REPELENCIA AL AGUA DEL SUELO

Existen numerosos y bien establecidos métodos para determinar las características de mojado de un material sólido, por ejemplo, el método de ascenso capilar y el método de la gota sésil. Este último basado en la medición del ángulo en la interfase agua-suelo es el método de medida más directa de la intensidad de la RA del suelo. Sin embargo, la heterogeneidad química y la rugosidad macroscópica y microscópica del suelo hace que la aplicación de estos métodos dificulte la determinación de la RA (Diehl, 2013).

Para evaluaciones de rutina se han desarrollado algunos métodos prácticos y de fácil aplicación como el llamado WDPT (Water Drop Penetration Time) tiempo de penetración de la gota de lluvia. Es un método muy rápido y simple, una gota de agua es colocada sobre la superficie del suelo, registrando el tiempo que necesita la gota en penetrarlo, se obtiene una medida del tiempo que persiste la RA sobre la superficie porosa (Wessel, 1998). Existen varios sistemas de clasificación de la persistencia de la RA en suelo desarrollados por algunos autores (Tabla 3).

Tabla 3. Clases de WDPT utilizada por diferentes autores para clasificar la persistencia de la repelencia al agua en los suelos. (Jordán, et.al. 2010).

Clase	Adams et al. (1969)	Roberts y Carbon (1971)	McGhie y Posner (1981)	Ma'shu m y Farmer (1985)	Bisdorn et al. (1993)	Doerr et al. (1996)	Doerr et al. (1998)	Dekker y Ritsema (1994)
Hidrofílico	<10	<1	<60	<1	<5	<60	<5	0-60
Ligeramente repelente al agua	10-60	1-10			5-60		5-10 10-30 30-60	60-180
Fuertemente repelente al agua		10-60			60-600		60-180 180-300 300-600	180-300
Severamente repelente al agua	>60	>60			600-3600	>3600	600-900 900-3600	
Extremadamente repelente al agua					>3600		3600-18000 >18000	

Otro método sencillo es conocido como MED ó EPT (Molarity Ethanol Drop) prueba de porcentaje de etanol, y se basa en la tensión superficial de una serie de disoluciones

estandarizadas de etanol en agua. Proporciona una medida indirecta de la tensión superficial del suelo y, por lo tanto, indica la intensidad de la RA del suelo. En la tabla 4 se observan las clases de etanol para determinar la intensidad de la RA.

Tabla 4. Clases de etanol utilizadas en la clasificación de la repelencia al agua. Equivalencia con la molaridad del etanol y la tensión superficial aparente. (Doerr, et.al. 2002).

Clase de etanol	Intensidad de la repelencia al agua (Doerr, 1998)	Etanol	MED	γ
		%	M	$\text{Nm}^{-1} 10^{-3}$
1	Muy hidrofílico	0	0.00	72.1
2	Muy hidrofílico	1	0.17	66.9
3	Hidrofílico	3	0.51	60.9
4	Ligera	5	0.85	56.6
5	Moderada	8.5	1.45	51.2
6	Fuerte	13	2.22	46.3
7	Fuerte	18	3.07	42.3
8	Muy fuerte	24	4.09	38.6
9	Extrema	36	6.14	33.1

MED: Molaridad del etanol, M: Molaridad, γ : Tensión superficial aparente

El procedimiento consiste en la aplicación de gotas sobre la superficie del suelo (0.05 mL) de soluciones con distinta concentración de etanol, y se observa si se produce su infiltración durante unos segundos (Watson y Letey, 1970). Cada gota debe dejarse caer desde una distancia no mayor de 15mm para evitar un exceso de energía cinética que pueda afectar la infiltración.

CAPÍTULO 3 ANTECEDENTES

La repelencia al agua ha sido estudiada desde el primer cuarto del siglo XX y el primer trabajo referente a suelos que no podían humectarse fue realizado por Schreines y Shorey en el año de 1910 en California. Otros trabajos en esta misma época eran los que trataban sobre el fenómeno de “anillos de hadas” donde se sugería que la repelencia al agua en suelos era causada por los hongos (DeBano, 1981). En años posteriores, el conocimiento de la materia orgánica y su descomposición fue asociada a la RA, proporcionando las bases para estudios posteriores realizados a inicios del siglo XX (Debano, 2000). Sin embargo, este tipo de trabajos no se generalizaron hasta los años 60's y 70's, con contribuciones sobre la estabilización de la estructura del suelo dada por ciertas sustancias químicas y el entendimiento sobre el movimiento del agua en suelos repelentes. Las disciplinas que sentaron las bases para el entendimiento de esta propiedad fueron la relación entre el suelo-agua- planta y el estudio del importante rol de la materia orgánica en los sistemas agrícolas (Debano, 2000). En la década de los 70's, la repelencia al agua comenzó a tener la atención del mundo en cuanto al manejo y sus implicaciones, por ellos los mejores avances en su caracterización física y química se lograron en esta época. Además, hubo un mejor entendimiento de la RA inducida por el fuego y su importancia en la erosión post-incendio en una cuenca.

La década de los 80's - 90's (Carter *et al.*, 1994; Cerda *et al.*, 1994; DeBano, 1981; Ma'shumm *et al.*, 1988) se caracterizó por un desarrollo en el conocimiento en áreas relacionadas con la RA, y un fortalecimiento en los temas ya tratados en la década de los 60's y 70's. Los 90's fue una temporada en donde se profundizó en el reconocimiento de las implicaciones de la RA en las zonas de cultivo y en los ecosistemas, así como la búsqueda de tratamientos de remediación (Wallis *et al.*, 1990).

Hoy en día, se han hecho esfuerzos importantes en el conocimiento sobre aquellos compuestos de la materia orgánica que dan lugar a la RA y la manera en que estos llegan al suelo (Jiménez-Morillo *et al.*, 2014); también se sigue avanzando en las consecuencias de los incendios y más específicamente en el comportamiento de las cenizas (Pereira *et al.*, 2013).

3.1 ANTECEDENTES: RELACIÓN ENTRE LA VEGETACIÓN Y SUELOS HIDROFÓBICOS.

3.1.1 INTERNACIONALES

Scott (2000) determinó cuanto prevalecía la RA en suelos en áreas forestales de Sudáfrica, y confirma que la repelencia al agua se debe a los diferentes tipos de vegetación siendo más repelente en suelos debajo de eucaliptos seguido de especies de acacias y pinos. Sugiere que esta repelencia está relacionada con sustancias químicas de las plantas y las aportaciones de las mismas por los incendios forestales. Las características de los suelos explicaron muy poco de las RA.

Dekker *et al.* (2000) examinaron el grado, profundidad y variabilidad espacial de la repelencia en dunas a lo largo de la costa holandesa, y encontraron que todas las muestras de diferentes tipos de vegetación a una profundidad de 0-5 cm resultaron de fuertemente a extremadamente repelentes de acuerdo con la profundidad. La gran variabilidad en distancias cortas se debió al muestreo intensivo que realizaron.

Zavala *et al.* (2009a) determinaron la RA con respecto al tipo de vegetación y parámetros del suelo en España. Encontraron una alta relación entre el contenido de materia orgánica y la acidez en suelos bajo pino, corcho, encinos y eucaliptos, mientras que suelos bajo brezal y olivos mostraron una pobre relación. La RA del suelo está asociada con el uso del suelo disminuyendo en la siguiente secuencia: brezal > eucaliptos > pinos > corcho > encinos > olivos.

Seiyde *et al.* (2013) investigaron la relación entre la persistencia de la RA, las propiedades del suelo y diferentes especies de plantas en el norte de Irán. Encontraron una repelencia extrema en suelos arenosos bajo *P. taeda*, *A. subcordata* and *broadleaves forest under B. sempervirens*, *P. persica*, *Q. castanefolia*, *F. orientalis*, and *Acer sp* con un alto contenido de materia orgánica. La persistencia de la RA del suelo mostró una alta variabilidad entre los diferentes sitios de estudio. Concluyeron que el contenido de materia orgánica, textura y acidez son los parámetros más importantes para el desarrollo de la RA del suelo.

Zavala *et al.* (2014) estudiaron el efecto de la hidrofobicidad sobre diferentes tipos de bosque mediterráneo: eucaliptos, pinos y encinos; bajo el dosel, arbustos, herbáceas y sobre suelo desnudo. Los suelos del bosque de pino y eucalipto mostraron repelencia

severa a extrema. En cuanto a las coberturas la repelencia incrementó de acuerdo con la siguiente secuencia: áreas desnudas < arbustos y herbáceas < dosel de los árboles. Concluyeron que existe una fuerte relación entre la repelencia al agua y el tipo de vegetación.

3.1.2 MÉXICO

Aguilar (2013) trabajó en la variación de la repelencia al agua de los suelos en función de la profundidad, del contenido de humedad, de la posición topográfica y de la cobertura vegetal, en la cuenca del río Los Gavilanes, Veracruz. Determinó el grado de repelencia con el método de WDPT y la persistencia con el MED, y encontró que la repelencia se desarrolla con clases altas de severidad y de persistencia en el primer horizonte, descendiendo de manera considerable en el segundo y desapareciendo por completo en el tercero. El grado de repelencia depende del contenido de humedad del suelo, la persistencia aumentó conforme el suelo perdía humedad. Las coberturas forestales sobre las que se originó un mayor grado de repelencia fueron las conservadas de bosque mesófilo de montaña y el bosque de Pino asociadas al tipo de suelo *Andosol úmbrico*. En cuanto a la topografía, el promedio de severidad más alto se encontró en la parte media de los transectos topográficos, lo cual también coincide con los valores más altos de persistencia.

3.1.3 MICHOACÁN

Jordán *et al.*, (2009) estudiaron la ocurrencia y los efectos hidrológicos de la RA bajo bosque de oyamel, pino, pino-encino sobre suelos volcánicos de Michoacán. La RA del suelo en muestras secadas al aire mostraron un alto grado de variabilidad entre las diferentes zonas de estudio, aunque la más alta RA se encontró en suelos bajo bosques densos y arbustos. Los suelos bajo bosque poco denso y suelos desnudos se mostraron hidrofílicos o ligeramente repelentes. Las propiedades del suelo más importantes en el desarrollo de la repelencia fueron la materia orgánica, la textura y acidez. En cuanto a los efectos hidrológicos, el flujo superficial aumentó en suelos RA en contraste con los suelos hidrofílicos, donde se observó que los rangos eran más bajos.

Jordán *et al.*, (2011) realizaron un estudio en los municipios de Tancítaro, San Juan Nuevo Parangaricutiro y Uruapan, sobre los efectos de la severidad de diferentes incendios sobre la RA del suelo, el contenido de materia orgánica, estabilidad de agregados y la distribución de la repelencia al agua en fracciones de agregados tamizados (1–2, 0.5–1, 0.25–0.5 y 0.25 mm). Seleccionaron cinco zonas con antecedentes de incendios y dos sin antecedentes de incendio como control en bosque mixto de oyamel y pino. Observaron una RA del suelo similar en suelos afectados levemente por incendios que en aquellos sitios sin incendios. Sin embargo, reportan una extrema repelencia en la mayoría de las muestras. Las fracciones de agregados finos mostraron un mayor grado de repelencia que en las fracciones gruesas, lo cual sugiere que la destrucción de la materia orgánica durante un incendio se da principalmente en las fracciones gruesas. Además, en suelos repelentes se observó una mayor estabilidad de agregados que en suelos humectables sólo en áreas con incendios a temperaturas bajas. Las altas temperaturas de los incendios en estas áreas destruyen la repelencia, rompen la estabilidad de los agregados y se esperaría indujeran cambios en los flujos superficiales y en la pérdida de suelo.

Bravo-Espinosa *et al.*, (2012) evaluaron el cambio de cobertura y uso de suelo entre 2003 y 2008 en la Cuenca del río Cupatitzio. Para ello interpretaron fotografías aéreas y analizaron nueve propiedades físicas y químicas asociadas con la calidad o degradación en suelo de Andosol; entre estas propiedades se encuentra la RA. Determinaron la hidrofobicidad mediante WDPT sobre sitios en huertas de aguacate y bosque de pino-encino y en ambas coberturas los suelos no presentaron hidrofobicidad, este resultado lo atribuyen a la pérdida de compuestos hidrofóbicos en la materia orgánica debido al cambio en el uso del suelo.

Rodríguez (2014) midió la capacidad de infiltración en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino en la Cuenca de Cuitzeo en temporada de lluvia y de secas, durante el proceso de su investigación encontró áreas donde el suelo se mostraba repelente al agua, para ello, midió la intensidad y la persistencia de la RA mediante WDPT y MED y concluyó que la capacidad de infiltración del suelo estuvo en función del grado de hidrofobicidad y humedad de cada sitio. Además, encontró que el bosque de pino y suelo revegetado naturalmente mostraban repelencia extrema en la temporada seca y disminuyeron drásticamente en la temporada de lluvias.

CAPÍTULO 4 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

4.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Angangueo es un municipio al oriente de Michoacán ubicado entre los paralelos 19°35' y 19°40' de latitud norte; los meridianos 100°14' y 100°21' de longitud oeste; consta de una superficie de 125 ha con una altitud entre 2600 y 3400 m. Colinda al norte con el municipio de Senguio y el estado de México; al este con el estado de México y el municipio de Ocampo; al sur con el municipio de Ocampo; al oeste con los municipios de Ocampo y Aporo (INEGI, 2009) (Figura 4).

La microcuenca del río San Pedro se sitúa al este dentro del municipio de Angangueo entre las coordenadas geográficas 19°36'51" y 19°37'39" de latitud norte y entre 100°15' y 100°17', con una extensión de 340 ha. La altitud máxima que la delimita se encuentra a 3380 m y la mínima a 2580 m.

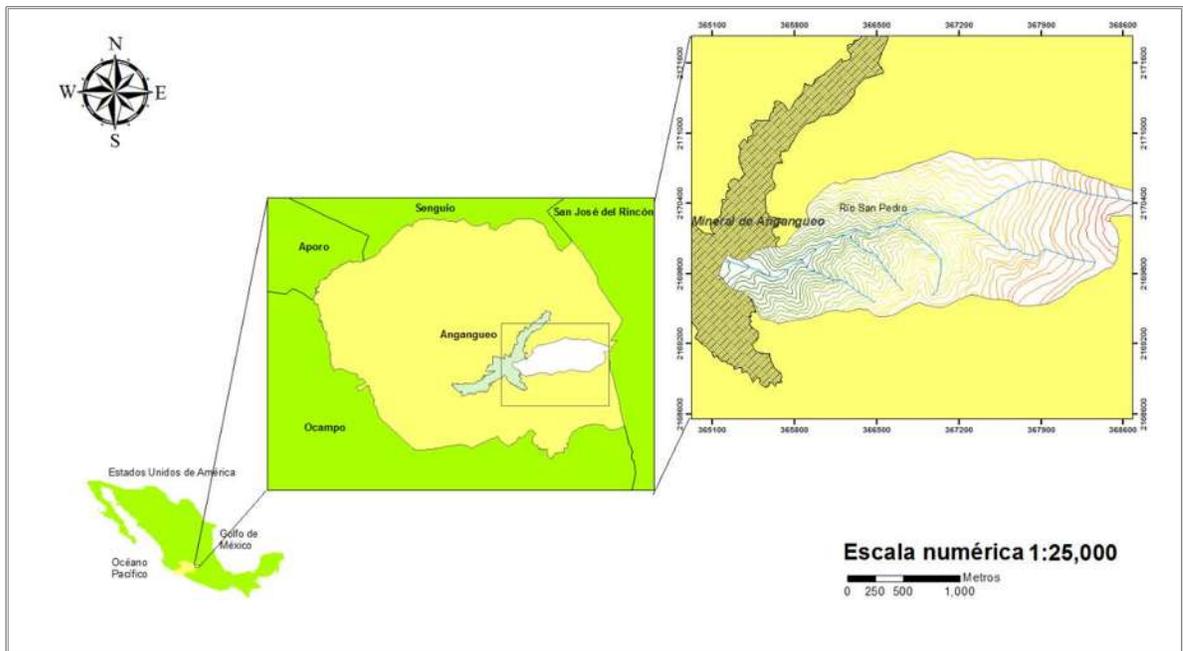


Figura 4. Localización de la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2013).

4.2 DESCRIPCIÓN DEL MEDIO FÍSICO

4.2.1 Fisiografía.

El municipio de Angangueo forma parte del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), dentro de la Subprovincia Mil Cumbres. El cinturón se caracteriza por un relieve montañoso con innumerables aparatos volcánicos. Entre las elevaciones que circundan la cuenca se encuentran al W-NW la Sierra Chincua, al E y al N limita con la Sierra Rancho Grande que sigue una dirección SE-NW y al sur en dirección SE- NW limita con la Sierra el Campanario. La Subprovincia Mil cumbres, es una región accidentada y complicada por la diversidad de sus geformas que descienden hacia el sur, abarca sierras volcánicas complejas debido a la variedad de sus antiguos aparatos volcánicos, mesetas lávicas escalonadas y lomeríos basálticos.

La microcuenca del río San Pedro está conformada por laderas de montañas bajas con alturas entre los 180 a 380 m, piedemontes y un valle fluvial que las divide. Se observan laderas ubicadas al norte, sur y este de la microcuenca, las cuales tienen orientaciones S-SW, N-NW, W-NW respectivamente (Figura 5), con pendientes predominantemente fuertes (16° - 35°) y se extienden en el 69.77% de la superficie (Figura 6).

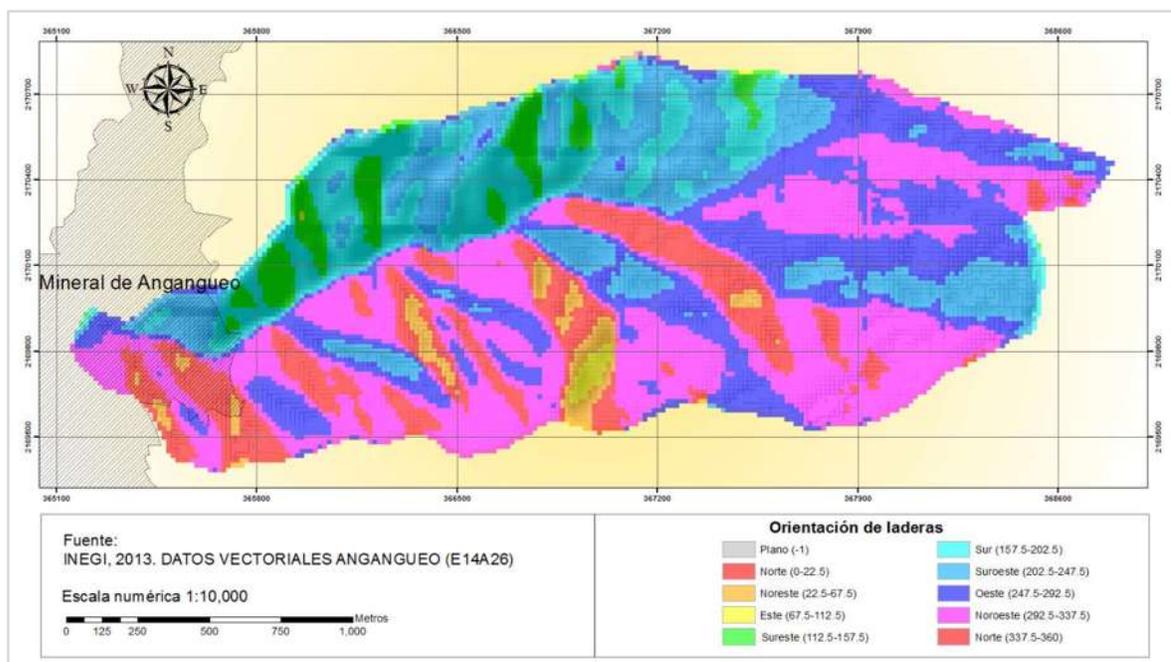


Figura 5. Orientación de laderas en la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán.

Fuente: INEGI (2013).

La clasificación de pendientes para la microcuenca del río San Pedro está basada en Van Zuidam (1986) (Tabla 5). Esta clasificación comprende valores que van desde 1, para una pendiente baja ($< 8^\circ$), hasta el valor máximo de 4 ($>35^\circ$), correspondiente con una pendiente muy fuerte.

Tabla 5. Clases de pendiente por Van Zuidam (1986 y área dentro de la microcuenca.

Clase	Pendiente	Valor	Área	
			km ²	%
0° - 8°	Baja	1	0.13	3.92
8° - 16°	Moderada	2	0.53	15.52
16° - 35°	Fuerte	3	2.37	69.77
$\geq 35^\circ$	Muy fuerte	4	0.37	11.05

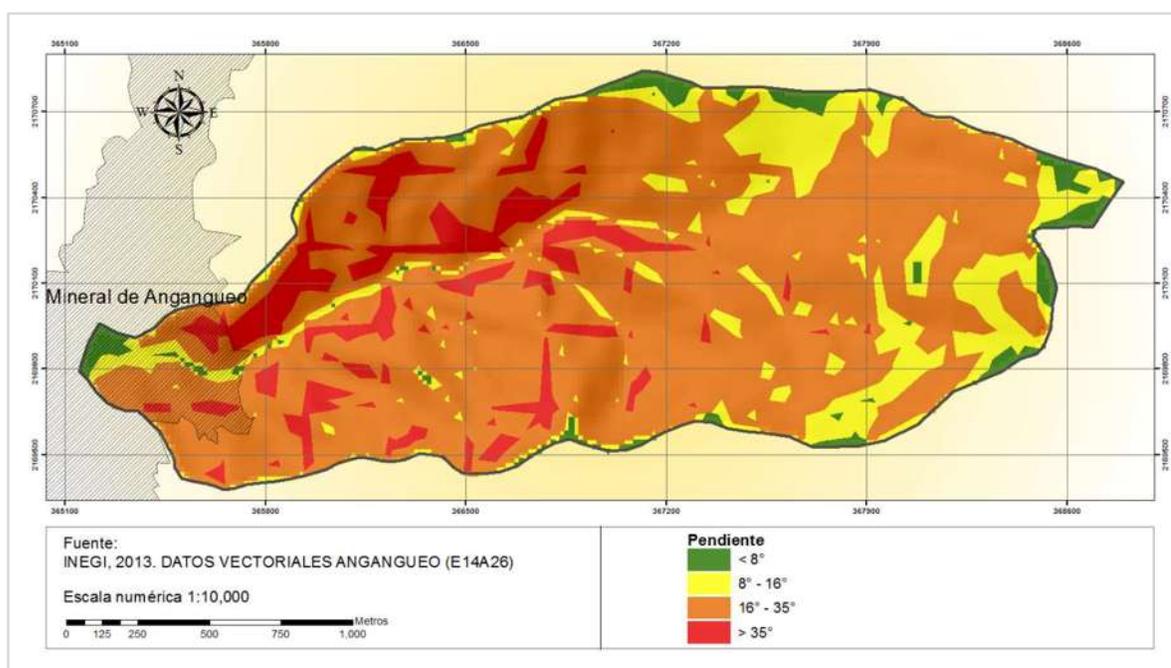


Figura 6. Pendientes de la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2013).

4.2.2 Hidrología

El municipio de Angangueo se ubica en la Región Hidrológica Administrativa IV Balsas, la cual a su vez se subdivide en la subregión Medio Balsas, limitando al norte con la región del Lerma-Santiago-Pacífico (CNA, 1998). La Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la biodiversidad (CONABIO, 1998) incluye la zona de estudio dentro de la

denominada "subcuenca Palo Amarillo", tributaria de la subregión Medio Balsas. Como resultado, Angangueo es el límite de una zona de transición en donde confluyen dos regiones hidrológicas de alto valor específico, lo que incrementa aún más su importancia en relación con la captación de agua pluvial y recarga de acuíferos, entre otras funciones ecológicas. Entre sus ríos principales se encuentra el río Puerco, El Charco, Carrillos y el río San Pedro ubicados dentro de la zona de estudio.

La microcuenca cuenta con una superficie de 3.39 km² y un perímetro de 8.8 km con orientación Este-Oeste considerada como cuenca de tipo endorreica. El afluente principal es el río San Pedro, el cual tiene una longitud de 3.56 km considerando de cauce corto y clasificado como un río de montaña, por ende, poco sinuoso, ya que se encuentra en una etapa de transición de joven a maduro. Sus tributarios son de tipo intermitente en una red de drenaje dendrítica (Figura 7).

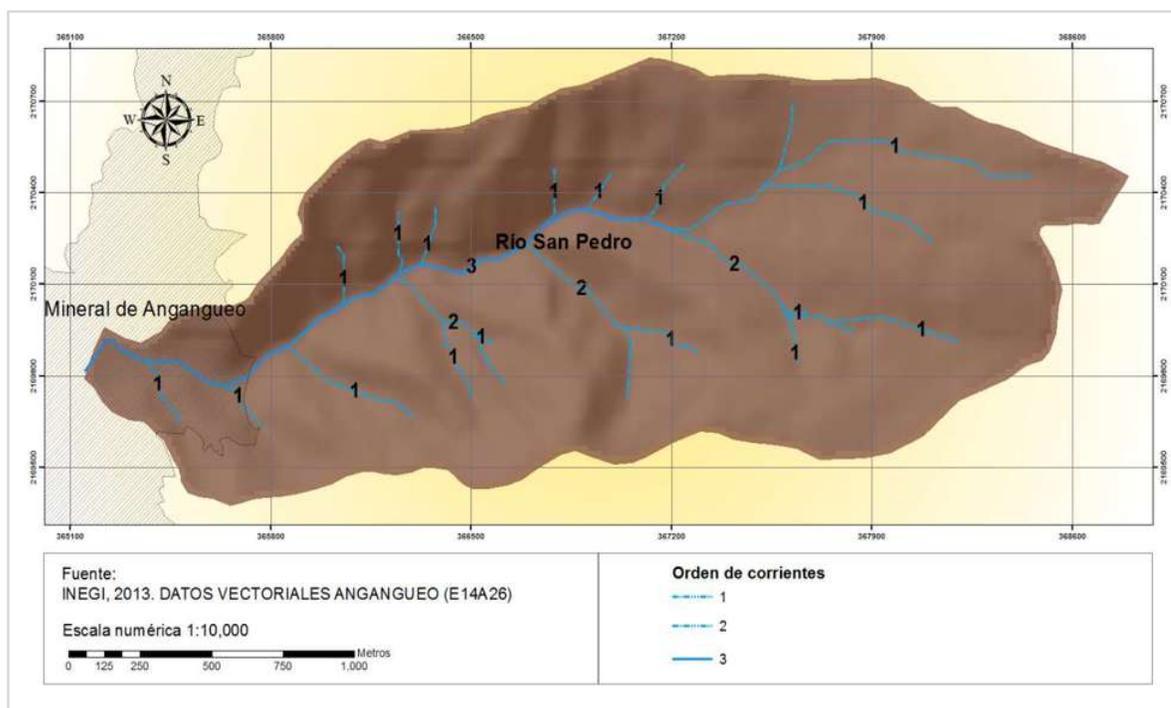


Figura 7. Tributarios de la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2013).

4.2.3 Suelos

De acuerdo con el INEGI (2009) el suelo predominante en el municipio de Angangueo es el Andosol con una extensión del 86.82% y en menor proporción el Luvisol con 9.98%. En la microcuenca del río San Pedro existen Andosoles ócricos y húmicos (Figura 8).

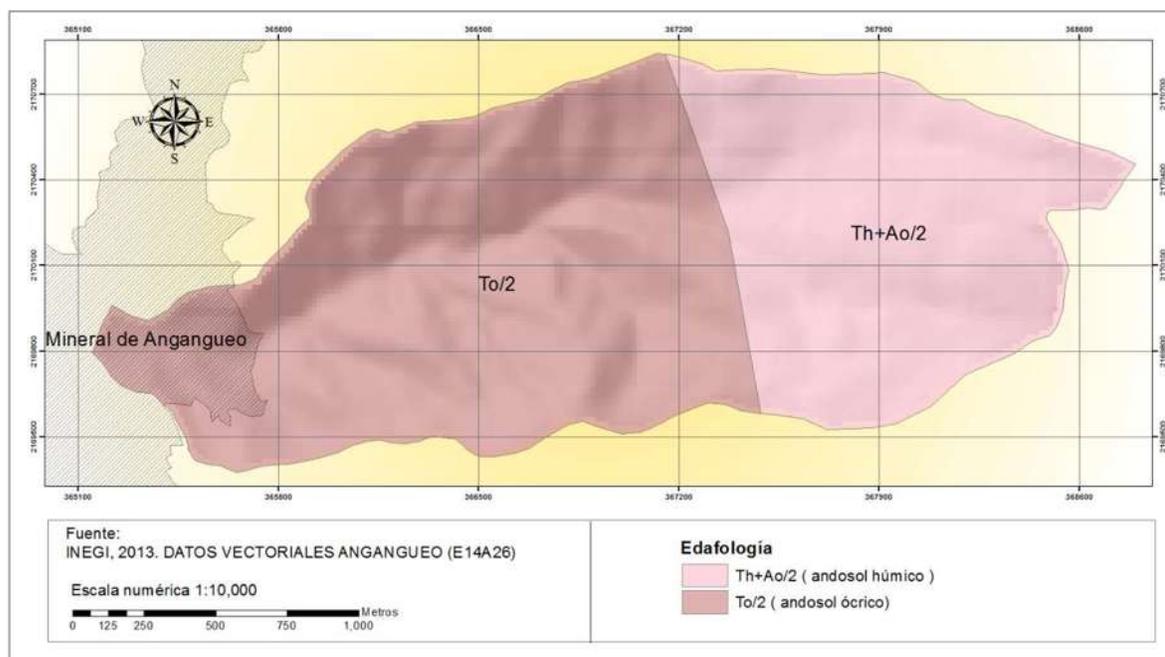


Figura 8. Mapa edafológico de la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2013).

Andosol. Representado con el símbolo T y su nombre proviene del Japonés *an*: oscuro; y *do*: suelo. Literalmente, tierra negra. Son suelos desarrollados especialmente en montañas húmedas sobre vegetación boscosa y son el resultado de la meteorización moderada de depósitos principalmente piroclásticos, aunque también pueden encontrarse asociados con materiales volcánicos. Se sitúan sobre rocas volcánicas efusivas vítreas como lavas, escorias y cenizas, la cual tiene alto contenido de alófono que le confiere ligereza y untuosidad al suelo, y alta capacidad de retención de humedad y valores altos de porosidad.

El horizonte ándico puede encontrarse tanto en la superficie como subsuperficialmente. En general, muestra colores oscuros, un alto porcentaje de materia orgánica (más del 5 %), tienen estructura esponjosa y con frecuencia, consistencia grasosa. Tienen baja densidad aparente y mayormente tienen textura franco limosa o más fina (IUSS-ISRIC-FAO, 2007).

Son de gran importancia económica porque permiten el desarrollo de extensas plantaciones de aguacate, bosque de pino y bosque de pino-encino (INEGI, 2004).

Andosol Húmico. Símbolo: Th. Del latín *humus*: tierra, es un Andosol con una capa superficial oscura y rica en materia orgánica, pero pobre en algunos nutrientes importantes para las plantas (Figura 9).



Figura 9. Ejemplo de Andosol húmico.

Andosol Ócrico. Símbolo: To. Del latín *oais*: claro. Es un suelo muy limoso o arcilloso a menos de 50 cm de profundidad; tiene una capa superficial clara y pobre en materia orgánica y nutrientes (Figura 10).



Figura 10. Ejemplo Andosol ócrico.

4.2.4 Geología

La estructura geológica aflorante de la Sierra de Angangueo ha sido el resultado de tres fases de vulcanismo. La primera corresponde al Oligoceno-Mioceno inferior, la segunda al Mioceno medio y superior y la tercera al Plio-Cuaternario. Esta actividad volcánica se ha desarrollado sobre una zona de debilidad cortical expresada por la Fractura Taxco-San Miguel de Allende, de orientación general NNW-SSE (Demant, 1982).

Las rocas dominantes en el municipio de Angangueo son Andesitas que cubren casi 46 km² (57.36%), brecha volcánica intermedia que abarca 16.5 km² del área municipal (20.65%) y basalto en poco más de 5 km² del territorio de Angangueo (8.56%) (Figura 11).

Los depósitos aluviales están compuestos principalmente por limos, arcillas, arenas, gravas, cuyo espesor varía significativamente y pueden llegar a decenas de metros, cubriendo discordantemente e indistintamente diversas unidades geológicas más antiguas (Corona-Chávez *et al.*, 1999).

La roca Andesita que es resultado directo de la actividad volcánica del Mioceno, está representada por las Sierras de Chincua, Rancho Grande y Campanario, las cuales forman una estructura volcánica alargada, con orientación N-NE - S-SE, que en su conjunto es conocida como Sierra Angangueo, sobre esta roca se ubica la microcuenca del río San Pedro. Tiene una textura porfídica y en algunas zonas afanítica microcristalina. La asociación de fenocristales dominante es de plagioclasas y piroxenos, y localmente puede ser de horblenda con o sin piroxenos.

En cuanto a la Brecha Andesítica, está aflora al oeste de Angangueo donde se aprecia, por lo general muy alterada, compuesta casi en su totalidad por fragmentos angulosos de roca andesítica, cuyos tamaños varían desde milímetros hasta 30-40 cm, sin predominio de algún tamaño en particular, con variación en su color, el cual incluye verde, morado y gris. Esta unidad está asociada a un flujo piroclástico bien consolidado o soldado con matriz andesítica, en los diversos afloramientos de dicha unidad es perceptible su aspecto tobáceo, con ligera pseudoestratificación, evidencias de alteración y características de material compacto, cuyo espesor puede ser aproximado a los 200 m (Atlas de Riesgos Naturales).

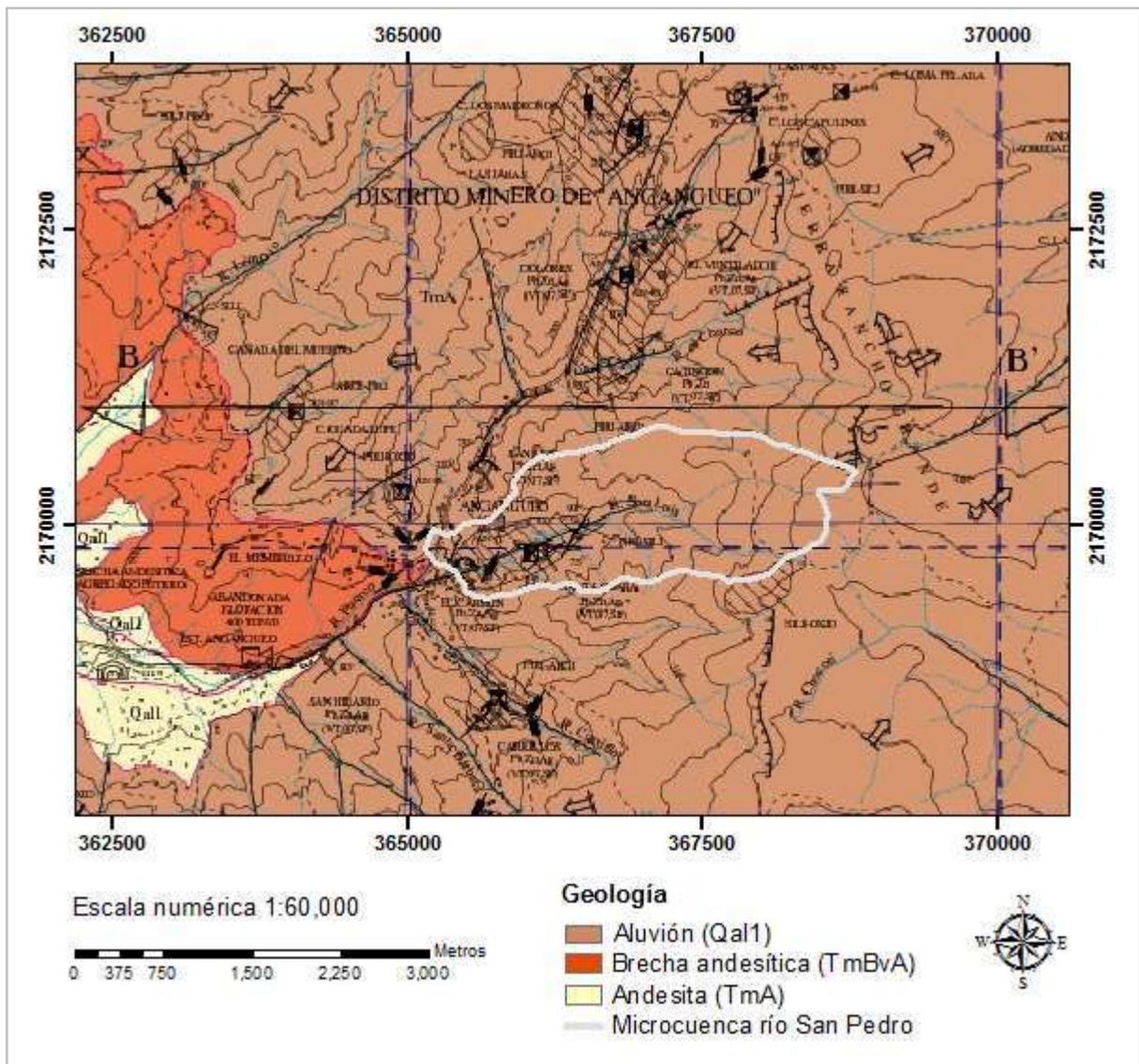


Figura 11. Geología de la microcuenca del río San Pedro. Fuente: Carta Geológico Minera E14A26.

4.2.5 Uso de suelo y vegetación

El área de estudio está cubierta por bosque mesófilo de montaña con predominancia de coníferas como el oyamel, pino, cedro y encino. También se han distinguido las comunidades secundarias clasificadas como matorrales de *Juniperus* y pastizales. Además, ocupando una importante proporción del área de estudio, se encuentran los bosques mixtos de *Pinus-Quercus* (Pino-Encino) (Ramírez, 2001) (Figura 12).

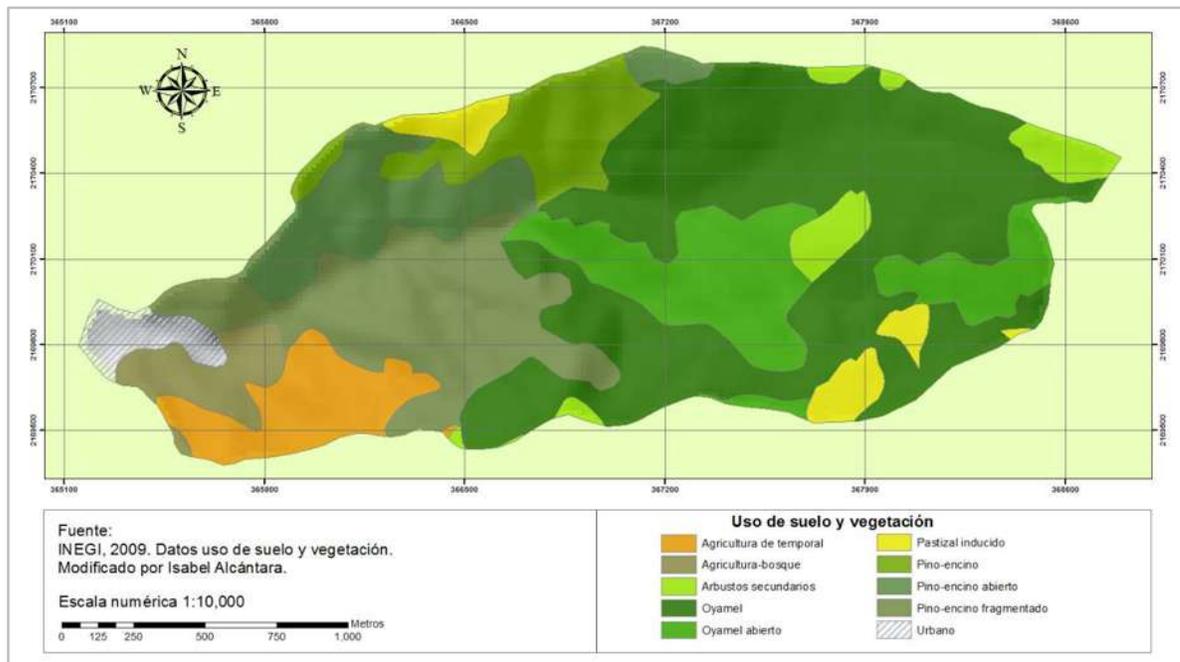


Figura 12. Uso de suelo y vegetación de la microcuenca del río San Pedro, Angangueo, Michoacán. Fuente: INEGI (2009). Modificado por Alcántara.

El bosque de Oyamel predomina sobre los otros tipos de vegetación con una extensión del 38.64% de la superficie total de la microcuenca. Las zonas de pastizal abarcan solo un 2.95%. La agricultura de temporal se extiende sobre un área equivalente al 6.19%, mientras que la zona urbana ocupa un 2.06% (Tabla 6).

Tabla 6. Uso del suelo y vegetación de la microcuenca del río San Pedro.

Uso del suelo y vegetación	Superficie	
	ha	%
Oyamel	131	38.64
Oyamel abierto	43	12.68
Pino-encino	23	6.78
Pino-encino fragmentado	51	15.04
Pino-encino abierto	29	8.55
Pastizal inducido	10	2.95
Agricultura de temporal	21	6.19
Agricultura-Bosque	12	3.54
Arbustos secundarios	12	3.54
Urbano	7	2.06

Bosque de oyamel

En el área de estudio predomina el bosque de oyamel (Figura 13a), subdividido en 2 tipos principales de acuerdo con la especie predominante: bosque de oyamel (con ayarín y cedro) con una extensión de 131 ha y el bosque de pino-encino con 23 ha, ambos pueden ser complementados con vegetación secundaria. Los cedros de esta zona provienen de las plantaciones realizadas a principios del siglo XX (Madrigal, 1994; Ramírez, 2001; Rzedowski y Rzedowski, 2001).

El bosque de oyamel se distribuye en la porción oriental de la microcuenca, con pequeñas porciones al sur con presencia de vegetación secundaria. Debido a que está acompañado de ayarín y cedro se considera de tipo mixto. El bosque de oyamel que se desarrolla sobre Andosoles y en altitudes cercanas a los 3100 – 3500 m se caracterizan por presentar un contorno triangular, se ramifican a poca distancia de la base y se desarrollan en condiciones ecológicas muy especiales; algunos bosques en estas condiciones tienden a ser densos, pero en los casos en que sufren de alteraciones, influyen notablemente en cambios en las condiciones de insolación y humedad del suelo.

Se distinguen tres tipos de comunidades de oyamel: bosque de *Abies*, *Abies religiosa* en codominancia con *Pinus pseudostrobus* y *Quercus laurina*, y un tercero similar al anterior, pero con alta presencia de especies mesofíticas. Son bosques bien estructurados y de una gran diversidad. El estrato arbóreo está compuesto solo por especies de *Abies religiosa* con árboles entre 25 y 30 m de altura. Ocasionalmente se encuentra acompañado de *Salix paradoxa* o *Cupressus lusitanica* con alturas de 8 a 25 m.

En el estrato arbustivo que va de 1.5 a 3 m las especies más frecuentes son *Senecio angulifolius*, *Cestrum thyrsoideum*, *Salvia fulgens*, *Fuchsia microphylla*, *Juniperus monticola* y *Symphoricarpus microphyllus*.

El estrato herbáceo está dominado por *Acaena elongata*, *Lachemilla procumbens*, *Stellaria cuspidata*, *Senecio callosus*, *S. tolucanus*, *S. sanguisorbae* y *Sibthorpia repens*.

Bosque de oyamel-pino-encino

Es un bosque muy similar al anterior (Figura 13b), pero ligeramente más denso ubicados entre los 2900 a 3150 msnm. El estrato arbóreo presenta *Abies religiosa*, *Pinus pseudostrobus* y *Quercus laurina*, además de madroños (*Arbutus glandulosa* y *A. xalapensis*).

El estrato arbustivo no presenta grandes cambios, excepto la abundancia de arbustos de *Satureja macrosterma* y *Versina oncophora* y la ausencia de *Juniperus monticola*.

Bosque Mixto

En cuanto al bosque de pino-encino (Figura 13c), éste es más abundante, principalmente en las porciones noroeste y suroeste, en latitudes inferiores a los 3000 m. Tienen un mejor desarrollo en suelos de andosol, lo cual les permite un crecimiento importante, salvo en las zonas en las que son alterados por las actividades antrópicas. En el municipio presenta una dominancia de árboles del género *Pinus pseudostrobus* aunque también destacan *Alnus jorullensis*, *A. acuminata*, *Quercus laurina*, *Q. rugosa*, *Q. crassipes*, *Arbutus xalapensis*, *Pinus montezumae*, *P. leiophylla*, *P. michoacana*, *Abies religiosa*, *Clethra mexicana* entre otros.



Figura 13. Bosque de oyamel (a), bosque de oyamel-pino-encino (b) y bosque mixto (c).

Matorrales

En la Sierra de Anganguero se distinguen dos tipos de comunidades arbustivas, una dominada por *Juniperus monticola* y otra por *Baccharis conferta*.

El matorral de *Juniperus* se presenta junto con el bosque de *Abies* entre los 3100 y 3500 msnm y está dominado por *Juniperus monticola*, acompañado por *Symphoricarpus microphyllus*, *Acaena elongata*, *Baccharis conferta*, *Senecio cinerarioides*, *S. salignus* y *S. angulifolius*.

El matorral de *Baccharis* se ubica entre los 2800 y 3300 msnm y la especie dominante es *Baccharis conferta*, en codominancia con *Senecio salignus* o *S. cinerarioides* y *S. angulifolius*, y *Acaena elongata* que también puede ser dominante en algunas zonas, además se pueden encontrar especies de *Salvia*, *Eupatorium*, *Solanum*, *Fuchsia* y *Verbesina*.

Pastizales

El pastizal inducido tiene una expresión espacial de 10 ha. Este tipo de vegetación es resultado de la deforestación o desmonte, independientemente del tipo de vegetación original; también es posible ubicarlo en zonas que con frecuencia sufren de incendios. En la microcuenca del río San Pedro se localizan en las cimas o muy cerca de ellas.

Cultivos de temporal

Se practica la agricultura de temporal y por el relieve montañoso se conoce como agricultura de montaña, cubre una superficie de 21 ha (6.19%), también se practica entre espacios abiertos del bosque ocupando una superficie de 12 ha (3.54%). El principal cultivo de la región es el maíz, aunque también son importantes el frijol, la calabaza, la avena y el trigo, entre otros, todos ellos de autoconsumo (Figura 14).



Figura 14. Agricultura de temporal sobre la ladera de un cerro.

4.2.6 Clima

El clima de la región clasificado por Köppen modificado por García (1998) es del tipo templado húmedo con abundantes lluvias en verano C (m)(w) de mayor humedad (60.66%), semifrío subhúmedo C(E)(w0)(w) con humedad del 35.19% (INEGI, 2009).

De acuerdo con la estación meteorológica Chincua (19° 46' 21' N, 100° 17' 18 " W, 2.415 msnm, aproximadamente 14 km al norte de la zona de estudio, la temperatura media anual es de 14.8°C, por lo que se considera de condiciones térmicas semi-frías. La distribución de las temperaturas a lo largo del año muestra un régimen térmico caracterizado por contrastes estacionales: una época, de máximo calor en los meses de primavera con una temperatura media mensual de 17°C principalmente en mayo, que desciende ligeramente con la humedad del verano, hasta alcanzar su temperatura mínima en enero (11.9°C). La precipitación mensual media varía entre 6 mm (marzo) y 211 mm (julio), con una media anual de 913 mm.

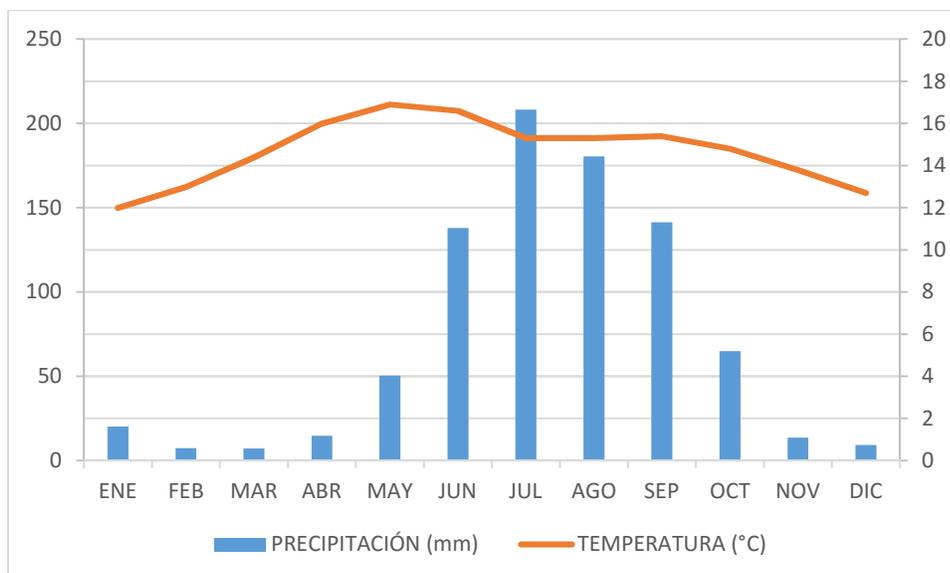


Figura 15. Climograma, estación meteorológica Chincua correspondiente al período 1951-2010.

CAPÍTULO 5 MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizaron dos tipos de arreglos para el muestreo e identificación de suelos:

- i) Con el fin de estudiar la influencia de la proximidad a la fuente de residuos orgánicos sobre la RA del suelo, se seleccionaron 20 puntos en el área de estudio utilizando coordenadas generadas aleatoriamente con el programa ArcMap 10.3 (Figura 16). En cada uno de estos puntos, se seleccionó la especie vegetal más cercana de las cuatro especies consideradas (oyamel, cedro, pino y encino). Tomando como referencia la base de la especie vegetal seleccionada, se hicieron 20 pruebas al suelo sobre la intensidad y severidad de la RA del suelo, 10 pruebas al norte (N) y 10 al sur (S), con una separación de 1 m entre sí (Figura 17), haciendo un total de 400 puntos de muestreo. La dirección norte y sur se eligió por que presentan condiciones ambientales bien definidas y no varían con el paso del tiempo. Al norte siempre se encontrará una mayor sombra y humedad, por lo tanto, habrá una menor hidrofobicidad, en cambio, las condiciones serán contrarias al sur, en donde hay menor sombra y humedad lo que equivaldría a una mayor hidrofobicidad. Es importante

mencionar que para observar la RA en suelos es necesario contar con al menos de un mes sin lluvias.

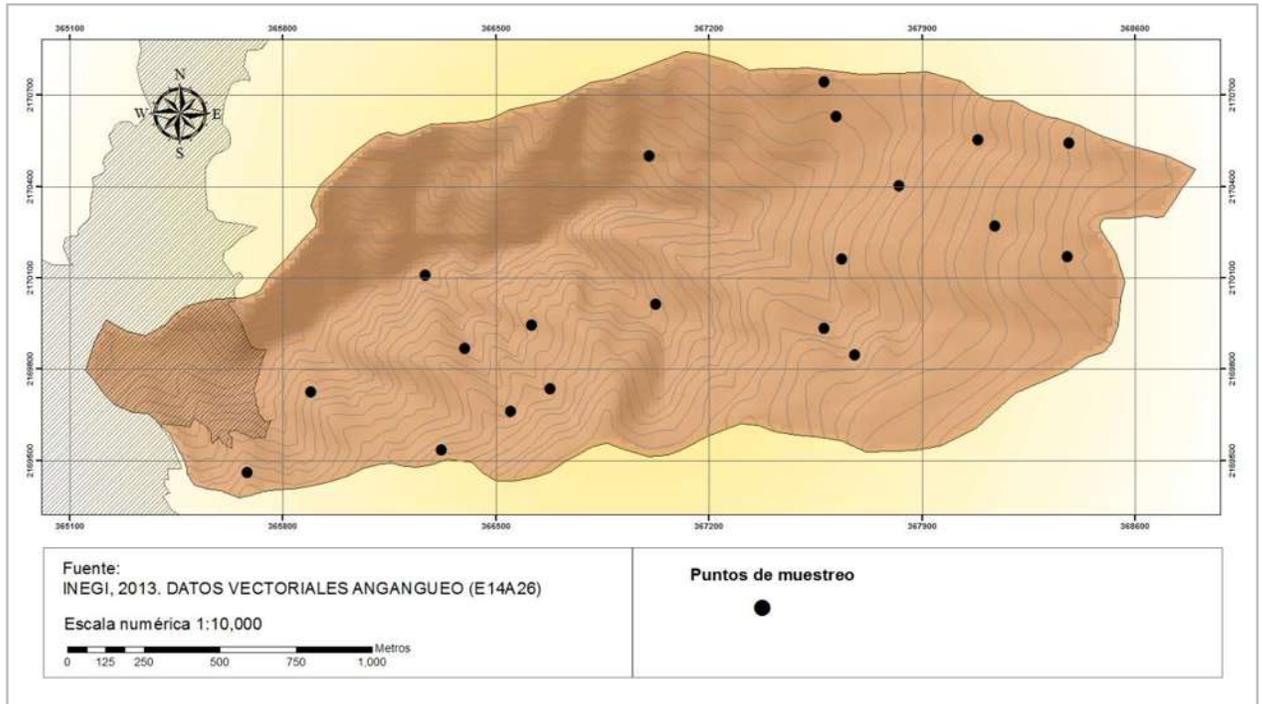


Figura 16. Puntos de muestreo para medir intensidad y persistencia de la RA del suelo.

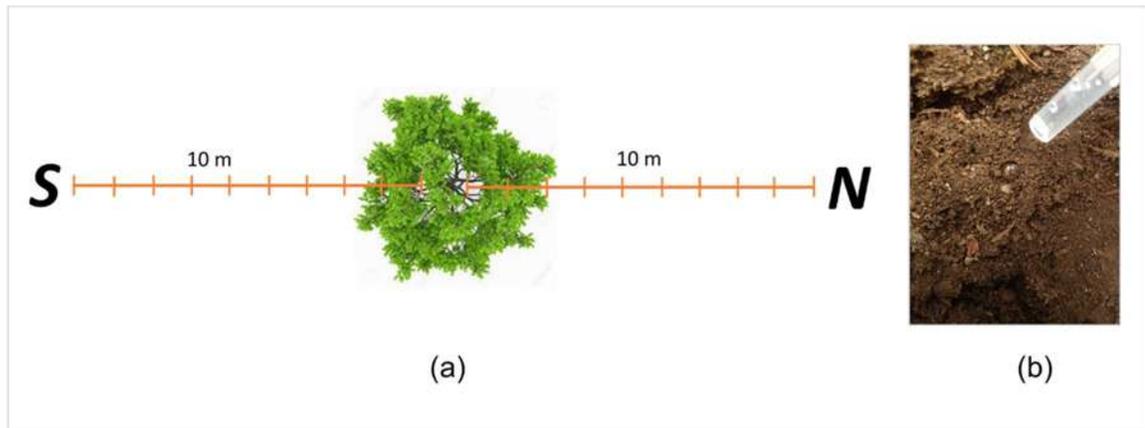


Figura 17. Transecto N-S para el muestreo de RA en suelos (a); prueba WDPT y MED en campo (b).

- ii) Con el fin de estudiar la relación entre la RA del suelo y la cubierta vegetal, se establecieron 10 transectos de 16 m con orientación E-W en bosque de oyamel, oyamel-pino-encino y pino-encino. Los puntos fueron seleccionados de manera

aleatoria utilizando el programa ArcMap 10.3 (Figura 18). Se seleccionó la orientación E-W para observar la relación que existe entre el tipo de cubierta vegetal y la hidrofobicidad, sin que fueran afectadas por las condiciones ambientales (sombra y humedad), ya que en esta dirección no hay variaciones notables.

En cada transecto, se registró la presencia (1) o ausencia (0) de las diferentes clases de cobertura vegetal (T, arbórea; S, arbustiva; H, herbácea) cada 100 cm. El número total de observaciones fue de 480 (10 transectos × 3 tipos de bosques × 16 puntos). La cobertura en cada caso se expresó como el porcentaje de observaciones (puntos con valor de 1) para cada combinación posible (T, T+S, T+H, T+S+H, S, S+H y H). La proporción de suelo desnudo se calculó como el porcentaje de puntos en los que no se observó la cubierta vegetal (puntos con valor 0).

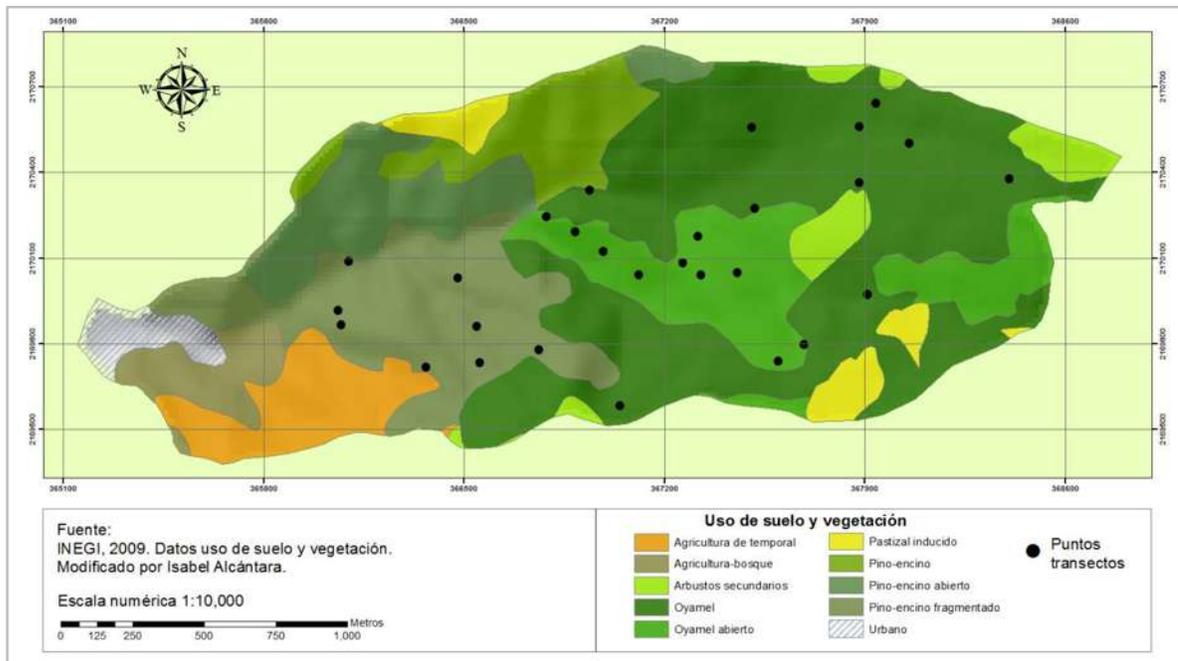


Figura 18. Puntos de los transectos en bosque de oyamel, oyamel-pino-encino y pino-encino.

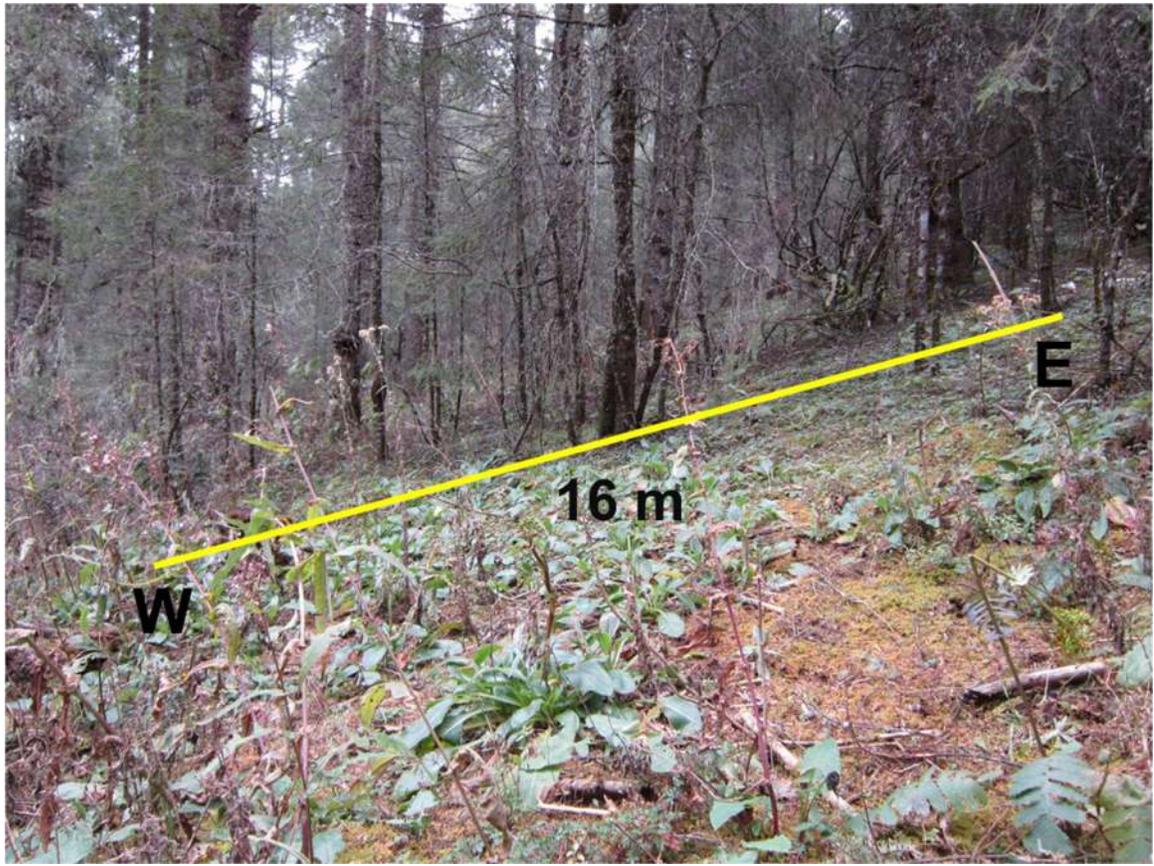


Figura 19. Muestreo de RA en suelos bajo diferente cobertura vegetal.

5.2 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS SUELOS

Previamente a la valoración de la RA del suelo, se tomaron muestras de suelo a una profundidad de entre 0 y 5 cm, 200 cm al norte y al sur de cada árbol considerado (Figura 20). Las muestras de suelo se transportaron al laboratorio en bolsas de plástico, se dejaron secar sobre bandejas de papel a temperatura ambiente (aproximadamente a 25 °C) hasta peso constante y se tamizaron (2 mm) para eliminar las partículas gruesas y obtener la fracción de tierra fina.

Se determinó la textura del suelo y previamente a éste análisis las muestras de suelo (aproximadamente 100 g) se pre-trataron con H_2O_2 (6%) para eliminar la materia orgánica y sales solubles y, posteriormente, con HCl al 35% para eliminar $CaCO_3$ cuando estaba presente. Posteriormente, el suelo se secó en estufa a 110 °C durante 24 h para obtener el peso inicial, se dispersaron mediante una solución de $(NaPO_3)_6$ al 5% agitándose

mecánicamente durante 90 min. A continuación, se determinaron las fracciones de arena (0.05-2 mm) y arcilla (<0.002 mm) mediante el método de Bouyoucos (1962).

La acidez del suelo (pH) se determinó en extractos de suelo : agua (1:2.5), el contenido de carbonatos se determinó sólo en el caso de muestras de suelo con pH > 6.0 mediante el calcímetro del Bernard. El contenido en carbono orgánico (CO) se determinó mediante oxidación con $K_2Cr_2O_7$ y su valoración del exceso de dicromato con $FeSO_4$ (Walkley y Black, 1934). Los cationes intercambiables se determinaron mediante el método de acetato de amonio (Thomas, 1982) y la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se determinó mediante la prueba de $BaCl_2$ (Rhoades, 1982).

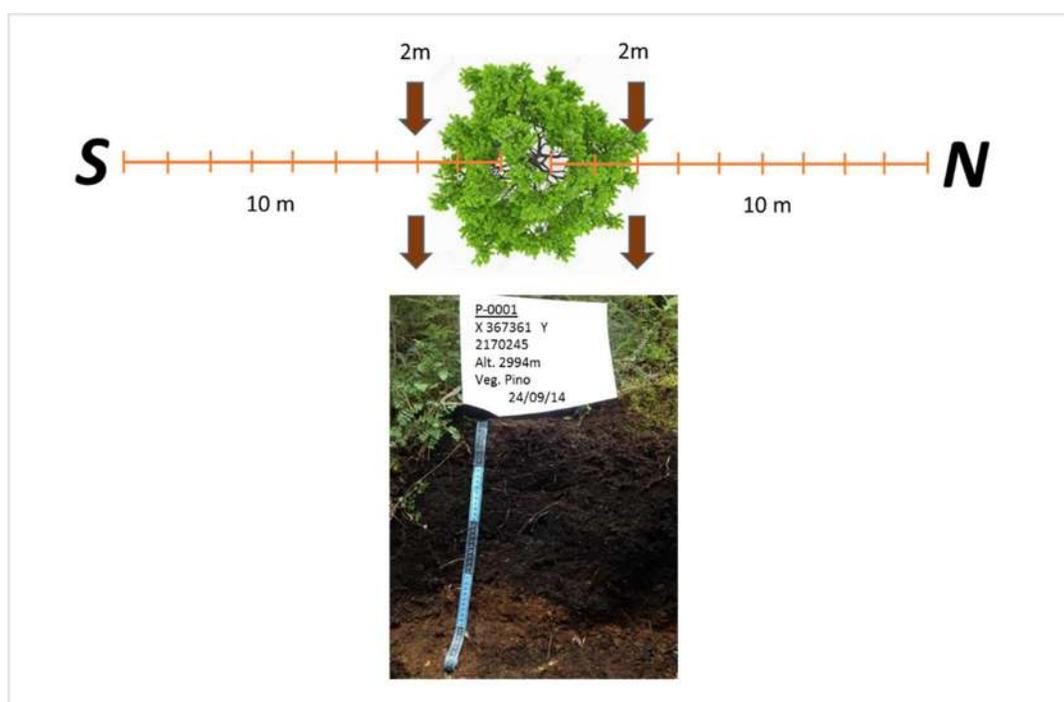


Figura 20. Muestreo de suelos.

5.3 REPELENCIA AL AGUA EN SUELO

La persistencia y la intensidad de la RA del suelo se determinaron sobre la superficie del suelo en condiciones de campo. En cada punto se retiraron cuidadosamente los residuos vegetales manualmente. La intensidad de la RA del suelo se determinó mediante la prueba de porcentaje de etanol (EPT). Sobre la superficie del suelo se aplicaron gotas de 0.5 μL con concentraciones decrecientes de etanol (creciente tensión superficial) utilizando una micro-pipeta hasta que una de las gotas se infiltra en los primeros 5 segundos después de la aplicación. Esto permitió la clasificación de la superficie del suelo en una categoría de tensión superficial entre dos concentraciones de etanol consecutivas de acuerdo con Doerr (1998) (Tabla 7).

Tabla 7. Clases de EPT de acuerdo a Doerr (1998).

Clases EPT	% Etanol	Clases de repelencia al agua en suelos
1	0	Muy hidrofílico
2	3	Hidrofílico
3	5	Ligeramente repelente
4	8.5	Moderadamente repelente
5	13	Fuertemente repelente
6	24	Muy fuertemente repelente
7	36	Extremadamente repelente

La persistencia de la RA del suelo se determinó usando el test de tiempo de penetración de la gota de agua (WDPT; Wessel, 1988) que consistió en medir el tiempo en el que una gota persiste sobre la superficie del suelo. En cada punto, con una micropipeta se aplicaron 10 gotas de 0.5 μL de agua destilada en una zona circular de 10 cm de diámetro en la superficie del suelo desde una altura aproximada de 5 mm para evitar que el exceso de energía cinética afectase a la interacción entre la gota y el suelo; se anotó el tiempo requerido para la completa infiltración. El WDPT medio se consideró como representativo en cada caso y el suelo se clasificó de acuerdo con Wessel (1998) (Tabla 8).

Tabla 8. Clases de WDPT de acuerdo a Wessel (1988).

Clases WDPT	WDPT	Clases de repelencia al agua en suelos
1	0-5 s	Hidrofílico
2	5-60 s	Ligeramente repelente
3	60-600 s	Fuertemente repelente
4	600 s - 1 h	Severamente repelente
5	1 -3 h	Extremadamente repelente
6	3 - 6 h	Extremadamente repelente
7	> 6 h	Extremadamente repelente

5.4 MINERALOGÍA DEL SUELO REPELENTE AL AGUA

Las muestras de suelo RA fueron molidas en un mortero de ágata hasta un tamaño de 40 μm para ser analizadas con las técnicas de difracción de rayos X y espectrometría infrarroja.

La difracción de rayos X es un análisis basado en las propiedades de difracción de rayos X de penetrar en el interior de la sustancia y refractarse, fundamentado en la ley de Wulf-Bragg. Fue utilizado el método Bragg-Brentano o de polvo para conocer la cristaloquímica y fases de las muestras hidrofóbicas. No se requirió una preparación previa de la muestra solo fue necesario un gramo del suelo tamizado y el difractómetro de rayos X (Figura 21).



Figura 21. Difractómetro de rayos X D8 Advance.

La espectrometría infrarroja se basa en el hecho de que los enlaces químicos de las sustancias tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los niveles de energía de la molécula. Estas frecuencias dependen de la forma de la superficie de energía potencial de la molécula, la geometría molecular, las masas atómicas y, posiblemente, el acoplamiento vibracional.

La medición se realizó en una pastilla que consiste en un miligramo o menos de la muestra de suelo finamente pulverizada, con aproximadamente 100-300 mg de polvo de KBr. Posteriormente se presiona la mezcla en un troquel especial (Figura 22a) entre 700 y 1000 kg cm⁻² hasta obtener un disco transparente. A continuación, el disco (Figura 22b) se coloca dentro de un espectrofotómetro (Figura 22c) en la trayectoria del rayo monocromo de luz infrarroja y se registra la cantidad de energía absorbida. Repitiendo esta operación en un rango de longitudes de onda de interés (por lo general, 4000 - 400 cm⁻¹) se construye un gráfico, el cual para cada mineral es específico. Esta técnica determina con mayor precisión el tipo de arcilla presente en las muestras de suelos (Ostrooumov, 2009).

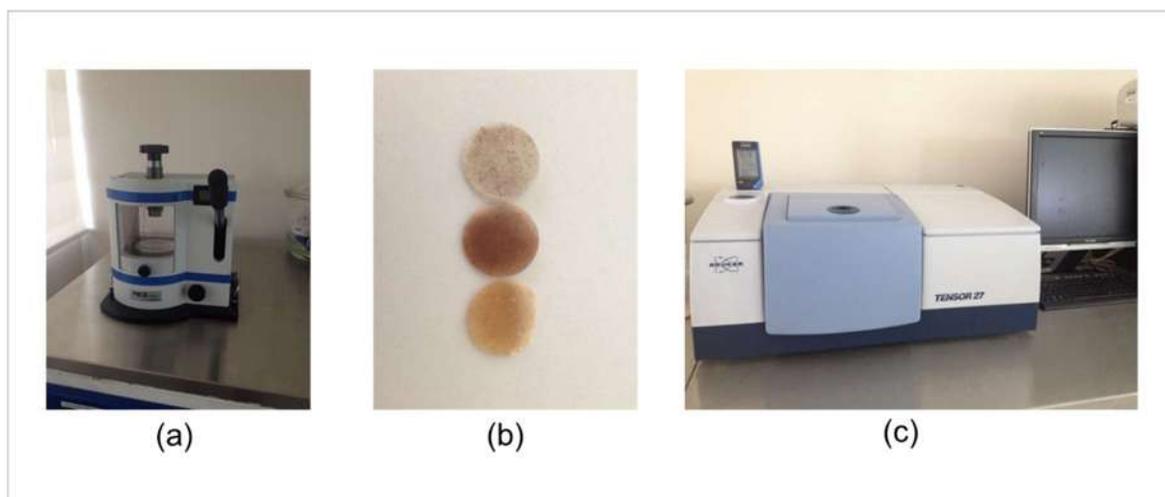


Figura 22. Equipo para técnica de espectrometría infrarroja: a) Troquel, b) pastilla y c) espectrofotómetro.

CAPÍTULO 6 RESULTADOS

6.1 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO

En general, los suelos fueron de ligeros o fuertemente ácidos con valores de pH entre 5.4 ± 0.4 a 6.4 ± 0.3 . El contenido en CaCO_3 para cada especie y orientación fue de 0.00% en todos los casos, excepto en cinco puntos con pH de 6.8 a 7.0 pH (0.01-1.44% de CaCO_3). El contenido en C orgánico varió entre 7.43 ± 0.87 (cedro-sur) y $11.51 \pm 0.32\%$ (encino-norte). Como promedio, el contenido de C orgánico fue de $9.39 \pm 1.52\%$. La tabla 9 muestra un resumen de las características del suelo.

El contenido de cationes intercambiables fue relativamente alto para Ca^{2+} de 6.17 ± 3.07 cmol (+) kg^{-1} , en promedio y Mg^{2+} de 2.21 ± 1.24). Los valores medios de K^+ y Na^+ fueron 0.45 ± 0.26 y 0.09 ± 0.06 cmol (+) kg^{-1} . En general, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) disminuyó siguiendo la secuencia de encino > pino > oyamel > cedro con valores medios que oscilan entre los 12.84 ± 6.95 (sur de cedros) y 38.39 ± 22.87 cmol (+) kg^{-1} (norte de encinos). La textura del suelo fue franco limosa, con contenidos de arena y arcilla 31.1 ± 6.3 y $12.6 \pm 1.9\%$, respectivamente.

Tabla 9. Propiedades físicas y químicas del suelo (media \pm desviación estándar) bajo diferentes especies de árboles.

Orientación	Especies	pH	C Orgánico %	Ca ²⁺				Mg ²⁺	K ⁺			Na ⁺
				cmol(+) kg ⁻¹	%	%	%					
Norte	Cedro	6.1 \pm 0.4	8.08 \pm 0.81	5.53 \pm 2.8	1.96 \pm 1.25	0.39 \pm 0.22	0.08 \pm 0.05	16.01 \pm 8.79	24.4	62.8	12.8	
	Encino	5.4 \pm 0.4	11.51 \pm 0.32	5.69 \pm 3.1	2.03 \pm 1.38	0.41 \pm 0.29	0.09 \pm 0.06	38.39 \pm 22.87	32	55.8	12.2	
	Oyamel	6.2 \pm 0.4	8.4 \pm 0.6	6.78 \pm 3.05	2.43 \pm 1.12	0.46 \pm 0.2	0.09 \pm 0.05	22.23 \pm 9.26	23.6	63.5	12.9	
	Pino	5.7 \pm 0.3	10.21 \pm 0.28	5.58 \pm 2.83	2.01 \pm 1.05	0.41 \pm 0.21	0.08 \pm 0.05	30.01 \pm 15.36	35.2	52.1	12.7	
			5.8 \pm 0.5	9.55 \pm 1.5	5.89 \pm 2.93	2.11 \pm 1.2	0.42 \pm 0.23	0.09 \pm 0.05	26.66 \pm 17.12	28.8	58.5	12.7
Sur	Cedro	6.4 \pm 0.3	7.43 \pm 0.87	6.1 \pm 3.39	2.2 \pm 1.34	0.46 \pm 0.29	0.09 \pm 0.06	12.84 \pm 6.95	34.2	53.8	12	
	Encino	5.5 \pm 0.4	11.12 \pm 0.43	6.06 \pm 2.79	2.23 \pm 1.1	0.45 \pm 0.24	0.09 \pm 0.04	38.08 \pm 16.84	32.5	54.9	12.6	
	Oyamel	6.1 \pm 0.4	8.54 \pm 0.77	7.38 \pm 3.4	2.73 \pm 1.47	0.57 \pm 0.32	0.12 \pm 0.07	26.07 \pm 13.7	35	52.5	12.5	
	Pino	5.8 \pm 0.3	9.84 \pm 0.33	6.25 \pm 3.24	2.07 \pm 1.17	0.43 \pm 0.27	0.09 \pm 0.06	30.65 \pm 16.19	32.2	54.7	13.1	
	Todos	5.9 \pm 0.5	9.23 \pm 1.53	6.45 \pm 3.2	2.31 \pm 1.28	0.48 \pm 0.28	0.1 \pm 0.06	26.91 \pm 16.53	33.5	54	12.5	
Todos los casos		5.9 \pm 0.5	9.39 \pm 1.52	6.17 \pm 3.07	2.21 \pm 1.24	0.45 \pm 0.26	0.09 \pm 0.06	26.79 \pm 16.78	31.1	56.3	12.6	

C orgánico: Contenido de carbono orgánico. CIC: Capacidad de intercambio catiónico.

6.2 MINERALOGÍA DEL SUELO REPELENTE AL AGUA

Se analizaron doce muestras de suelo repelentes al agua e hidrofílicas como muestra control, bajo especies de oyamel y pino, mediante las técnicas de difracción de rayos X y espectrofometría infrarroja. En los difractogramas de ambos tipos de muestras se encontró una asociación de minerales arcillosos: montmorillonita $[(\text{Na,Ca})_{0,3}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2]$, halloysita $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ e hidro-halloysita, así como cuarzo $[\text{SiO}_2]$ y feldespatos (Figura 23); en las muestras hidrofílicas no se presentaron diferencias con respecto a las muestras de suelo RA (Figura 24); a excepción de una de las muestras hidrofílicas donde se observaron pequeñas cantidades de caolinita $[\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4]$ (Figura 25), la cual se ha encontrado como un mineral efectivo en la reducción de la repelencia al agua (Mataix-Solera *et al.* 2013), sin embargo, a pesar de este resultado no se puede afirmar que esta arcilla limita la expresión de la RA.

Los espectros infrarrojos (IR) de 12 muestras de suelo hidrofóbicas e hidrofílicas mostraron la banda característica de la montmorillonita (1034). (Figura 21). De igual manera que en la prueba de difracción de rayos X, con este método no se presentaron diferencias entre ambos tipos de muestras (Figura 26). Por lo que se concluye que la mineralogía inorgánica de estas muestras no revela efecto alguno en la aparición de la repelencia.

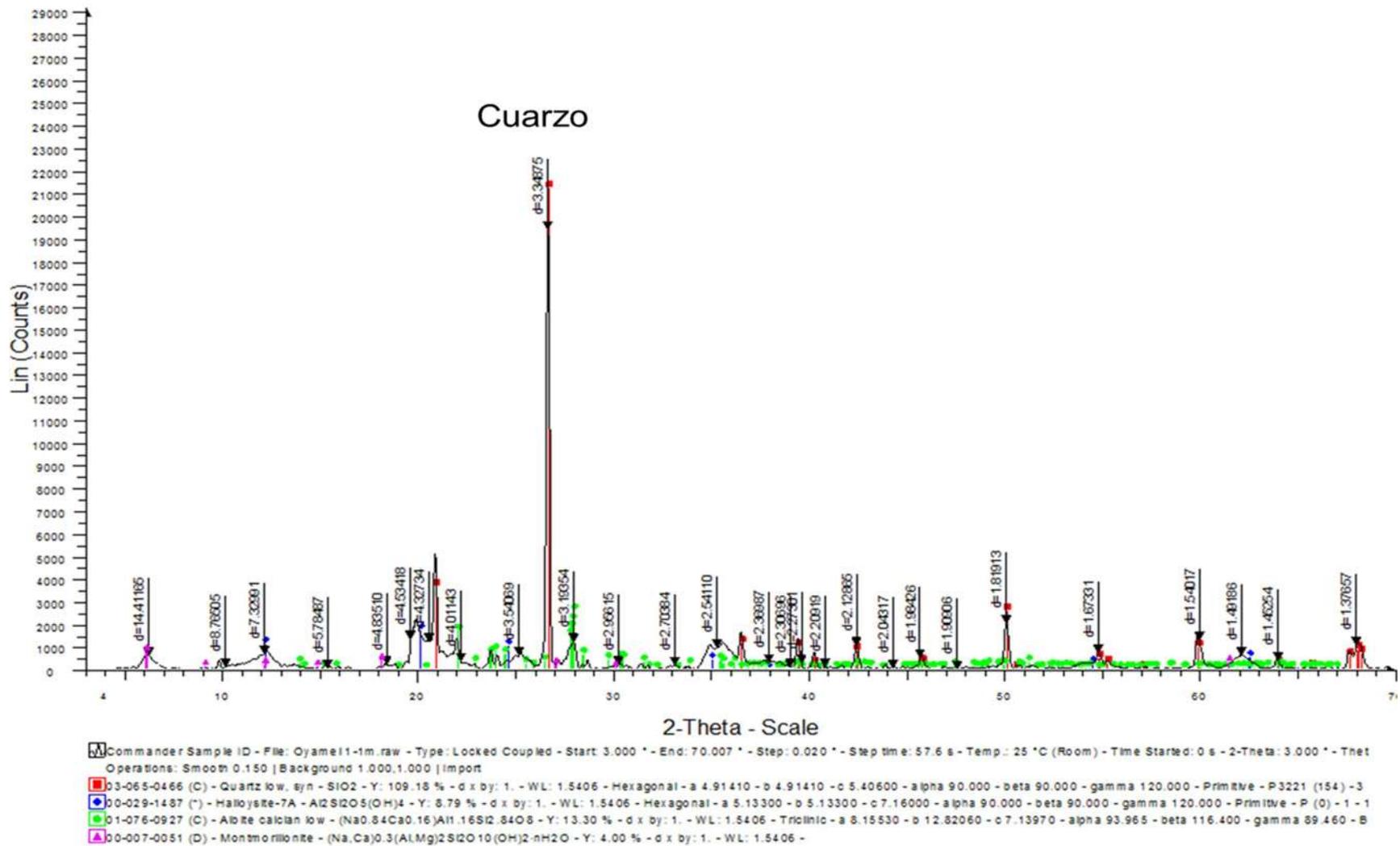


Figura 23. Difractograma de suelo repelente al agua.

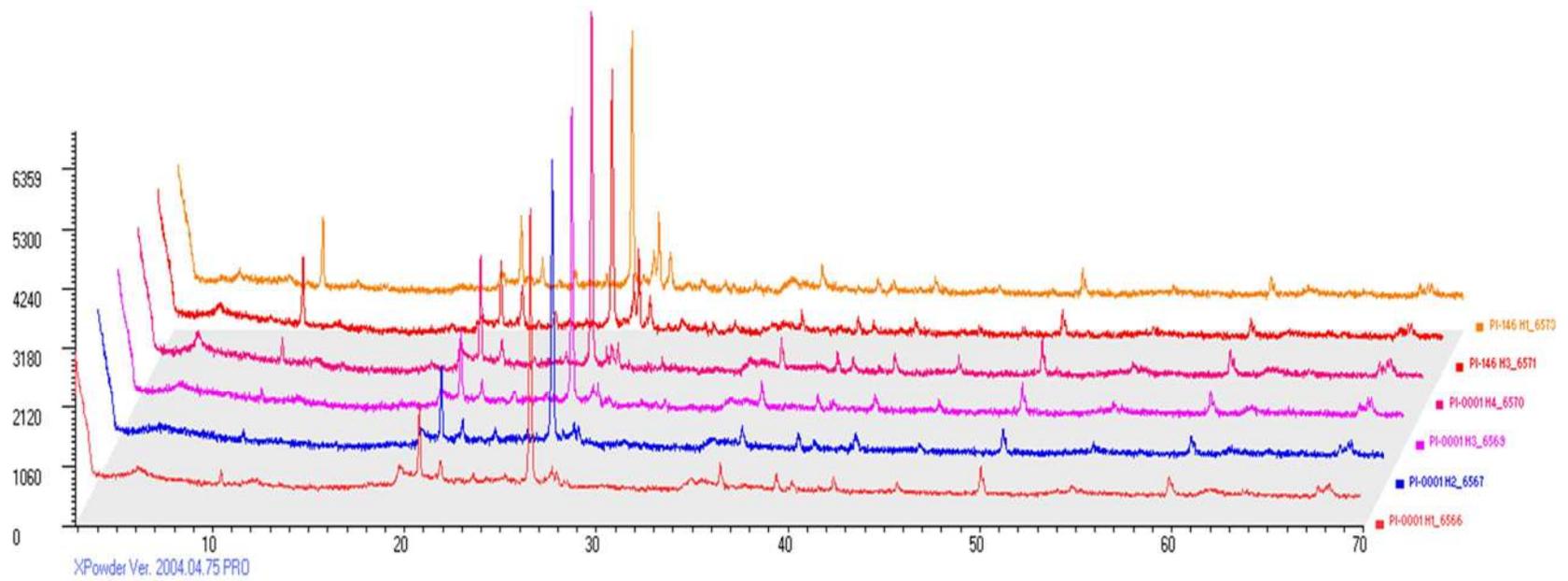


Figura 24. Comparativa de muestras de suelo repelente al agua e hidrofílicas.

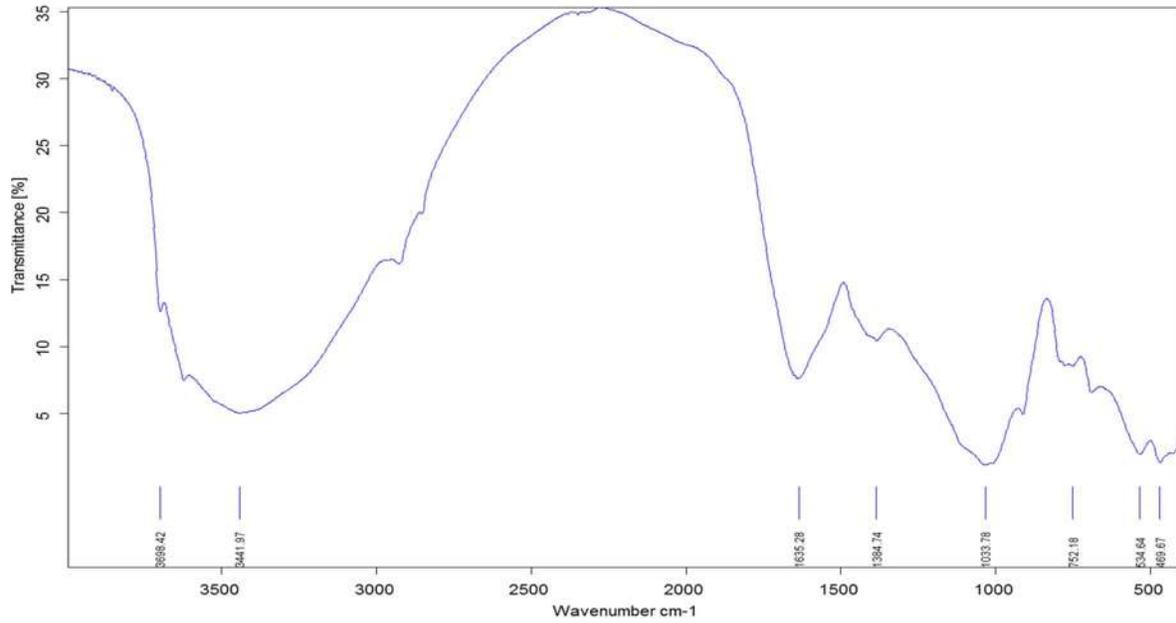
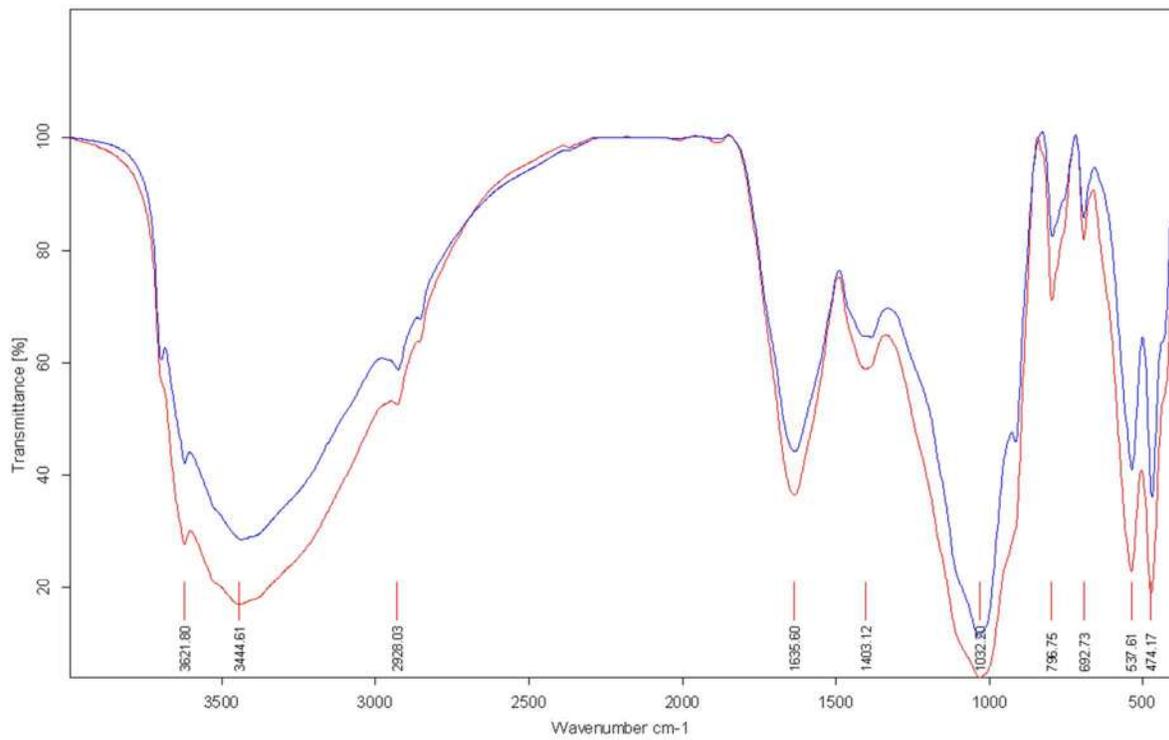


Figura 25. Espectro IR de transmitancia de montmorillonita.



Nombre de la muestra	PI 0001 HORIZONTE 1	Forma	Pastilla	Ensayo	%T.XPM	08/12/2014
Nombre de la muestra	PI 146 HORIZONTE 1	Forma	Pastilla	Ensayo	%T.XPM	08/12/2014

Figura 26. Comparativa de espectros IR de muestra de suelo repelente al agua e hidrofílica.

6.3 REPELENCIA AL AGUA EN SUELO

6.3.1 Intensidad de la repelencia al agua en suelo bajo diferentes especies de árboles

Los resultados del porcentaje de cada clase de EPT bajo el dosel (Figura 27) mostraron que las clases de EPT variaron entre 1, 2 y 7 (Tabla 7) en los puntos N y S debajo de oyamel y cedros. Por debajo de los pinos la intensidad extrema (EPT = 7) sólo se observó en puntos hacia el S (17%). En el caso de los encinos, las clases de EPT sólo variaron entre 1 y 3 (puntos-N) ó 1 y 4 (puntos-S).

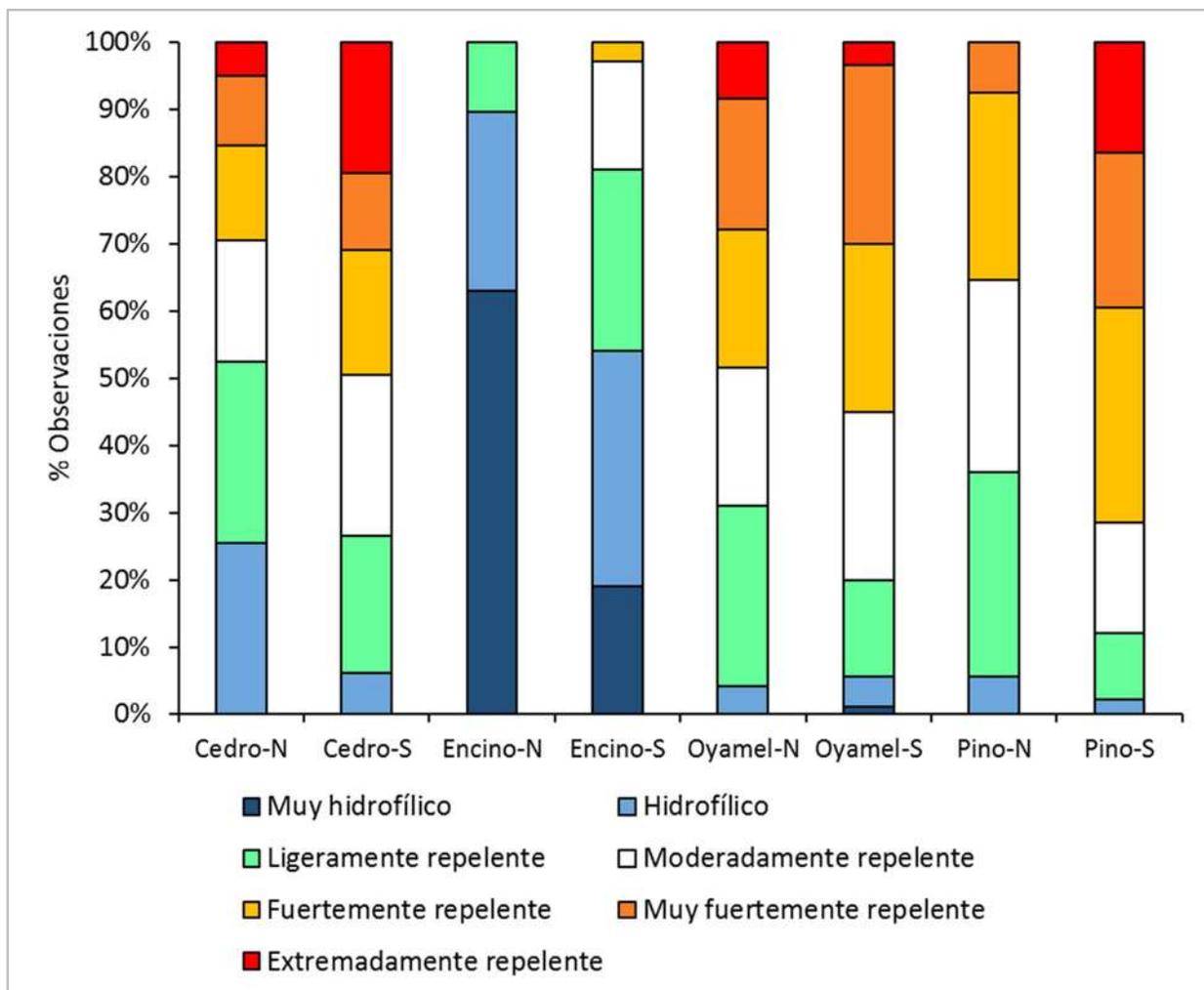


Figura 27. Intensidad de las clases de repelencia al agua del suelo (EPT) por especies de árboles y su orientación N-S.

Con respecto a la distancia partiendo del tronco, la variación de las clases de EPT indicó que en general, el EPT disminuyó conforme se alejaba del tronco (Tabla 10). Por ejemplo, en los puntos-N por debajo de los oyameles, el EPT se redujo de 7 (1 m del tronco) a 3 (10 m del tronco). Aunque el suelo debajo del dosel de oyameles, pinos y cedros fue usualmente muy fuerte o muy repelente al agua en un radio de 2 m al tronco, las clases de EPT debajo del dosel de encinos variaron entre 3 y 4 cerca del tronco y disminuyó rápidamente a 1 ó 2 con la distancia. En general, los valores medios oscilaron entre EPT 1 para puntos al N por debajo de los encinos y 5 en puntos al S por debajo de oyameles y pinos (Tabla 10).

La prueba de Mann-Whitney no mostró diferencias significativas entre las intensidades medias de la RA del suelo en los puntos N y S bajo la copa de los árboles estudiados, sin embargo, se observaron algunas diferencias entre ellos a distintas distancias de los troncos de los árboles (Tabla 10). En las especies de oyamel el EPT disminuyó una clase a 1 m a partir de la posición N a S y el aumento de una clase a 6 y 7 m. En el resto de los casos, el EPT aumentó en una clase por lo menos para cada distancia del tronco en los puntos-S. Los cambios de clase en suelos bajo encinos se ubicaban entre hidrofílico a muy hidrofílico (Tabla 10).

Tabla 10. Intensidad de RA en suelo (clases de EPT, media y rango entre paréntesis) para especies de árboles, orientación (N: Norte; S: Sur) y distancia desde el tronco.

Distancia (m)	Cedro-N	Cedro-S	Encino-N	Encino-S	Oyamel-N	Oyamel-S	Pino-N	Pino-S
1	6 (5, 7)	7 (5, 7)	3 (2, 3)	4 (2, 3)	7 (6, 7)	6 (5, 7)	5.5 (5, 6)	7 (5, 6)
2	6 (4, 7)	7 (5, 7)	2 (1, 3)	3 (1, 3)	6 (5, 7)	6 (5, 7)	5 (4, 6)	6 (4, 6)
3	5 (4, 6)	6 (4, 6)	2 (1, 3)	3 (1, 3)	6 (5, 6)	6 (5, 6)	4.5 (4, 5)	6 (4, 5)
4	4 (3, 5)	5 (4, 5)	1 (1, 2)	2 (1, 2)	5 (4, 6)	5 (4, 6)	4.5 (3, 5)	5 (3, 5)
5	4 (3, 4)	5 (3, 4)	1 (1, 2)	2 (1, 2)	5 (4, 5)	5 (4, 5)	5 (4, 5)	6 (5, 5)
6	3 (2, 4)	4 (3, 4)	1 (1, 2)	3 (1, 2)	4 (3, 5)	5 (4, 5)	4 (3, 5)	5 (3, 5)
7	2 (2, 3)	3 (2, 3)	1 (1, 1)	2 (1, 1)	3 (3, 4)	4 (4, 4)	3 (3, 4)	5 (3, 4)
8	2 (2, 3)	3.5 (2, 3)	1 (1, 1)	2 (1, 1)	4 (3, 4)	4 (3, 4)	3 (3, 4)	4 (3, 4)
9	2 (2, 3)	3 (2, 3)	1 (1, 1)	2 (1, 1)	3 (3, 3)	3 (3, 3)	3 (3, 3)	4 (3, 3)
10	2.5 (2, 3)	3.5 (2, 3)	1 (1, 1)	2 (1, 1)	3 (2, 3)	2 (1, 3)	2 (2, 3)	4 (2, 3)
Todos los casos	3 (2, 7)	4 (2, 7)	1 (1, 3)	2 (1, 5)	4 (2, 7)	5 (1, 7)	4 (2, 6)	5 (2, 7)
prueba Shapiro-Wilk	> 0.001	> 0.001	> 0.001	> 0.001	> 0.001	> 0.001	> 0.001	> 0.001
prueba Kruskal-Wallis	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001
prueba Mann-Whitney	> 0.05		> 0.05		> 0.05		> 0.05	

Clases de EPT: 1= Muy hidrofílico, 2= Hidrofílico, 3= Ligeramente repelente, 4=Moderadamente repelente, 5= Fuertemente repelente, 6= Muy fuertemente repelente y 7= Extremadamente repelente.

6.3.2 Persistencia de la repelencia al agua en suelo bajo diferentes especies de árboles

Los resultados de las clases de persistencia de WDPT variaron entre 1 (hidrofílico), 2 (ligeramente repelente) y 7 (extremadamente repelente) en todos los casos. La proporción de puntos con persistencia extrema de RA del suelo (WDPT = 7) varió entre 35% (pinos, puntos-N), 72% (oyameles, puntos-S) y encinos con sólo 3% (N) y 6% (S), bajo este dosel los puntos eran dominados por suelo hidrofílico a ligeramente repelente (69%, N y el 54%, S) (Figura 28).

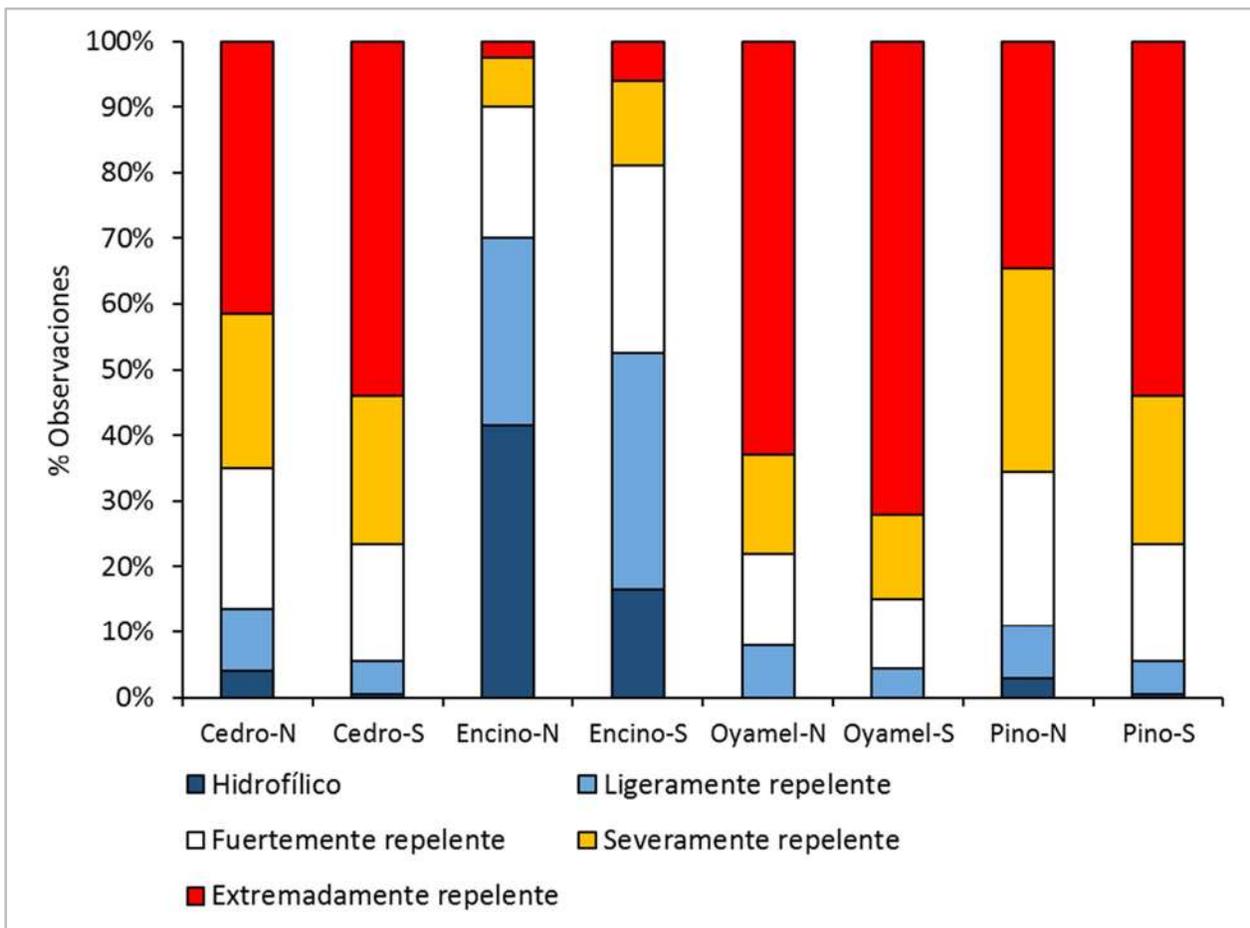


Figura 28. Persistencia de las clases de repelencia al agua del suelo (WDPT) por especies de árboles y su orientación N-S.

La variación de la persistencia de la repelencia al agua del suelo (clases de WDPT) disminuyó significativamente con el aumento de la distancia del tronco de los árboles, varió (Tabla 11) entre las clases 4 y 7 (oyamel), 3 y 7 (pinos y cedros) y, 1 y 3 (encinos). En general, la influencia de la posición relativa (puntos N y S) no fue importante cuando se consideraron todos los casos. Sin embargo, se observaron incrementos de una clase entre posiciones equivalentes N y S en tres

puntos por debajo de las copas de los oyameles, 3 puntos por debajo de los pinos y 5 puntos por debajo de cedros y encinos. En este último caso, esto sólo significó que cambia de hidrofílico a ligeramente repelente al agua. Los puntos del suelo hidrofílico, se observaron sólo en algunos casos por debajo de los pinos y los cedros (entre 7 y 10 m desde el tronco) no se observaron por debajo del dosel de los oyameles. Por otro lado, la mayoría de los puntos de suelo por debajo de cedros fueron clasificados como hidrofílicos (WDPT = 1; 41.5 y 16.5%, puntos N y S, respectivamente) o ligeramente repelente al agua (WDPT = 2; 28.5 y 36.0%, n- y S-puntos, respectivamente).

Tabla 11. Persistencia de la RA en suelo (clases de WDPT, media y rango entre paréntesis) para especies de árboles, orientaciones (N: Norte; S: Sur) y distancia desde el tronco.

Distancia	Cedro-N	Cedro-S	Encino-N	Encino-S	Oyamel-N	Oyamel-S	Pino-N	Pino-S
m								
1	7 (4, 7)	7 (4, 7)	2 (1, 5)	3 (2, 5)	7 (5, 7)	7 (5, 7)	6 (4, 7)	6 (4, 7)
2	6 (4, 7)	6.5 (5, 7)	3 (1, 5)	3 (2, 5)	7 (5, 7)	7 (5, 7)	5 (3, 7)	5.5 (3, 7)
3	6 (4, 7)	7 (4, 7)	2.5 (1, 5)	3 (1, 5)	6 (4, 7)	6.5 (4, 7)	5 (3, 6)	5 (3, 6)
4	5 (3, 7)	5 (3, 7)	2 (1, 4)	3 (1, 4)	6 (4, 7)	6.5 (5, 7)	4 (3, 6)	5 (3, 6)
5	4 (2, 6)	5 (2, 6)	2 (1, 4)	3 (1, 4)	5.5 (3, 7)	6 (4, 7)	4 (3, 6)	5 (3, 6)
6	3.5 (2, 5)	4 (3, 5)	2 (1, 4)	2 (1, 4)	5 (2, 7)	5.5 (2, 7)	4 (2, 6)	4 (3, 6)
7	3.5 (1, 5)	4 (1, 5)	2 (1, 3)	2 (1, 3)	4 (2, 5)	5 (2, 5)	4 (2, 5)	4.5 (2, 5)
8	3 (1, 5)	4 (2, 5)	1 (1, 2)	2 (1, 2)	4 (2, 6)	5 (3, 6)	4 (2, 5)	4 (2, 5)
9	3 (1, 5)	4 (1, 5)	1 (1, 2)	2 (1, 2)	3 (2, 5)	3 (2, 5)	3 (2, 4)	3 (2, 4)
10	3 (1, 5)	4 (2, 5)	1 (1, 2)	2 (1, 2)	4 (2, 5)	4 (2, 5)	2 (1, 4)	3 (1, 4)
Todos los casos	4 (1, 7)	5 (1, 7)	2 (1, 5)	2 (1, 6)	5 (2, 7)	6 (2, 7)	4 (1, 7)	5 (1, 7)
prueba Shapiro-Wilk	> 0.001	> 0.001	> 0.001	> 0.001	> 0.001	> 0.001	> 0.001	> 0.001
prueba Kruskal-Wallis	0	0	0	< 0.001	0	0	0	< 0.001
prueba Mann-Whitney	> 0.05		> 0.05		> 0.05		> 0.05	

Clases de WDPT: 1= Hidrofílico, 2= Ligeramente repelente, 3= Fuertemente repelente, 4= Severamente repelente, 5,6 y 7= Extremadamente repelente

CAPITULO 7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD Y LA PERSISTENCIA DE LA RA EN SUELO

Los coeficientes de correlación de Spearman entre EPT y WDPT fue significativa ($p < 0.0001$); y positiva para los suelos bajo oyamel ($r_s = 0.7240$), pinos ($r_s = 0.6832$) y cedro ($r_s = 0.7246$). En contraste, la correlación para suelos bajo encino fue débil ($r_s = 0.4607$). El EPT de los suelos bajo pino y oyamel no mostró diferencias significativas ($p = 0.9719$). En contraste, las clases del EPT bajo cedro fueron significativamente menores que en oyameles y pinos. En general, los suelos debajo de encinos mostraron valores más bajos del EPT que los suelos por debajo del resto de las especies. Respecto a WDPT, se encontraron diferencias significativas entre los valores de la media de WDPT en la mayoría de los casos. Los suelos debajo de oyamel mostraron valores de WDPT más altos que los suelos debajo de pinos y cedros (Figura 28). Como en el caso anterior, los suelos con encinos mostraron valores WDPT más bajos que los suelos del resto de las especies (Figura 28).

7.2 RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE LA RA EN SUELO Y LA CUBIERTA VEGETAL

En promedio, la cubierta vegetal ocupada por los árboles varió de 75.6% en los bosques de oyamel-pino-encino y 92.5% en el bosque de oyamel. Por otra parte, la cubierta compuesta por arbustos fue mayor en los bosques de oyamel-pino-encino (83.8%) y ligeramente inferior bajo los bosques de oyamel (78.8%) y pino-encino (78.1%). La cubierta vegetal herbácea varió en un rango estrecho entre 46.9 % en bosques de oyamel y oyamel-pino-encino y 50.6% en bosque de pino-encino (Tabla 12). La proporción de suelo desnudo fue menor de 2.5% en todos los casos (sólo se observaron 11 puntos de suelo desnudo para 480 observaciones). La cubierta vegetal conformada por los árboles fue calculada con la suma de todos los puntos debajo del dosel de uno o más árboles (oyameles, pino, cedros y/o encinos).

Tabla 12. Porcentaje de cobertura de: oyamel, pino, cedro, encino, total de árboles, arbustos y herbáceas para bosques de oyamel, oyamel-pino-encino y pino-encino en el área de estudio.

Tipo de vegetación	Oyamel	Pino	Cedro	Encino	Total de árboles	Herbáceas	Suelo Desnudo
Oyamel	87.50	0	31.875	0	92.5	46.875	1.875
Oyamel-Pino-Encino	51.875	34.375	0	21.25	75.625	46.875	2.5
Pino-Encino	0	64.375	0	42.5	80.625	50.625	2.5

Con respecto a las observaciones en campo, se definieron las siguientes asociaciones vegetales: árboles, arbustos y herbáceas (A+M+H), árboles y arbustos (A+M), árboles (A), arbustos y herbáceas (M+H), arbustos (M) y suelo desnudo (S).

Excluyendo los puntos en suelo desnudo, la prueba de Mann-Whitney mostró diferencias significativas ($p = 0,0000$) entre los valores de la mediana del EPT de puntos del suelo por debajo de la copa de los árboles (EPT 5 = fuertemente repelente) que bajo arbustos o arbustos y herbáceas (EPT 2 = humectable). En general, la clase del EPT fue mayor en puntos cubiertos de árboles de los bosques de oyamel y el oyamel-pino-encino que de bosque de pino-encino (Figura 29). En el bosque de oyamel, la clase de EPT varió de 3 a 7 en los suelos bajo cobertura de árboles (A, A + M y A + M + H). En los bosques de oyamel-pino-encino, los datos registrados fueron similares, aunque 12% de los puntos A + M + H fueron clasificados como muy hidrofílicos o hidrofílicos. Para ambos tipos de bosque, el EPT en los puntos con cubierta de arbustos sin influencia de los árboles (M y M + H) osciló entre 1 o 2 a 3 RA. No se observó repelencia extrema en puntos de bosque de pino-encino, las clases de EPT se encontraron entre 1 o 2 a 6 RA (A, A + M y A + M + H) y 1 o 2 a 3 RA (M y M + H). En todos los casos, los puntos de suelo desnudo se clasificaron como muy hidrofílico o hidrofílico.

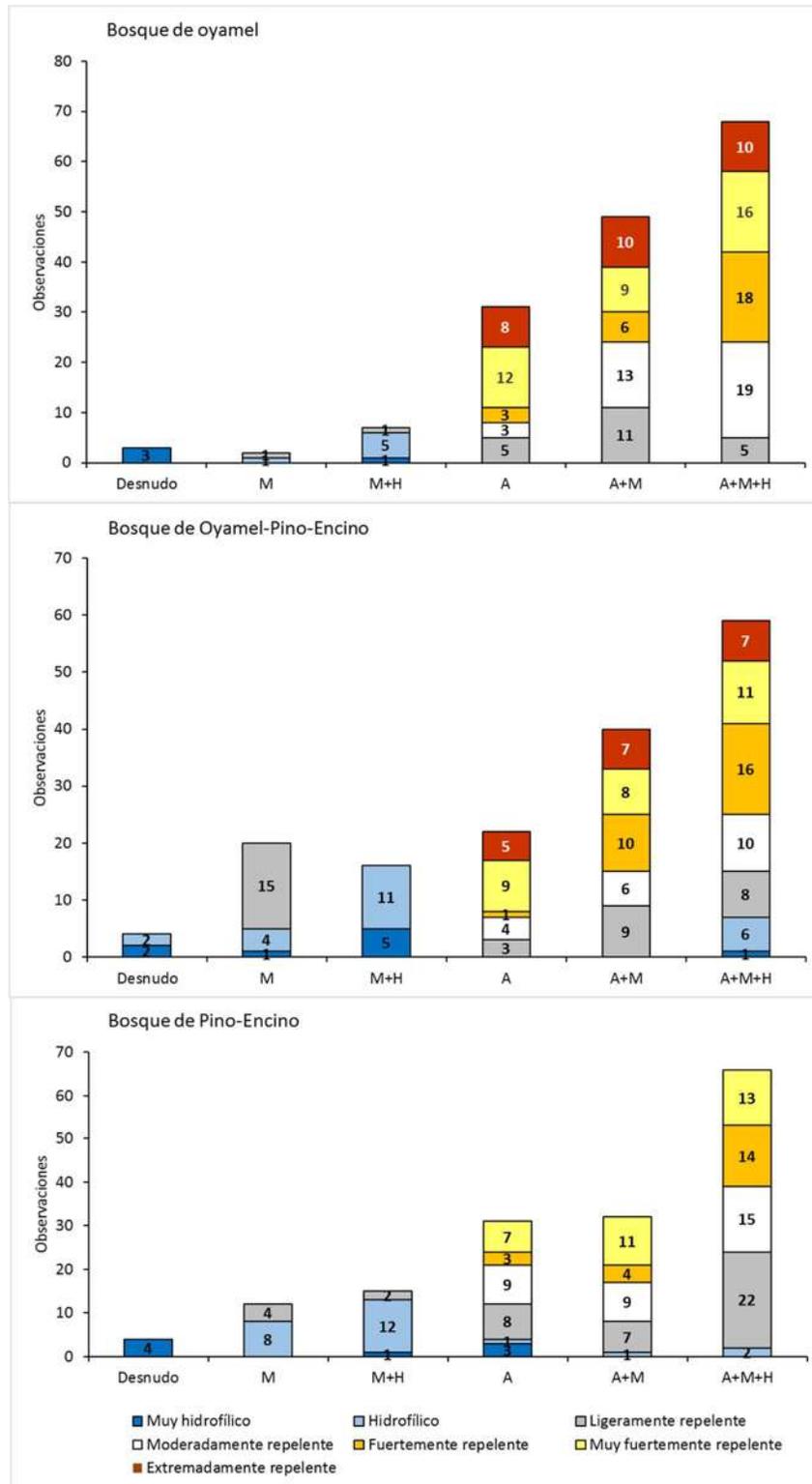
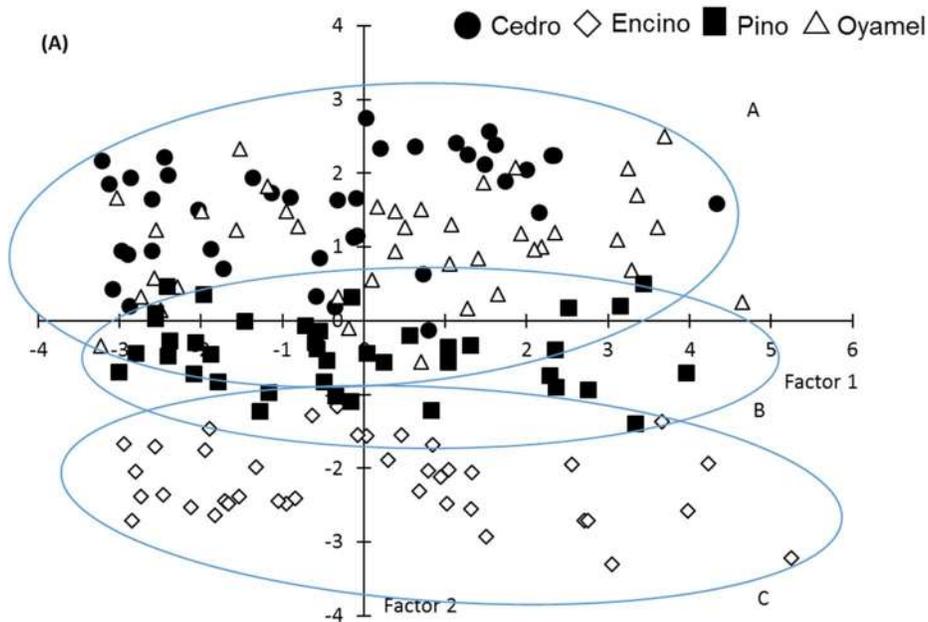


Figura 29. Número de observaciones de EPT de suelos RA de oyamel-pino-encino y bosque de pino-encino para diferentes coberturas, suelo desnudo, arbustos (M), arbustos y herbáceas (M+H), árboles (A), árboles y arbustos (A+M) y árboles, arbustos y herbáceas (A+M+H).

7.3 RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE LA RA EN SUELO Y LAS PROPIEDADES DEL SUELO

Las clases de EPT no mostraron correlaciones significativas con la mayoría de las variables del suelo, con excepción de contenido orgánico C (-0.5701, $p < 0.00001$) y CIC (-0.2977, $p < 0.05$). Estos coeficientes fueron significativos y negativos, pero en general, indicaron correlaciones débiles. El análisis de componentes principales (PCA) divide las muestras de suelo en tres grupos (Figura 30). El Grupo A incluye puntos del suelo por debajo del dosel de los oyameles y cedros, sin ninguna separación clara entre ellos. El Grupo B incluye puntos del suelo por debajo de los pinos y el grupo C puntos del suelo debajo del dosel de encinos, con el grupo B en una posición intermedia entre los grupos A y C. En cuanto a la ordenación de las variables del suelo, el Factor 1 muestra una alta correlación con la capacidad de intercambio catiónico y con los cationes intercambiables, mientras que el Factor 2 corresponde a la acidez del suelo (pH), la intensidad de la RA del suelo y el contenido de C orgánico.



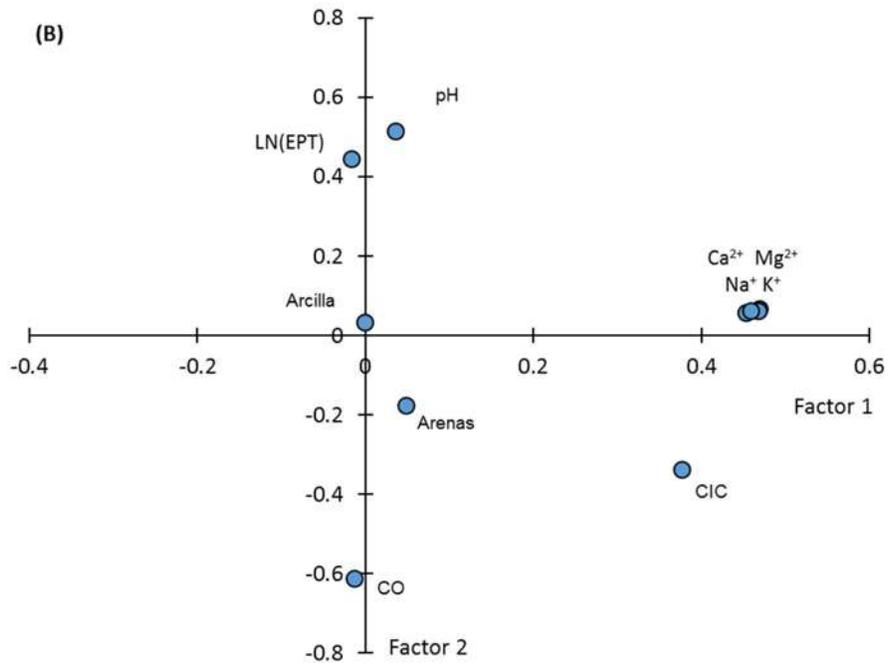


Figura 30. Análisis de componentes principales de la intensidad de suelos RA (LN(EPT) y variables físicas y químicas: pH, carbono orgánico (CO), cationes intercambiables (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺), capacidad de intercambio catiónico (CIC) y contenido de arenas y arcillas para suelos bajo cedros, oyamel, encinos y pinos. (A) Casos; (B) Variables.

CAPÍTULO 8 DISCUSIÓN

Diferentes severidades de intensidad y persistencia de RA se observaron en los suelos bajo diferentes tipos de bosques y especies de árboles en la zona de estudio. A pesar de la fuerte relación entre propiedades del suelo y la RA que se han reportado en muchas áreas (Mataix-Solera *et al.*, 2008; Mataix-Solera *et al.*, 2013.; Mataix-Solera *et al.*, 2014.; Zavala *et al.*, 2009a.; Zavala *et al.*, 2014), no se han observado correlaciones relevantes en esta investigación a esta escala de trabajo. Por otra parte, la distribución espacial de la RA en suelo en el área de estudio está fuertemente condicionada por la vegetación, de acuerdo con los resultados reportados por otros autores, que observaron que, en las zonas con propiedades homogéneas de suelo, la vegetación es el principal factor que controla la RA en suelo (Bodí *et al.*, 2011; Bodí *et al.*, 2012.; Buczko *et al.*, 2005; Cerdà y Doerr, 2007; Cerdá *et al.*, 1998; Doerr *et al.*, 1996; Granged *et al.*, 2011; Jordán *et al.*, 2008; Jordán *et al.*, 2009; Zavala *et al.*, 2014).

Los suelos debajo de bosques de oyamel y oyamel-pino-encino fueron extremadamente repelentes al agua bajo el dosel de árboles (parcelas de A, A + M y A + M + H). Aunque los valores extremos no se observaron en cobertura de árboles, los suelos bajo bosque de pino-encino, A, A + M y A + M + H mostraron la mayor intensidad de RA del suelo (muy fuertemente repelente). En general, la proporción de puntos de suelos repelentes al agua incrementó en la siguiente secuencia: suelo desnudo > arbustos y plantas herbáceas (M + H) > arbustos (M) > árboles (A, A + M y A + M + H). Esta observación está de acuerdo con la mayor parte de las investigaciones previas, las cuales han reportado la limitada aportación de plantas herbáceas a la RA del suelo (Schnabel *et al.*, 2013; Zavala *et al.*, 2009a; Zavala *et al.*, 2014).

En general, la débil correlación entre el contenido de CO y RA sugiere que no hay relación directa entre las dos propiedades en el área de estudio, y cada tipo de especies de árboles, vegetación y microbiota asociada contribuyen al desarrollo de diferentes severidades de la hidrofobicidad. La mayor severidad de RA del suelo ha sido observada bajo las coníferas (oyamel, cedros y pinos), mientras que se encontraron suelos mucho más humectables debajo de encinos. Estos resultados están de acuerdo con los hallazgos de otros autores, que han informado que las coníferas son mucho más propensas que los encinos para inducir la RA del suelo, debido a la composición química de sus tejidos, que incluyen resinas, ceras y otras sustancias capaces de causar hidrofobicidad en los suelos (Conde *et al.*, 1998; Ito *et al.*, 2002, Lozano *et al.*, 2013; Mao *et al.*, 2015; Mataix-Solera y Doerr, 2004). Diferentes autores han reportado RA del suelo en áreas de encino del Mediterráneo (Cerdá *et al.*, 1998; Jordán *et al.*, 2008; Mataix-Solera *et al.*, 2007;

Zavala *et al.*, 2009a.; Zavala *et al.*, 2014). Aunque nuestros resultados muestran que la severidad de RA del suelo por debajo de los encinos es menor que en los suelos por debajo de coníferas, como se demostró en Zavala *et al.* (2009a) y Zavala *et al.* (2014), la ventaja de las coníferas en comparación con los encinos no siempre está clara. Jiménez-Morillo *et al.* (2014) estudiaron la RA del suelo en diferentes tipos de vegetación en un área en el suroeste de España y encontraron una RA más severa en suelos debajo de los encinos que por debajo de los pinos u otras especies. Ellos atribuyeron esto a mayores contenidos de materia orgánica y un alto grado de evolución de la materia orgánica, principalmente en las películas de revestimiento orgánico de las partículas más finas. Los incendios forestales recurrentes en el área pueden contribuir también para el desarrollo de las condiciones del suelo hidrofóbicas (Garduño, 2011; Ramírez, 2005; Jordán *et al.*, 2011).

La cubierta de los árboles condiciono la variación espacial de la RA del suelo. La RA del suelo disminuyó con el aumento de la distancia de los árboles individuales. Aunque los resultados entre los oyameles, cedros y pinos eran diferentes en la intensidad (EPT) y la persistencia (WDPT) de RA suelo, ambas propiedades disminuyeron con la distancia del tronco y mostraron correlaciones fuertes. En el caso de los encinos, la severidad de la RA del suelo fue limitada, pero también disminuyó con la distancia (de acuerdo con los valores de media, la intensidad de la RA disminuyó de muy hidrofílico / hidrofílico a ligeramente / moderadamente repelente al agua y la persistencia disminuyó de hidrofílico / ligeramente repelente al agua a ligeramente / fuertemente repelente al agua). La disposición dispersa de los árboles contribuye a un patrón irregular de RA del suelo, lo que puede contribuir para formar un patrón de generación de flujo superficial / infiltración. Muy pocos autores han publicado datos sobre la distribución espacial de la RA del suelo con respecto a la distancia relativa de los troncos de árbol o los límites del dosel. En los suelos quemados bajo juníferos y pinos, Madsen *et al.* (2010) encontraron una correlación entre la distribución espacial de la RA del suelo y el límite del dosel. Observaron que alrededor del 66% de la región del dosel era repelente al agua, y la persistencia de la RA del suelo disminuyó con la distancia desde el límite del dosel, con condiciones hidrofílicas en las zonas inter-dosel (Madsen *et al.*, 2008; Madsen *et al.*, 2010). Los resultados obtenidos para el área de estudio mostraron una tendencia decreciente similar con la distancia, pero en muchos casos, se observaron condiciones hidrofóbicas a distancias relativamente lejanas de la copa de los árboles. En puntos del suelo debajo de las coníferas, se observaron condiciones hidrofílicas (WDPT < 5 s) en algunos casos, hasta 10 m de distancia del tronco en transectos al sur. A diferencia de suelos hidrofílicos o ligeramente repelentes al agua entre 2 y 4 m del tronco del árbol 347 (transectos norte y sur, respectivamente).

Keizer *et al.* (2005) estudiaron la variación de la RA del suelo con la distancia de los árboles de eucalipto, y encontraron que la distancia no es suficiente para explicar los patrones de hidrofobicidad. Concluyeron que la variabilidad local en la capa superior del suelo, la RA puede ser causada por diferencias en las características de los árboles y en las propiedades del suelo relacionadas con posibles fuentes de compuestos hidrófobos. En el presente estudio, los resultados mostraron diferencias significativas entre la intensidad de la RA del suelo a partir de puntos al norte y al sur en todas las distancias desde el tronco debajo de las copas de los pinos y encinos, la mayoría de los puntos por debajo de los cedros (2 a 10 m) y algunos puntos por debajo de los oyameles (1, 6, 7 y 9 m). En la mayoría de los casos, estas diferencias fueron de una clase de EPT. Estas diferencias pueden explicarse por diferentes condiciones microclimáticas del suelo. Aunque la RA del suelo se sabe que varía de forma irregular durante el secado (González-Peñaloza *et al.*, 2013), esta generalmente se destruye por encima de cierto contenido de humedad crítico del suelo (Dekker *et al.*, 2001; Doerr y Thomas, 2000; Zavala *et al.*, 2010). La cubierta vegetal y el sombreado pueden afectar el microclima de los suelos tanto en las regiones del dosel e inter-dosel a través de la interceptación de la luz solar, efecto que es mucho más marcado en el caso de las plantas leñosas (Lebron *et al.*, 2007; Madsen *et al.*, 2008). Los suelos de transectos al norte, preferentemente sombreados por los árboles en la cara sur de la pendiente en la zona de estudio, se espera que a través de los años muestren contenidos de humedad relativamente más altos y, en consecuencia, se espera una severidad de la RA en suelos relativamente menor.

Como la RA del suelo es inducida por los compuestos orgánicos liberados por los residuos de las plantas y la microbiota del suelo (Doerr *et al.*, 2000), se puede sugerir que se induce la hidrofobicidad no sólo por debajo de las copas de los árboles, sino también en áreas vecinas inter-dosel donde la hojarasca y las partículas del suelo hidrofóbico son redistribuidas por el flujo del agua o del viento. Se concluye que, en la zona, la RA del suelo se distribuye siguiendo un patrón espacial heterogéneo condicionado por las áreas bajo el dosel e inter-dosel. En especial en suelos bajo los encinos, las zonas inter-dosel son hidrofílicas o muestran una ligera RA.

CAPÍTULO 9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los suelos en la microcuenca del río San Pedro (Angangueo, Mich., México) presentaron hidrofobicidad. La RA se ubicó en los primeros 5 cm del suelo, a mayor profundidad está no se detectó. Las propiedades del suelo, físicas, químicas y mineralógicas no mostraron una relación con la repelencia. La RA está fuertemente condicionada por el tipo de vegetación. En general, los suelos por debajo de coníferas mostraron la RA más fuerte. La más alta intensidad y persistencia de RA del suelo fue observada bajo oyamel- pinos y oyameles, respectivamente. En ambos casos, los suelos por debajo de encinos mostraron los valores más débiles.

La persistencia e intensidad de la RA del suelo dentro de un radio de 1.0 m del tronco en especies de coníferas resultó muy fuerte a extrema y disminuyó de forma progresiva con el aumento de la distancia, en áreas inter-dosel hidrofílicas a 10 m de distancia. A pesar de que los suelos bajo encinos mostraron un amplio rango de valores, la RA del suelo fue generalmente más débiles, con RA subcrítica o con condiciones hidrofílicas a cortas distancias.

La posición de los árboles en el área de estudio contribuye a un patrón irregular de la RA del suelo, lo cual, a su vez, puede contribuir a una distribución irregular del flujo superficial y la infiltración. La irregularidad de la RA en la superficie del suelo puede tener una influencia significativa en los procesos hidrológicos y geomorfológicos de los suelos.

Para todos los tipos de bosque estudiados (oyamel, pino, encino y pino-encino forestales), la intensidad de los suelos repelentes al agua aumentó de acuerdo a la secuencia de suelo desnudo (condiciones muy hidrofílicas a hidrofílicas), arbustos (muy hidrofílicos a una ligera repelencia al agua) y árboles (muy hidrofílicos a extrema repelencia). Aunque las áreas cubiertas de árboles incluyen también arbustos y vegetación herbácea, los resultados mostraron que los residuos de vegetación arbórea son la principal fuente de sustancias hidrofóbicas al suelo.

Este estudio por sí solo no puede explicar los efectos de la RA del suelo sobre el flujo superficial y su conexión con patrones de sedimentación en el área de estudio. Nuevos estudios deberían apuntar a la cartografía de la influencia de la RA del suelo en patrones de conectividad, identificación, generación de flujos superficiales y áreas de infiltración, fuentes de sedimentos y depresión a través de la pendiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Aguilar, O. G. F. 2013. Variación de la repelencia al agua de los suelos en función de la profundidad, del contenido de humedad, de la posición topográfica y de la cobertura vegetal en la Cuenca del río Los Gavilanes, Veracruz. Tesis de Licenciatura. Facultad de Economía. Licenciatura en Geografía. Universidad Veracruzana. Xalapa, Veracruz.
- Atlas de Riesgos Naturales. Periódico Oficial del Estado de Michoacán. Tomo CLX. Número 67. Viernes 31 de Octubre de 2014.
- Blanco-Canqui, H., Lal, R., Shipitalo, M.J. 2007. Aggregate disintegration and wettability for long-term management systems in the northern Appalachians. *Soil Science Society of America Journal* 71: 759-765.
- Bisdorn, E.B.A., Dekker, L.W., Schoute, J.F.T. 1993. Water repellency of sieve fractions from sandy soils and relationships with organic material on soil structure, *Geoderma*, 56: 105-118.
- Bodi, M., Mataix-Solera, J., Doerr, S., Cerdà, A. 2011. The wettability of ash from burned vegetation and its relationship to Mediterranean plant species type, burn severity and total organic carbon content. *Geoderma* 160: 599-607.
- Bodi, M., Doerr, S.H., Cerdà, A., Mataix-Solera, J. 2012. Hydrological effects of a layer of vegetation ash on underlying wettable and water repellent soil. *Geoderma* 191: 14-23.
- Buczko, U., Bens, O., Huttl, R.F. 2005. Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*). *Geoderma* 126: 317-336.
- Cannon, S.H., E.R. Bigio, and E. Mine. 2001. A Process for Fire-related Debris Flow Initiation, Cerro Grande Fire, New Mexico. *Hydrological Processes* 15: 3011- 3023.
- Carta geológico-minera. Angangueo E14A26. Estado de México y Michoacán. Servicio Geológico Mexicano. Secretaría de Economía.
- Carter, D.J., Hetherington, R.E., Morrow, G. y Nicholson. D. 1994. Trends in water repellency measurements from soils sampled at different soil moisture and land use. Proceedings of the "nd National Water Repellency Workshop. 1-5 August 1994. Perth, WA.
- Cerdà, A. 1998. Effect of climate on surface flow along a climatological gradient in Israel: a field rainfall simulation approach. *Journal of Arid Environments* 38: 145-159.
- Cerdà, A., Doerr SH. 2007. Soil wettability, runoff and erodibility of major dry-Mediterranean land use types on calcareous soils. *Hydrological Processes* 21: 2325-2336.

- Cerdá, A. y Jordán, A. 2010. Actualización de métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales. Càtedra de Divulgació de la Ciència. Universitat de València. FUEGORED 2010.
- Cisar, J.L., Williams, K.E., Vivas, H.E., Haydu JJ 2000. The occurrence and alleviation by surfactants of soil-water repellency on sand-based turfgrass systems. *J. Hydrol.* 231:352-358.
- CNA. Comisión Nacional del Agua. 1998. Regiones hidrológicas administrativas. Escala 1 000 000. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1988. Subcuencas hidrológicas. Extraído del boletín hidrológico. 1970. Subcuencas hidrológicas en Mapas de regiones hidrológicas. Escala más común 1:1000000. Secretaría de Recursos Hidráulicos, Jefatura de Irrigación y control de Ríos. Dirección de Hidrología. México.
- CONAFOR. 2013. Bosque, cambio climático y REDD+ en México. Guía Básica.
- Conde, E., Cadahia, E., Garcia-Vallejo, M.C., Fernandez de Simon, B. 1998. Polyphenolic composition of *Quercus suber* cork from different Spanish provenances. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 46: 3166-3171.
- Corona-Chávez, P., 1999, El basamento litológico y tectónico de Michoacán, *in* La carta geológica del Estado de Michoacán, escala 1:250 000: México. Consejo de Recursos Minerales. 4 hojas con notas explicativas.10-26 pp.
- Cortés, V. M.O. 2013. Propiedades edáficas y su relación con la estabilidad de la estructura de los suelos en Angangueo. Tesis de Maestría. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas Departamento de Geología Y Mineralogía. U.M.S.N.H. Morelia, Mich.
- Cuevas, B. J. 2006. Efecto de la materia orgánica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. *Revista de la Ciencia del suelo y Nutrición Vegetal.* Vol.6. No.2. 13-27p. ISSN 0718-2791.
- DeBano, L.F. 1981. Water repellent soils: a state-of-the-art. General Technical Report, PSW-46. United States Department of Agriculture. Forest Service, Berkeley, Ca.
- DeBano, L.F. 1991. The effect of fire on soil. En: A.E. Harvey y L.F. Neuenschwander (Eds.). Management and productivity of western-montane forest soils. General Technical Report INT-280. Intermountain Forest and Range Experimental Station, United States Department of Agriculture, Forest Service. Ogden, UT.
- DeBano, L.F. 2000. Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of hydrology.* 231-232: 4-32.
- Dekker, L.W., Jungerius, P.H. 1990. Water repellency in the dunes with special reference to the Netherlands

- Dekker, L. W., Ritsema, C.J., 1996. Variation in water content and wetting patterns in Dutch water repellent peaty clay and clayey peat soils. *Catena* 28, 89-105.
- Dekker, L. W., Ritsema, C.J., Oostindie, K., Boersma, O.H., 1998. Effect of drying temperatura on the severity of soil wáter repellency. *Soil Science* 163, 780-796.
- Dekker LW, Doerr SH, Oostindie K, Ziogas AK, Ritsema CJ. 2001. Water repellency and critical soil water content in a dune sand. *Soil Science Society of America Journal* 65: 1667- 1674.
- Demant, A. 1979. Vulcanología y petrografía del sector occidental del Eje Neovolcánico. *Revista del Instituto de Geología. UNAM. México.* 3:39-57 pp.
- Demant, A. 1982. Interpretación Geodinámica del Vulcanismo del Eje Neovolcánico Transmexicano. *Revista del Instituto de Geología. UNAM, México.* 5:217-222 p.
- Diehl, D. 2013. Soil water repellency: dynamics of heterogeneous surfaces. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects.* 432: 8-18
- Doerr, S.H. 1998. On standardizing the 'water drop penetration time' and the 'molarity of an ethanol droplet' techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 663-668
- Doerr, S.H., Shakesby, R.A. y Walsh, R.P.D. 2000. Soil water repellency, its characteristics, causes and hydro-geomorphological consequences. *Earth Sci. Rev.* 51: 33-65.
- Doerr, S. H., and A. D. Thomas. 2000. The role of soil moisture in controlling water repellency: new evidence from forest soils in Portugal. *Journal of Hydrology*, v. 231-232:134-147.
- Doerr, S.H., Dekker, L.W., Shakesby, R.A., Ritsema, C.J. y Bryant, R. 2002. Water repellency of soils: the influence of ambient relative humidity. *Soil Science Society of America Journal.* 66: 401-405.
- Franco, C.M.M., Clarke, P.J., Tate, M.E., Oades J.M. 2000. Hydrophobic properties and chemical characterisation of natural water repellent materials in Australian sands, *Journal of Hydrology*, 231-232: 47-58.
- Garduño, B. N. 2011. Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca en el Estado de Mexico. Diagnostico Fitosanitario Forestal. Gobierno del Edo. de Mexico. Toluca.
- González, P. J. A. González, V, R., M de la Rosa, J., González, A. F. 2011. El fuego y la materia orgánica del suelo. Vol 2, 3. Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla (CISC).
- González-Penalzoza, F.A., Zavala, L.M., Jordán, A., Bellinfante, N., Bárcenas-Moreno, G., Mataix-Solera, J., Granged, A.J.P., Granja-Martins, F.M., Neto-Paixao, H.M. 2013. Water repellency as conditioned by particle size and drying in hydrophobized sand. *Geoderma* 209-210: 31- 40.

- Granged, A. J.P., Jordán, A, Zavala, L. M., Bárcenas, G. 2011. Fire-induced changes in soil water repellency increased fingered flow and runoff rates following the 2004 Huelva wildfire. *Hydrological Processes* 25: 1614-1629.
- Hallett, P.D., Gordon, D.C., Bengough, A.G. 2003. Plant influence on rhizosphere hydraulic properties: direct measurements using a miniaturised infiltrometer. *New Phyt.* 157: 597-603.
- Harper, R., Mckissock, I., Gilkes, R., Carter, D., Blackwell, P. 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil management and landuse on water repellency. *Journal of Hydrology.* 231-232: 371-383.
- INE.1996. Reserva Especial de la Biosfera Mariposa Monarca. Revisado el 15 de diciembre del 2014 en: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/2/monarca.html>.
- INEGI. 2004. Guía para la interpretación cartográfica. Edafológica.
- INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Angangueo, Michoacán de Ocampo. Clave geoestadística 16005.
- INEGI. 2013. Conjunto de datos vectoriales de información topográfica E14A26 (Angangueo) escala 1:50 000 serie III.
- Ito H, Yamaguchi K, Kim T-H, Khennouf S, Gharzouli K, Yoshida T. 2002. Dimeric and trimeric hydrolyzable tannins from *Quercus coccifera* and *Quercus suber*. *Journal of Natural Products* 65: 339-345.
- IUSS-ISRIC-FAO (WRB). 2007. Base referencial Mundial del Recurso Suelo. Traducción al español de M. S. Pazos. Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos. No. 103. FAO, Roma.
- Jaramillo, D. F. J., Dekker, L. W., Ritsema, C.J. and Hendrickx, J. M. H. 2000. Occurrence of soil water repellency in arid and humid climates. *Journal of Hydrology.* 231-232: 105-11.
- Jaramillo, D. F. J. 2002. Introducción a la Ciencia del Suelo. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias. Medellín, Colombia. 613 pág.
- Jaramillo, D. F. J. 2006. Repelencia al agua en suelos: Una síntesis. *Revista de la Academia Colombiana en Ciencias Exactas, Física y Naturales.* 30 (115) 215-232. ISSN 0370-3908.
- Jiménez-Morillo, N.T., González-Pérez, J.A., Jordán, A, Zavala, L.M., de la Rosa, J.M., Jiménez-González, M.A., González-Vila, F.J. 2014. Organic matter fractions controlling soil water repellency in sandy soils from the Donana National Park (southwestern Spain), *Land Degradation and Development.*
- Jordán, A., Martínez-Zavala, L., Bellinfante, N. 2008. Heterogeneity in soil hydrological response from different land cover types in southern Spain. *Catena* 74: 137-143.

- Jordán, A., Martínez, Z.L., Nava, A.L., Alanis, N. 2009. Occurrence and hydrological of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic highlands. *Catena*. 79: 60-71.
- Jordán, A. Martínez, Z.L., González, A. F., Bárcenas-Moreno, G. y Mataix-Solera, J. 2010. Repelencia al agua en suelos afectados por incendios: métodos sencillos de determinación e interpretación. En: *Actualización en métodos y técnicas para el estudio de los suelos afectados por incendios forestales*. Càtedra de Divulgació de la Ciència. Universitat de València. FUEGORED.
- Jordán, A., Martínez, Z.L., Mataix-Solera, J., Nava, A.L., Alanis, N. 2011. Effect or fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils. *Catena*. 84: 136-147.
- Jordán, A. Martínez, Z.L. Mataix-Solera, J. Doerr, H. S. 2013. Soil water repellency: origin, assesment and geomorphological consequences. *Catena* 108:1-5.
- Keizer, J.J., Ferreira, A.J.D., Coelho, C.O.A., Doerr, S.H., Malvar, M.C., Domingues, C.S.P., Perez, I.M.B., Ruiz, C., Ferrari, K. 2005. The role of tree stem proximity in the spatial variability of soil water repellency in a eucalypt plantation in coastal Portugal. *Australian Journal of Soil Research* 43: 251-259.
- Lebron, I., Madsen, M.D., Chandler, D.G., Robinson, D.A., Wendroth, O., Belnap, J. 2007. Ecohydrological controls on soil moisture and hydraulic conductivity within a pinyon-juniper woodland. *Water Resources Research* 43: W08422.
- Lichner, L., Dlapa, P., Doerr, SH. y Mataix-Solera, J. 2006. Evaluation of different clay minerals as additives for soil water repellency alleviation. *Applied Clay Science*. 31: 238-248.
- Lozano, E., Jiménez-Pinilla, P., Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Bárcenas, G.M., González-Pérez, J.A., García-Orenes, F., Torres, M.P., Mataix-Beneyto, J. 2013. Biological and chemical factors controlling the patchy distribution of soil water repellency among plant species in a Mediterranean semiarid forest. *Geoderma* 207-208: 212-220.
- Madrigal Sánchez, X. 1994. Características ecológicas generales de la región forestal 530 oriental del estado de Michoacán, México. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo. Morelia.
- Madsen, M.D., Chandler, D.G., Belnap, J. 2008. Spatial gradients in ecohydrologic properties within a pinyon-juniper ecosystem. *Ecohydrology* 1, 349-360. DOI: 10.1002/eco.29.
- Madsen, M.D., Zvirzdin, D.L., Petersen, S.L., Hopkins, B.G., Roundy, B.A., Chandler, D.G. 2010. Soil water repellency within a burned pinon-juniper woodland: spatial distribution, severity, and ecohydrologic implications. *Soil Science Society of America Journal* 75: 1543-1553.
- Mallik, A.U. and Rahman, A.A., 1985. Soil water repellency in regularly burned Calluna heathlands: Comparison of three measuring techniques. *Journal of Environmental Management*. 20:207-218.

- Mao, J., Nierop, K.G.J., Rietkerk, M., Dekker, S.C. 2015. Predicting soil water repellency using hydrophobic organic compounds and their vegetation origin. *Soil* 1: 411-425. DOI: 10.5194/soil-1-411-2015.
- Ma'shum, M., Tate, M.E., Jones, G.P., Oades, J.M. 1988. Extraction and characterization of water repellent material from Australian soils, *European journal of soil science* 39 (1988) 99-110.
- Mataix-Solera, J., Doerr, S.H. 2004. Hydrophobicity and aggregate stability in calcareous topsoils from fire-affected pine forest in southeastern Spain. *Geoderma* 118: 77-88.
- Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Guerrero, C., Jordan, M.M., Dlapa, P., Tessler, N., Wittenberg, L. 2008. Can *terra rossa* become water repellent by burning? A laboratory approach. *Geoderma*. 147: 178-184.
- Mataix-Solera, J. Arcenegui, V., Zavala, Tessler, N. Zornosa, R. Wittenberg, L. Martínez, C. Caselles, P., Pérez-Bejarano, A., Malkinson, D. and Jordán, M.M. 2013. Soil properties as key factor controlling water repellency in fire-affected areas: Evidences from burned sites in Spain and Israel. *Catena* 108: 6-13.
- Mataix-Solera, J. Arcenegui, V., Zavala, L.M., Pérez-Bejarano, A., Jordán, A., Morúgan-Corugan, A., Bárcenas-Moreno, G., Jiménez-Pinilla, P., Lozano, E., Granged, A.J. P., Gil-Torres, J. 2014. Small variation in soil properties control fire-induced water repellency. *Spanish Journal of Soil Science*. Vol 4(1): 10pp. DOI: 10.3232.
- Neary, D.G., Klopatek, C.C., DeBano, L.F., Folliott, P.F. 1999. Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, 122: 51-71.
- Neary, D.G., Ryan, K.C., DeBano, L.F. 2005. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water. General Technical Report RMRS-GTR-42. Vol. 4. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 pp.
- Neris, J., M. Tejedor, J. Fuentes, and C. Jimenez (2013). Infiltration, runoff and soil loss in Andisols affected by forest fire (Canary Islands, Spain), *Hydrol. Processes*, 27, 2814–2824, doi:10.1002/hyp.9403.
- Pereira, P., Cerdà, A., Úbeda, X., Mataix-Solera, J., Martín, D., Jordán, A. y Burguet, M. 2013. Spatial models for monitoring the spatio-temporal evolution of ashes after fire – a case study of a burnt grassland in Lithuania.
- Piccolo, A., Mbagwu, J.S.C. ,1989. Effects of humic substances and surfactants on the stability of soils aggregates. *Soil Science*. 147: 47-54.
- PNUMA (Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente) 2000. Annual Review, Nairobi, Kenia.

- Ostrooumov, M. 2009. Mineralogía analítica avanzada. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. Departamento de Geología y Mineralogía. Editorial Morevallado. Morelia, Michoacán. 274 p. ISBN: 978-607-424-095-5.
- Ramírez, R. M. I. 2001. Los espacios forestales de la Sierra de Angangueo (Estados de Michoacán y Estado de México) México: Una visión geográfica. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- Ramírez, R. M. I., Jiménez, C. M., Martínez, P. A. 2005. Road structure and road density in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve, México. *Investigaciones Geográficas* 57: 68-80.
- Reeder, C.J., Jurgensen, M.F. 1979. Fire-induced water repellency in forest soils of upper Michigan. *Canadian Journal Forest Research*, 9(3): 369-373
- Rhoades, J.D. 1982. Cation exchange capacity. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeny, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. 2nd Edition. Agronomy Monograph 9.* American Society of Agronomy, Soil Science Society of America. Madison, WI, pp. 149-157.
- Robichaud, P., Hungerford, R. 2000. Water repellency by laboratory burning of four northern Rocky Mountain forest soils. *Journal of Hydrology* 231-232:207-219.
- Rodríguez-Alleres, M., Benito, E., De blas, E. 2007. Extent and persistence of water repellency in north - western Spanish soils. *Hydrological Processes*. 21 2291-2299.
- Rodríguez, R.J. 2014. Procesos y factores de flujo de infiltración edáfica en una disturbosecuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de Maestría. Facultad de Biología. U.M.S.N.H. Morelia. Mich.
- Roy, J.L. and McGill, W.B. 1998. Characterization of disaggregated nonwetable surface soils found at old crude oil spill sites. *Canadian Journal of Soil Science*. 78: 331-334
- Rzedowski, G.C., Rzedowski, J. 2001. Flora fanerogámica del Valle de México. Instituto de Ecología, A.C.; CONABIO. Pátzcuaro, Michoacán.
- Savage, S.M., Osborn, J., Letey, J. y Heton, C. 1972. Substances contributing to fire induced water repellency in soils. *Proceedings of the Soil Science Society of America*. 36: 674-678.
- Scott, D. F., 1992. The influence of vegetation type on soil wettability. *Proceedings of the 17th Congress of the Soil Science Society of South Africa, University of Stellenbosch, 28-30th Jan.* pp. 10B21-10B26.
- Scott, D. F., 2000. Soil wettability in forested catchments in South Africa; as measured by different methods and as affected by vegetation cover and soil characteristics. *Journal of Hydrology*. 231-232: 87-104.
- SCT. Pérez, G. N. 2008. Determinación de Curvas Características en suelos no saturados con celdas de presión. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Qro. México. 54 pp. ISSN 0188-7297.

- Schnabel, S., Pulido-Fernandez, M., Lavado-Contador, J.F. 2013. Soil water repellency in rangelands of Extremadura (Spain) and its relationship with land management. *Catena* 103: 53-61.
- Seiyde, M.M., Mahmoud, S.S., Aliasghar, Z., Kambiz, T.A. 2013. Relationship between soil water repellency and some soil in northern Iran. *Catena* 108: 24-34.
- Shirtcliffe, N. J., Michale, G., Newton, M. I., Pyatt, F. B. and Doerr, S. H. 2006. Critical conditions for the wetting of soils. *Applied Physics Letters*. 89 (9). Article No. 094101.
- Thomas, G.W. 1982. Exchangeable cations. In: Page, A.L., Miller, R.H., Keeny, D.R. (Eds.), *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*. 2nd Edition. Agronomy Monograph 9. American Society of Agronomy, Soil 598 Science Society of America. Madison, WI, pp. 159-165
- Tschapek, M. 1984. Criteria for determining the hydrophilicity-hydrophobicity of soils. *Zeitschrift für Pflanzener-naehrung und Bodenkunde*, 147:137-149.
- Van Zuidam, R.A., 1986: *Aerial photointerpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. 442 p. Smits Publishers, The Hague.
- Walkley, A., Black, I.A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining organic carbon in soils: Effect of variations in digestion conditions and of inorganic soil constituents. *Soil Science* 63: 251-263. DOI: 10.1097/00010694-194704000-00001
- Wallis, M.G., Horne D.J., and McAuliffe, K.W. 1990. A study of water repellency and its amelioration in a yellow-brown sand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 33:1. 139-144. DOI: 10.1080/00288233.1990.10430670
- Watson, C.L. y Letey, J. 1970. Indices for characterizing soil-water repellency based upon contact angle-surface tensión relationships. *Soil Science Society of America Proceedings*. 34:841-844.
- Wang, X. and Benson, H.G., 2004. Leak- Free pressure plate extractor for measuring the soil water Characteristic Curve. *Geotechnical Testing Journal*. Vol. 27. No. 2. 10 pp.
- Wessel, A.T. 1988. On using the effective contact angle and the water drop penetration time for classification of water repellency in dune soils. *Earth Surface Processes and Landforms*. 13: 555-562.
- Wondzell, S. M., King, J. G. 2003. Postfire erosional processes in the Pacific Northwest and Rocky Mountain regions. *Forest ecology and management*. 178. 75-87 pp.
- Zavala, L.M., Gonzalez, F.A., Jordán, A. 2009a. Intensity and persistence of water repellency in relation to vegetation types and soil parameters in Mediterranean SW Spain. *Geoderma* 152: 361-374.
- Zavala, L.M., Gonzalez, F.A., Jordán, A. 2009b. Fire-induced soil water repellency under different vegetation types along the Atlantic dune coast-line in SW Spain. *Catena* 79: 153-162.

- Zavala, L.M., Granged, A.J.P., Jordán, A., Barcenos-Moreno, G. 2010. Effect of burning temperatura on water repellency and aggregate stability in forest soils under laboratory conditions. *Geoderma* 158: 366-374.
- Zavala, L.M., Garcia-Moreno, J., Gordillo-Rivero, A.J., Jordán, A., Mataix-Solera, J. 2014. Natural soil water repellency in different types of Mediterranean woodlands. *Geoderma* 226-227: 170-178.
- Zisman, W.A., 1964. Relation of the equilibrium contact angle to liquid and solid constitution. *Advances in Chemistry Series Vol. 43*. pp 1-5.