



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

**INSTITUTO DE INVESTIGACIONES SOBRE RECURSOS
NATURALES (INIRENA-UMSNH)**



**PROGRAMA DE DOCTORADO INSTITUCIONAL DE CIENCIAS
BIOLÓGICAS**

OPCIÓN EN RECURSOS BIÓTICOS

**“VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES EDÁFICAS
RELACIONADAS CON LA INFILTRACIÓN Y LA
CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SUPERFICIAL EN LA
CUENCA DE CUITZEO”**

T E S I S

QUE PRESENTA EL

**M. EN C. ALBERTO GÓMEZ-TAGLE
CHÁVEZ**

COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS

DIRECTOR DE TESIS
Dr. Alberto F. Gómez-Tagle Rojas
CODIRECTOR
Dr. Jorge Batlle-Sales

MORELIA, MICHOACÁN
MÉXICO

FEBRERO 2008

AGRADECIMIENTOS

Un trabajo doctoral es rara vez el producto del trabajo individual. Por ello deseo reconocer y agradecer a distintas personas y organizaciones sin las cuales este trabajo no hubiera sido posible en su forma actual.

Deseo agradecer a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por abrir sus puertas y darme la oportunidad de llevar acabo mis estudios de postgrado, también al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado durante estos estudios, el financiamiento para esta investigación fue otorgado mayoritariamente por el proyecto CONACYT-SEMARNAT (SEMARNAT-2002-C01-00012) “Diagnóstico integrado y priorización de alternativas de rehabilitación para la sustentabilidad de la cuenca de Morelia (Cuitzeo)”.

Deseo agradecer a mis asesores Dr. Jorge Batlle-Sales de la Universidad de Valencia y el Dr. Alberto F. Gómez-Tagle R. del INIRENA- UMSNH. Quienes impulsaron este trabajo desde su gestación, siempre dispuestos a transmitirme su experiencia, conocimiento y método de trabajo, además de apoyarme en lo logístico, académico y emocional. A ambos deseo reconocerles su enseñanza dura de autocrítica y objetividad. Al Dr. Batlle, quién aún con la distancia siempre estuvo al tanto de la evolución del trabajo y sus avances.

Igualmente deseo dar un extenso reconocimiento al Dr. José Antonio Gutiérrez Gnnechi del Instituto Tecnológico de Morelia, primero por su interés y entusiasmo en temas ambientales como el del presente trabajo, y segundo por su invaluable apoyo y profesionalismo en el desarrollo de las unidades de automatización.

También deseo agradecer al Dr. Daniel Geissert K, del Instituto de Ecología A.C., Xalapa, Dr. Phillipe Lobit del Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales de la UMSNH, Dr. Hipólito Muñoz N. del Centro de Investigaciones en Ciencias Biológicas de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, Dr. Eleazar Arreygüe R. del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la UMSNH y Dr.

Juvenal Esquivel C. de la Facultad de Agrobiología, Pdte. Juárez, UMSNH, quienes forman parte de la mesa de sinodales por su guía, observaciones y recomendaciones, tanto en el desarrollo del trabajo como en la presentación del documento final. Deseo expresar primero una disculpa por entregarles un monstruo de casi 300 páginas que debían revisar a contra-reloj, y segundo un reconocimiento a su esfuerzo “sobrehumano” en la revisión del manuscrito.

Igualmente quiero expresar mi agradecimiento a mi familia; a mi muy amada compañera, amiga y “Editora” Selene Maldonado L. por su incondicional apoyo, objetividad, crítica, buen humor y frescura en las situaciones más difíciles, a mis papás quienes incondicionalmente me apoyaron en este proyecto y ayudaron a pasar por situaciones difíciles, Yolanda Chávez, Alberto Gómez-Tagle, y mis hermanas Paola y Pitayita por su comprensión y apoyo oportuno y eficaz.

Mi agradecimiento y reconocimiento es también para los coordinadores del programa doctoral, cada uno en su momento Dr. Alejandro Bravo P. y Dr. Raúl Cárdenas, por su excelente gestión y capacidad de liderazgo, sin ellos mucho de lo que aquí se presenta no hubiera sido posible. También quiero agradecer al personal administrativo del INIRENA, especialmente a la Cont. Laura Mariño.

Mi especial agradecimiento a mis compañeros y amigos quienes participaron en varios aspectos de la realización de este trabajo, desde amplias discusiones conceptuales y metodológicas hasta arduo trabajo de campo ó laboratorio, al M. en C. Hugo Zepeda Castro (armadillo), Biol. J. Emmanuel Pintor A. (Manolito), Dr. Alfredo Amador G., Biol. J. Antonio Salgado M. (Toño), y mis compañeros del Laboratorio de Suelos; Biol. Fabricio Mariano D., M. en C. Esperanza Díaz F. Oliver Felipe C. y Luis A. Nieves. Un especial reconocimiento a Mario A. Guevara S. (Querubón) por su entusiasmo, buen humor, interés, músculo y creatividad que ayudó en mucho durante la fase del diseño y prueba de los infiltrómetros. Así como a la empresa Servicios Integrales en Ecosistemas, S.C. por el financiamiento parcial y apoyo logístico durante los muestreos en el área del Volcán Jorullo.

EL INICIO

Desde hace más de 10 años, en el grupo de trabajo realizábamos pruebas de infiltración como parte “rutinaria” en los muestreos multipropósito del Sistema de Agrología Forestal, realizamos pruebas de infiltración en la Sierra gorda de Querétaro, la Cuenca del Río Chiquito al sur de Morelia, la zona Monarca, etc. Empleábamos infiltrómetros de doble anillo “portátiles”, procesábamos los datos con el modelo de Kostiakov y reportábamos las “tasas” de infiltración y los volúmenes acumulados en cierto tiempo. Varios años después trabajando en la cuenca del Lago de Pátzcuaro, se nos ocurrió la idea de realizar un “Mapa” de capacidad de infiltración. El plan era sencillo, utilizamos como insumos un mapa de grados de erosión, el cual integraba la cobertura vegetal con la historia de uso del suelo, el tipo de suelo y la afloración de horizontes. De eso estábamos seguros. Realizamos una estratificación y diseñamos un muestreo. Hugo y Yo salimos a muestrear durante varios días utilizando un infiltrómetro de doble anillo “Turftec”, para agilizar las cosas adquirimos otro dispositivo de estos, estuvimos bajo el sol más de lo que hubiéramos querido lo que me produjo enrojecimiento y un terrible ardor en la piel, pero allí sentados bajo el sol hicimos las primeras modificaciones a los dispositivos para hacer lecturas más fáciles y precisas. Las tendencias y patrones de lo que observamos esas semanas, patrones totalmente inesperados para mí, como mayor infiltración en las cárcavas con horizontes arcillosos que en terrenos con andosoles pastoreados en las partes altas sembró en mí una gran cantidad de dudas. En ese momento el limitado acceso a la literatura especializada constituyó un importante obstáculo, para salvarlo escribí innumerables cartas y posteriormente correos electrónicos solicitando copias de artículos de los cuales solo había podido leer los resúmenes, en ocasiones funcionaba en ocasiones no. Esta iniciativa me fue adentrando en el conocimiento de este proceso y entre más leía más dudas tenía. En el último capítulo de mi trabajo de maestría realicé un ejercicio para generar un mapa de capacidad de infiltración utilizando funciones de pedotransferencia y geoestadística, en este ejercicio entendí parte del proceso de infiltración y su dependencia de la conductividad hidráulica. Esa experiencia fue la semilla de este trabajo, que comienza a dar ahora sus primeros frutos.

RESUMEN

La infiltración es un proceso clave de la fase terrestre del ciclo hidrológico, es determinante en los servicios ambientales proporcionados por los ecosistemas terrestres. En medios saturados este proceso está controlado por la conductividad hidráulica saturada K_{fs} , que puede utilizarse como variable *comodín* ya que representa la capacidad máxima con la cual un suelo es capaz de transmitir agua a través de sí. Se estudió la variación de la conductividad hidráulica saturada K_{fs} en cinco coberturas vegetales en un suelo volcánico del sur de la Cuenca del Lago de Cuitzeo y se examinó la hipótesis del efecto positivo de la cobertura vegetal en el incremento de la capacidad de infiltración. Para ello se utilizó un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo de diseño propio que no tuvo diferencias significativas con un Permeámetro de Guelph. El dispositivo posteriormente fue automatizado con éxito.

Las cinco coberturas vegetales y usos del suelo estudiadas correspondieron a bosque de pino-encino, agostadero, cárcava, parcela abandonada y plantación de *Cupresus*, todos los sitios se ubicaron en altitudes entre 2190 y 2210 en superficie cumbral o ladera alta de un lomerío suavizado por cenizas volcánicas. Se describieron y analizaron igual número de perfiles junto con un intenso muestreo de infiltración (>40) puntos por cobertura.

Se concluyó que la conductividad hidráulica saturada no dependió en forma exclusiva o directa de la cobertura vegetal, aún dentro del mismo tipo de suelo definido cartográficamente con las fuentes oficiales (INEGI). Los resultados no soportan la hipótesis de que una mayor cobertura vegetal implica mayor capacidad de infiltración. Para la plantación de *Cupresus* con edad aproximada de 30 años y cobertura >80% K_{fs} no fue estadísticamente distinta ($\alpha=0.05$) de la cárcava o la parcela abandonada, mientras que el bosque de pino-encino mostró K_{fs} un orden de magnitud mayor al resto de los sitios. Las diferencias en la K_{fs} se debieron al afloramiento diferencial de horizontes en los sitios y la presencia de canales de flujo preferencial producidos principalmente por bioturbación bajo ciertas coberturas (bosque de pino-encino).

Para todos los sitios la K_{fs} mostró funciones de distribución probabilística tipo Log-Normal. Las retículas de muestreo (49 puntos distribuidos en una retícula de 3 x 3m) no lograron captar la variación espacial completa de esta propiedad, que se caracterizó por elevados valores pepita relacionados con una variabilidad aleatoria. En forma general, la K_{fs} correlacionó positivamente con el % de agregados estables en agua con tamaños de 2.0 a 4.0 y 0.25 a 2.0 mm, el % arena, % limo y el carbono orgánico edáfico, y correlacionó negativamente con la densidad aparente y el contenido de arcilla. Sin embargo en los distintos sitios la K_{fs} correlacionó con conjuntos de variables diferentes indicando que la K_{fs} tiene controles diferentes en las distintas clases de cobertura.

Palabras Clave: *Infiltración, cobertura vegetal, infiltrómetro automático, suelos volcánicos, estratificación vertical.*

ABSTRACT

Infiltration is a key process in the terrestrial phase of the hydrological cycle and is determinant of the ecosystem services provided by land ecosystems. This process is controlled by saturated hydraulic conductivity in saturated media that can be used as indicative variable because it represents the maximum water transmissivity of a soil when saturated. The variation of soil hydraulic conductivity (K_{fs}) was analyzed within five land use and plant cover classes on a volcanic soil at the southern portion of Cuitzeo Lake Basin in central México. The hypothesis stating that plant coverage has a positive effect on infiltration capacity was tested. To do so a constant head single ring infiltrometer of personal design, statistically equal to a Guelph Permeameter was used. The designed infiltrometer was later automatized.

The five land use and plant cover classes include pine-oak forest, rangeland, gully, abandoned parcel and *Cupressus* plantation, all sites were between 2190 and 2210 msnm at the top or on upper hillslope position of a hill covered with volcanic ashes. Five soil pits were dug and profiles described, besides an intense infiltration sampling (>40) per land cover class.

Conclusions include that K_{fs} did not depend directly or exclusively of plant cover, even within the same soil type defined cartographically by official sources (INEGI). Results do not support the tested hypothesis. *Cupressus* plantation with an age of 30 years and coverage >80% was not statistically different from a gully or an abandoned parcel, while pine-oak forest K_{fs} values were an order of magnitude over the other sites. Differences in K_{fs} were due to surface presence of different soil horizons and the presence of preferential flow pathways generated by bioturbation under certain plant coverages (pine-oak forest).

In all sites K_{fs} showed Log-Normal probabilistic distribution. Sampling grids (49 sample points distributed in a 3 x 3 m grid) were unable to register all of the spatial variation for this property, that was characterized by high nugget values related to random variability. In the overall, K_{fs} positively correlated with % soil water stable aggregates with size ranges from 2.0 to 4.0 and from 0.25 to 2.0 mm, sand and silt content and soil organic carbon, but negatively correlated with bulk density and clay content. Nevertheless K_{fs} was correlated with different set of variables depending on the plant cover analyzed, indicating that K_{fs} has different controls in different plant cover classes

Key words: *Infiltration, plant cover, automated infiltrometer, volcanic soils, vertical stratification*

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL | 1 |
| Servicios ecosistémicos | 1 |
| Hidropedología | 2 |
| Motivación y acotación del problema | 3 |
| HIPOTESIS | 4 |
| OBJETIVOS | 5 |
| DESCRIPCION DE LA CUENCA DE CUITZEO | 5 |
| Geología y litología | 6 |
| Suelos | 7 |
| Clima | 8 |
| Uso del suelo y vegetación | 8 |
| ESTRUCTURA DEL TRABAJO | 9 |
| Descripción del área de estudio. | 10 |
| CAPITULO 2. CONSTRUCCIÓN, PRUEBA Y AUTOMATIZACIÓN DE UN INFILTRÓMETRO PORTÁTIL DE CARGA CONSTANTE Y ANILLO SENCILLO; APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DE CAMPO | 13 |
| INTRODUCCIÓN | 13 |
| Descripción y Construcción del Dispositivo | 16 |
| Descripción de la unidad de Automatización | 19 |
| METODOLOGÍA | 21 |
| Área de Estudio | 21 |
| Adquisición de Datos | 22 |
| Métodos de Cálculo de la Conductividad Hidráulica Saturada de Campo | 25 |
| Método Wu1 | 27 |
| Método Wu2 | 28 |
| Método DCAS | 28 |
| Permeámetro de Guelph | 29 |
| Pruebas del infiltrómetro automático | 29 |
| Pruebas de laboratorio | 29 |
| Pruebas de campo | 31 |
| Análisis | 31 |
| RESULTADOS | 32 |
| Comparación Entre Sitios | 36 |
| Dispositivo de automatización | 38 |
| Pruebas de burbujeo | 38 |
| Determinación de la Kfs con datos del infiltrómetro automatizado | 41 |
| DISCUSION | 43 |
| Comparación con el Permeámetro Guelph | 44 |
| Valores negativos | 45 |

| | |
|--|-----|
| Valores extremos | 46 |
| Consideraciones sobre los métodos y el dispositivo | 46 |
| Unidad de Automatización | 48 |
| CONCLUSIONES | 49 |
| | |
| CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DE SUELOS, MUESTREO DE INFILTRACIÓN Y RELACIONES ENTRE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA Y PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS | 51 |
| | |
| Relación entre la cobertura vegetal, la infiltración y la Kfs | 51 |
| DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS BAJO CINCO COBERTURAS | 54 |
| AREA DE ESTUDIO | 54 |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS | 55 |
| MUESTREO Y ANÁLISIS | 55 |
| DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS | 57 |
| Perfil de bosque de pino-encino (BPQ) | 58 |
| Perfil de Agostadero (AG) | 62 |
| Perfil en Carcava (C) | 64 |
| Perfil en Parcela abandonada (PA) | 66 |
| Perfil en Plantación (PCu) | 69 |
| | |
| DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS PERFILES | 72 |
| Características del Cambisol | 72 |
| Características del Lixisol Húmico | 73 |
| | |
| 3.2 MUESTREO DE INFILTRACIÓN | 75 |
| Análisis estadístico y geoestadístico | 76 |
| Distribución probabilística de la Kfs | 79 |
| Variación espacial de la Kfs | 82 |
| Diferencias entre sitios | 85 |
| Relaciones de la Kfs con otras propiedades | 87 |
| | |
| DISCUSIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA Kfs | 87 |
| Distribuciones probabilísticas | 87 |
| Variación espacial de la Kfs | 88 |
| | |
| 3.3 RELACIONES ENTRE LA Kfs Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS | 91 |
| Variación de las propiedades fisicoquímicas en los sitios | 91 |
| Relaciones entre Kfs y propiedades fisicoquímicas | 95 |
| Agostadero | 95 |
| Bosque de pino-encino | 95 |
| Cárcava y parcela abandonada | 96 |
| Plantación de Cupresus | 96 |
| Cobertura vegetal y uso del suelo | 97 |
| Textura y bioturbación | 100 |
| Relaciones entre suelo, vegetación y conductividad hidráulica; modelo local | 103 |

| | |
|--|-----|
| CAPITULO 4. INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSION GENERAL | 107 |
| Diseño, prueba y funcionamiento del infiltrómetro utilizado | 107 |
| Funcionalidad y aplicación del infiltrómetro automatizado | 109 |
| Interpretación de la dinámica de cambio de uso del suelo a nivel local | 110 |
| Variación espacial de la Kfs en relación con la cobertura vegetal y uso del suelo | 111 |
| Relación de la Kfs con la textura y bioturbación | 114 |
| Variación anidada de variables edáficas | 117 |
| Patrones de variación y relaciones en la escala local | 118 |
| CONCLUSIONES GENERALES | 123 |
| REFERENCIAS | 127 |
| ANEXO 1. ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN A PARTIR DE ORTOFOTOMOSAICOS DIGITALES DE ESCALA DETALLADA. | 137 |
| RESUMEN | 137 |
| INTRODUCCION | 137 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 138 |
| Ajuste de imágenes y conteo | 139 |
| AREA DE ESTUDIO | 140 |
| RESULTADOS | 141 |
| DISCUSION | 148 |
| Métodos, aplicación y potencial | 148 |
| CONCLUSIONES | 148 |
| Agradecimientos | 149 |
| REFERENCIAS ANEXO 1 | 149 |
| ANEXO 2. CARTA DE ACEPTACION | 153 |
| ANEXO 3. CLIMOGRAMA | 154 |
| Referencias Anexo 3 | 157 |
| ANEXO 4; ANÁLISIS DE LABORATORIO PARA LOS PERFILES | 158 |

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Servicios ecosistémicos

La crisis ambiental ha permitido la revaloración de los ambientes naturales y antropizados desde una perspectiva en donde se toman en cuenta ciertos procesos ecológicos que tienen impacto en los procesos económicos y la calidad de vida (Costanza et al., 1998b, a). Esta revaloración ubica a estos procesos como generadores de bienes y servicios ecosistémicos (Costanza et al., 1998b, a; de Groot et al., 2002; Chiesura y de Groot, 2003) o ambientales (Lara y Echeverría, 2006) y no solo proveedores de materias primas.

En esta perspectiva se reconocen diversos servicios con base en las funciones ecosistémicas involucradas. De acuerdo a de Groot et al. (1990; 2002) las funciones de los ecosistemas se dividen en distintas clases; regulatorias, de hábitat, producción e información y se incluyen entre otros los valores histórico, espiritual, recreativo, estético y educacional de los ecosistemas. Actualmente existe una discusión académica sobre los métodos y formas de evaluar los distintos servicios que proveen los ecosistemas (1990; de Groot et al., 2003; Oyarzun et al., 2005), sin embargo en la práctica diversos países han establecido a través de dependencias gubernamentales, fundaciones u organizaciones no gubernamentales esquemas de compensación económica por servicios ecosistémicos (Oyarzun et al., 2005; Cotler y Balvanera, 2006; Naranjo y Murgueitio, 2006) siendo la captura de carbono y los servicios ambientales hidrológicos aquellos con mayor facilidad para establecer mercados funcionales (Cotler y Balvanera, 2006).

Los denominados servicios ecosistémicos o servicios ambientales hidrológicos están relacionados principalmente con procesos regulatorios del ciclo hidrológico en los ecosistemas. Éstos procesos son la regulación de flujo hídrico, depuración del agua, filtrado y almacenamiento. Los servicios ecosistémicos asociados son la protección de inundaciones, el drenaje e irrigación natural, cursos de agua como medio de transporte, la disponibilidad de agua para

consumo humano, la regulación de sedimentos y descontaminación del agua (de Groot et al., 2002). La infiltración es uno de los procesos hidrológicos clave el provisión de los servicios ambientales hidrológicos en diferentes escalas (Costanza et al., 1998b, a; de Groot et al., 2002; Chiesura y de Groot, 2003). En México el esquema de pago por servicios ambientales hidrológicos surgió como un sistema de subsidio para disminuir las elevadas tasas de deforestación y ha evolucionado en años recientes a verdaderos esquemas de pago por servicios ambientales hidrológicos (Perevochtchikova et al., 2005) de los cuales existen ejemplos aislados con distintos niveles de éxito, sin embargo el esquema de los principales organismos gubernamentales sigue siendo el de subsidio para evitar la deforestación (Cotler, com. pers.).

Hidropedología

El flujo de agua en el suelo si bien se ha estudiado desde hace varias décadas con fines de producción agrícola, es uno de los procesos del ciclo hidrológico menos comprendidos, especialmente en ambientes no dedicados a la agricultura (Sobieraj, 2003). Lin (2004) explica que existe un hueco cognitivo importante que ligue conceptual y metodológicamente los componentes de la hidrosfera con otros componentes del sistema terrestre. Mientras que por un lado los especialistas en ciencias hídricas (hidrólogos) generan y calibran modelos para predecir y entender flujos superficiales, los cuales han sido ampliamente criticados por utilizar valores promedio asignados a polígonos para explicar el comportamiento hidráulico de los suelos, sin considerar los efectos de su variabilidad espacial intrínseca o variabilidad temporal, además de presentar serias deficiencias en la inclusión de los flujos subsuperficiales y sus efectos en la modificación de caudales (Lin et al., 2004). Por otro lado los hidrogeólogos se enfocan al estudio de los procesos en capas geológicas “profundas”, por lo que muchos modelos de funcionamiento hidrogeológico asumen la permeabilidad de los suelos como supeditada exclusivamente al tipo de roca que forma el material parental, sin considerar la estratificación vertical posibles horizontes impermeables o procesos de flujo preferencial y sellamiento (Lin et al., 2004).

Recientemente se ha planteado un enfoque de unión entre estas dos aproximaciones estudiando y comprendiendo los flujos de agua en los suelos (Lin, 2004; Pachepsky et al., 2006b). La hidropedología (*Hydropedology*) estudia estos procesos desde una perspectiva holística que incluye tanto elementos de las ciencias del suelo como de la hidrología, enfocándose en las interfases entre pedósfera e hidrósfera y pedósfera y geósfera abarcando la generación y aplicación de conocimiento de los procesos de interacción hidrológicos-pedológicos y geológicos-pedológicos así como sus propiedades en la zona no saturada (Lin et al., 2004; Pachepsky et al., 2006b).

Este trabajo está estructurado desde una perspectiva hidropedológica, con un enfoque dentro del marco conceptual de los servicios ecosistémicos. Si bien inicialmente únicamente comprendía el enfoque de servicios ecosistémicos, el desarrollo y maduración durante el proceso han permitido ubicar el trabajo dentro de una perspectiva hidropedológica más que edafológica clásica.

Motivación y acotación del problema

Este trabajo doctoral se inserta como parte de un proyecto multidisciplinario llamado “Diagnóstico Integrado y Priorización de Alternativas de Rehabilitación para la Sustentabilidad de la Cuenca de Morelia (Cuitzeo)” financiado por el fondo sectorial CONACYT-SEMARNAT (SEMARNAT-2002-C01-00012).

La infiltración es un proceso complejo dentro del ciclo hidrológico (Campos-Aranda, 1987) que depende de propiedades del medio poroso y las condiciones en que este se encuentre (Porta et al., 1999). Debido a que el flujo de agua en un medio poroso saturado es dependiente de la conductividad hidráulica saturada, diversos autores como Wit (2001) y Ferrer y colaboradores (2004) la utilizan como descriptor de la infiltración base. Esta propiedad representa la facilidad con que el agua fluye a través de los poros del suelo cuando estos se encuentran completamente llenos de agua (Sobieraj, 2003) por lo que es uno de los parámetros más importantes en el control de solutos, flujos hidrológicos y constituye una variable clave en la fase terrestre del ciclo hidrológico.

La principal motivación para la realización de este trabajo es la falta de conocimiento detallado del proceso de infiltración y variación de la conductividad hidráulica saturada en ambientes no agrícolas para el área de estudio, sin embargo la revisión de literatura indicó que la falta de conocimiento en sitios no agrícolas es común para muchos sitios (Sobieraj, 2003; Sobieraj et al., 2004). Esto no es extraño pues la cuantificación de la conductividad hidráulica es difícil además de que esta propiedad es altamente variable en el espacio.

Las preguntas que se plantearon inicialmente y que se intentaron resolver fueron:

¿Cuáles son las propiedades del suelo determinantes del proceso de infiltración?. Por un lado la literatura especializada refiere en forma recurrente y amplia las relaciones entre cobertura vegetal, uso del suelo e infiltración sin embargo para muchos casos estas relaciones no abarcan el tipo de biomas y climas presentes en la cuenca, por lo que se planteó la pregunta ¿Existe una relación entre la cobertura vegetal y la infiltración en los ambientes de la Cuenca del Lago de Cuitzeo?, ¿Cómo son estas relaciones?, ¿Cuáles son las coberturas vegetales recomendables para un posible plan de alternativas de recuperación hidrológica de esta cuenca?.

HIPOTESIS

Con base en las preguntas anteriores, la hipótesis rectora de este trabajo se planteó como:

“La variación espacial de las propiedades del suelo y la cobertura vegetal condicionan los patrones espaciales de variación de la infiltración y la conductividad hidráulica de forma tal, que a mayor cobertura vegetal se presentarán mayor infiltración y conductividad hidráulica”.

OBJETIVOS

Tras haber establecido las preguntas puntuales, y planteado la hipótesis el objetivo principal de este trabajo fue:

- Cuantificar y representar la variabilidad de distintas propiedades relacionadas con la infiltración y conductividad hidráulica del suelo en áreas representativas dentro de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Los objetivos particulares se plantearon entonces de la siguiente manera:

1. Diseñar, construir y calibrar equipo de campo para realizar las determinaciones de conductividad hidráulica e infiltración.
2. Identificar y cuantificar las propiedades edáficas relacionadas con la infiltración y conductividad del suelo en áreas clave en la cuenca de Cuitzeo.
3. Describir los patrones de variación de la conductividad hidráulica y generar modelos para representarla.

A futuro se pretende emplear los métodos, técnicas y resultados generados por este trabajo doctoral para generar y calibrar modelos de funcionamiento de cuenca espacialmente distribuidos con un enfoque multiescalar.

DESCRIPCION DE LA CUENCA DE CUITZEO

La Cuenca del Lago de Cuitzeo o Cuenca de Cuitzeo, es una cuenca endorreica con una superficie aproximada de 4,075 km^2 ubicada en el eje volcánico transmexicano, formando parte de los estados de Michoacán y Guanajuato. Se ubica entre los 19°30' y 20°05' de latitud Norte y los 100°35' y 101°30' de longitud Oeste (Figura 1.1). Esta cuenca esta caracterizada por su geometría, forma y tipo de fallamiento (Garduño Monroy, 1999b; Israde-Alcántara y Garduño Monroy, 2004) cuyos elementos estructurales están delimitados por fallas con direcciones E-W y NW-SW formado sistemas de semigrabens basculados generalmente hacia el sur (Israde Alcántara et al., 2002).

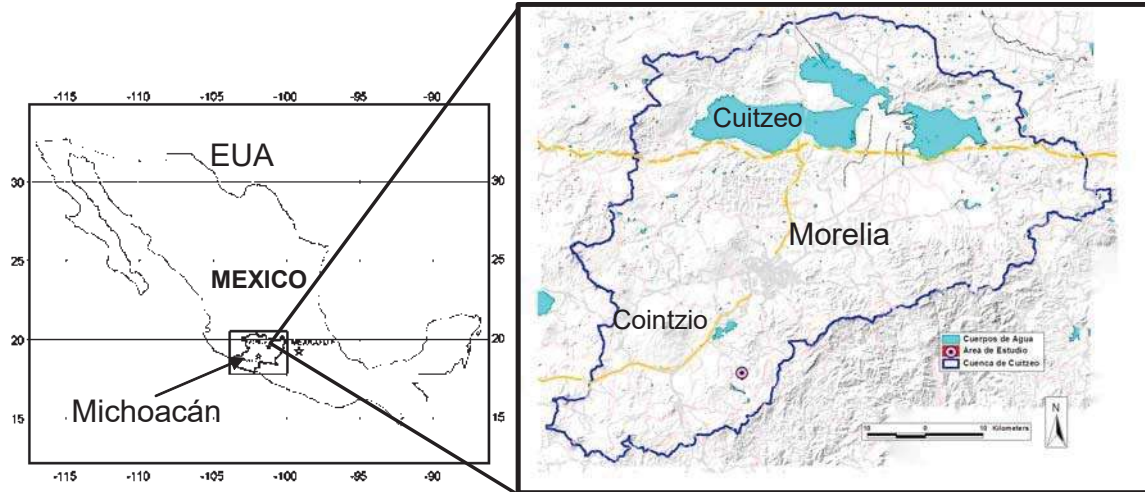


Figura 1.1 Ubicación del área de estudio.

Esta cuenca es importante entre otras cosas, porque alberga el segundo cuerpo de agua natural más grande de México, el Lago de Cuitzeo, con una extensión aproximada de 233 km^2 (Mendoza et al., 2002). Además de varias núcleos poblacionales de los cuales la capital del estado de Michoacán, con cerca de medio millón de habitantes es la más grande.

Geología y litología

La cuenca está delimitada al oeste y al suroeste por aparatos volcánicos de la secuencia volcánica del Oligoceno-Mioceno y el cuaternario del corredor tarasco (Pasquaré et al., 1991; Garduño Monroy, 1999a), destacan los cerros La Nieve, La Taza, El Frijol y El Cerro Burro, además del Tzirate, Cerro Hueco, Tzanambo y la Mesa El Gachupín. Al Sur se encuentra delimitada por el escarpe de falla del sistema del Balsas con materiales de la secuencia Oligoceno-Mioceno de Mil Cumbres (Pasquaré et al., 1991) formado por secuencias volcánicas formadas por brecha y toba (Silva-Mora, 1995), donde destacan el cerro Pico Azul, La Ceja del Chilar y las lavas del Zacatón. Al Este la cuenca está delimitada por elementos volcánicos del sistema geotérmico de los Azufres (Silva-Mora, 1995) con los cerros El Zacatón, Cerro Viejo y los domos riolíticos de El Bosque y Carpintero. Al Norte está delimitada por volcanes escudo pliocénicos como el

Manuna y elementos miocénicos como la Sierra de San Pablo, todos con fallamiento intenso en dirección ENE-WSW (Silva-Mora, 1995).

De acuerdo con las bases cartográficas de INEGI estructuradas en formato digital para el proyecto "Diagnóstico Integrado y Priorización de Alternativas de Rehabilitación para la Sustentabilidad de la Cuenca de Morelia (Cuitzeo)" la mayor parte de la cuenca 144,860 ha (35.5%) corresponde a rocas ígneas extrusivas de composición basáltica, el 15% (61,431 ha) a litologías de toba riolítica, el 11% (44,798 ha) son materiales aluviales, el 4.8% (19,364 ha) son rocas ígneas extrusivas ácidas. Las andesitas cubren el 3.0% (12,413 ha) mientras que las brechas volcánicas andesíticas el 3.4% (13,805 ha). Las unidades cartográficas donde se presentan éstas dos últimas clases mezcladas comprenden cerca del 4.1% (16,596 ha) es abarcado por rocas andesíticas y brechas volcánicas andesíticas, El restante 5% es abarcado por areniscas, tobas basálticas, tobas andesíticas, conglomerados, travertinos y limolitas (CETENAL, 1973c, d, 1974b; DETENAL, 1976, 1978; INEGI, 1978c, d, a, b, e, f, 1979b).

Suelos

De acuerdo con las base de datos de cartografía temática (edafología) de INEGI estructurada para el proyecto antes mencionado y tomando en cuenta el tipo de suelo predominante (unidad principal) de las asociaciones y consociaciones cartográficas correspondiente a la leyenda FAO 1970. El tipo de suelos con mayor superficie en la cuenca, son los Vertisoles, con 135,731 ha correspondiendo al 33.31% de la cuenca. Los Luvisoles abarcan cerca de 68,237 ha, con el 16.75%, los Andosoles cubren un total de 46,431 ha, el 11.39%, mientras que los Acrisoles 40,773 ha con el 10.01%. Los Feozem comprenden 40,084 ha (9.84%). La superficie restante de la cuenca lo comprende el 9.04% las unidades cartográficas Litosol (3.38%), Zolonchak (2.09%), Ranker (1.47%), Planosol (0.87%), Gleysol (0.64%) y Cambisol (0.38%). El restante 9.85% de la superficie (40,144 ha) corresponde a cuerpos de agua y humedales (CETENAL, 1973b, a, 1974a; DETENAL, 1979c, a, b, e, d; INEGI, 1979a, 1982b, a; DETENAL, 1983), éstos últimos se sabe presentan

fluctuaciones de superficie importantes en relación a las variaciones climáticas regionales (Mendoza, 2002).

Clima

El clima en la cuenca es predominantemente templado húmedo a subhúmedo (Cb) con régimen de lluvias en verano y precipitación invernal <5% del total anual, oscilación térmica intermedia y marcha tipo Ganges, con la temperatura promedio del mes mas cálido antes del solsticio de verano (García, 2004). Sin embargo la variación climática es considerable, pues en la porción centro de la cuenca se presentan climas semicálidos húmedos y subhúmedos (Estaciones Santa Rita y Morelia) (García, 2004). Esta variación está relacionada con el relieve de la cuenca (Amador com. Pers; (Mendoza, 2002). La temperatura promedio anual calculada a partir de las 22 estaciones reportadas por García (2004) es de 17.0° C, con mínima mensual promedio de 10.8° C y máxima mensual promedio de 25° C (DS=2.62). En cuanto a la oscilación térmica está se ubica entre 5.4 y 7.4° C, con promedio de 6.7° C.

Respecto a la precipitación, marzo es el mes mas seco con un promedio de 7.0 mm (22 estaciones (García, 2004)) y julio el mas húmedo con cerca de 199.3 mm, sin embargo la precipitación es altamente variable, con desviaciones estándar promedio entre 2.7 para el mes de marzo hasta 52.0 para julio. El intervalo de la precipitación promedio anual va de los 595.4 a los 1499.9 mm (DS=190.1) de acuerdo a los datos de García (2004).

Uso del suelo y vegetación

De acuerdo con López y colaboradores (2006), para el año 2000, el 23.7% (94,956 ha) comprendía matorrales, los cuerpos de agua abarcaban cerca del 7.% (30,162 ha) y los humedales 5,720 ha (1.4%). El bosque templado comprendía 78,544 ha (19.6%), la agricultura de temporal 74,385 ha (18.5%) y la agricultura de riego 62,313 ha (15.5%). En cuanto a los asentamientos humanos, estos abarcaron el 4.8% de la cuenca con 19,416 ha, mientras que las áreas erosionadas, los huertos y plantaciones forestales ocuparon 2.6% de la

superficie de la cuenca. Sin embargo la dinámica de uso del suelo es compleja y se reportan tanto áreas deforestadas, como zonas con recuperación de la vegetación, principalmente parcelas marginales que han sido abandonadas, cambiando a la clase de matorral (Lopez et al., 2006).

ESTRUCTURA DEL TRABAJO

El trabajo está estructurado en cuatro capítulos (Figura 1.2)

- El capítulo 1 corresponde a la introducción general, la estructura del trabajo y la descripción del área.
- El capítulo 2 aborda el diseño, construcción, funcionamiento y prueba de un infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo y una unidad de automatización digital. Mediante este capítulo se cumple el objetivo parcial 1.
- El capítulo 3 comprende tres partes, la primera es la descripción y características de los suelos a partir de perfiles excavados en los distintos usos del suelo y tipos de cobertura en la porción sur de la cuenca de Cuitzeo. La segunda parte corresponde al muestreo de infiltración, el cálculo de la conductividad hidráulica saturada y el análisis de su variación. La tercera parte abarca el análisis de las relaciones entre diferentes propiedades fisicoquímicas del suelo y la conductividad hidráulica saturada en los distintos tipos de cobertura y uso del suelo. Mediante este capítulo se cumple el objetivo parcial 2.
- El capítulo 4 abarca la integración y discusión sumaria del trabajo y mediante él, se cumple el objetivo parcial 3.

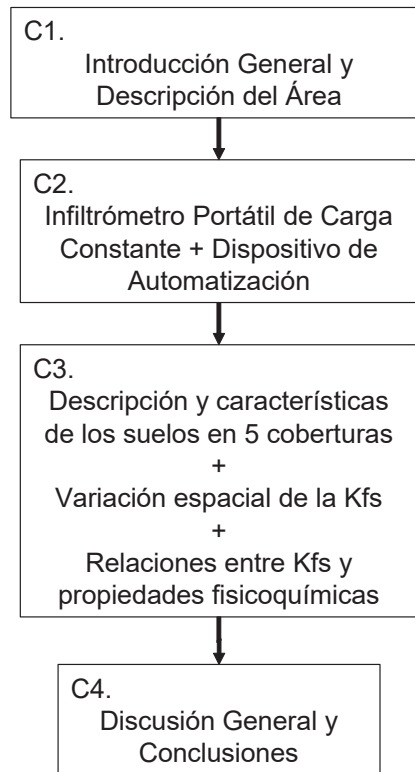


Figura 1.2. Meta estructura del trabajo de tesis y sus componentes.

Debido a que la cobertura vegetal es considerada como una variable relacionada con el proceso de infiltración, de llevó acabo una descripción de la variación de ésta y su relación con el uso del suelo. Para ello se utilizó una aproximación de percepción remota utilizando fotografías aéreas digitales de pequeño formato georreferenciadas y ortocorregidas. Esta aproximación requirió de actividades especiales entre las que se incluyen la calibración de cámaras digitales no métricas, la planeación de vuelos aerofotográficos, la obtención de imágenes y su procesamiento fotogramétrico. El resultado es un mapa de uso del suelo y vegetación detallado que se utilizó para guiar el muestreo, su desarrollo se presenta en el Anexo 1.

Descripción del área de estudio.

Para la evaluación del infiltrómetro de carga constante se trabajó en suelos del sur de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, en la subcuenca de Cointzio y en la zona

del Volcán el Jorullo. Sin embargo las descripciones de suelos, muestreos edáficos y de infiltración se realizaron en un área pequeña, La Loma del Puerto del Tigre, dentro de esta subcuenca. Las coordenadas centrales del área son; $101^{\circ}14'24''$ W, $19^{\circ}33'00''$ N y se encuentra ubicada aproximadamente a 18 km al SSW de la ciudad de Morelia.

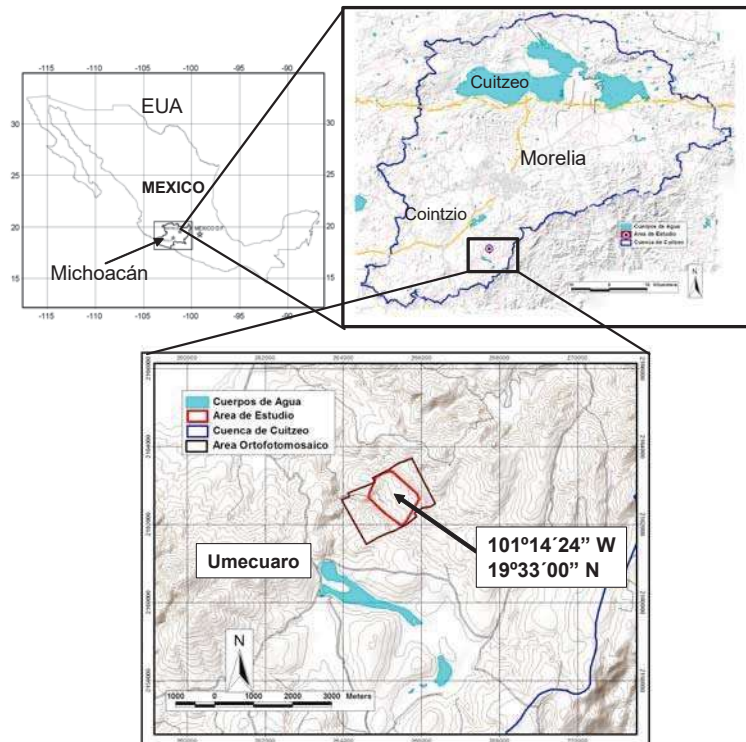


Figura 1.3. Ubicación del área de la zona de trabajo.

El área fue seleccionada debido a que se consideró como representativa de la cuenca por los siguientes criterios:

1. Se observa la presencia de usos del suelo, comunes en la cuenca.
2. Se presenta un relieve volcánico con suelos derivados de ceniza volcánica, comunes en una gran de la cuenca.
3. Se presentan coberturas arbóreas, arbustivas y herbáceas características tanto de las áreas boscosas como de los agostaderos de la cuenca.

Además de los criterios anteriores se contó con la disposición de los propietarios de los terrenos para permitir realizar actividades de investigación. Previamente

se mencionaron las superficies relativas de las distintos tipos de suelo para la Cuenca del Lago de Cuitzeo, los suelos derivados de cenizas volcánicas que comprenden Andosoles, Acrisoles, Luvisoles comprenden el cerca del 38% abarcando las partes media y alta de la cuenca.

En el área seleccionada la cartografía de INEGI (1978d; 1979a) indica asociaciones de Acrisoles órticos, Andosoles húmicos y Luvisoles crómicos, además de una litología ígnea extrusiva de tipo basáltica. La geoforma es de lomerío suavizado por cenizas volcánicas. Respecto al clima es de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004) con temperatura promedio anual de 16.7° C y precipitación promedio anual es de 849.3 mm.

En cuanto a la cubierta vegetal que presentan los bosques de pino-encino y encino, se observan en el estrato herbáceo las especies *Cynodon dactylon*, *Salvia mexicana*, *Ranunculus dicotomus*. En el estrato arbustivo las especies principales son *Rubus fruticosus*, *Bacharis heterophylla*, *B. conferta*, *Calliandra sp.* Las especies del estrato arbóreo que se presentan son *Pinus devoniana*, *Pinus leiophylla*, *Quercus obtusata*, *Q. castanea*, *Crataegus pubescens*.

Utilizando el mapa de cobertura vegetal y uso del suelo generado (Anexo 1), se decidió muestrear bajo cinco clases de cobertura y uso del suelo; bosque de pino-encino (BPQ), agostadero (AG), cárcava (C), parcela abandonada (PA) y plantación de *Cupresus* (PCu). Todos los sitios se ubicaron en la parte alta de la geoforma dentro de la superficie cumbre o en la ladera alta. En cada sitio se realizó un perfil, el cual fue descrito y analizado por horizontes, posteriormente se llevó a cabo un muestreo de infiltración utilizando infiltrómetros de anillo sencillo y carga constante descritos en el capítulo 1, con un arreglo de malla regular de 3 x 3 m con un total de 49 puntos por sitio y una cobertura de una "parcela" de 441 m². Todos los sitios se encuentran a altitudes entre los 2190 y 2210 msnm.

Los detalles sobre el muestreo y sus resultados se presentan en capítulos posteriores.

CAPITULO 2. CONSTRUCCIÓN, PRUEBA Y AUTOMATIZACIÓN DE UN INFILTRÓMETRO PORTÁTIL DE CARGA CONSTANTE Y ANILLO SENCILLO; APLICACIÓN EN EL CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DE CAMPO

INTRODUCCIÓN

La infiltración es el proceso por el cual el agua que llega a la superficie del suelo, por precipitación o riego, pasa hacia su interior (Campos-Aranda, 1987; Maderey y Jiménez, 2005) y es (un proceso) altamente sensible a cambios en el manejo del suelo (Davidoff y Selim, 1986). La velocidad con que ocurre este proceso se define como velocidad de infiltración o tasa de infiltración, y durante un ensayo de infiltración tiende a decrecer en el tiempo hasta alcanzar un valor constante (infiltración básica; Campos-Aranda, 1987). Esta variable influye de manera importante en el comportamiento hidrológico en la escala de cuenca y por ello es una variable clave para modelar procesos hidrológicos (Ferrer et al., 2004).

Actualmente se reconoce a la capacidad de infiltración como uno de los servicios ambientales hidrológicos que prestan los ecosistemas y se relaciona con la mitigación de avenidas, el flujo subsuperficial lento y el aprovisionamiento de agua de consumo (de Groot et al., 2002).

Sin embargo, la tasa de infiltración básica depende principalmente de la Conductividad Hidráulica Saturada (K_s), que se define como la velocidad de un flujo de agua en el suelo cuyo espacio poroso se encuentra lleno de agua y la carga hidráulica (ΔH) es igual a la longitud de la sección analizada (L). Esto es, que el gradiente de energía existente sea igual a la unidad ($\Delta H/L=1$) (Shainberg y Levy, 1992; Walker y Zhang, 2002). La K_s es entonces una medida del caudal que atraviesa una sección del sistema poroso del suelo en condiciones de saturación (Amoozegar, 1992; Elrick y Reynolds, 1992).

Diversos autores mencionan que la conductividad hidráulica saturada (K_s) es el indicador de los grupos hidrológicos que mejor define el parámetro de número de curva (Soil Conservation Service, 1954; Rawls et al., 1993; Nearing et al., 1996), un parámetro necesario para el modelo hidrológico del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos (Soil Conservation Service, 1954). Autores como Ferrer (Ferrer et al., 2004) han generado mapas de esta propiedad con el fin de incorporarlos a modelos hidrológicos de distintas escalas.

Sin embargo, la conductividad hidráulica saturada presenta una alta variabilidad espacial, aún en el mismo tipo de suelo y distancias cortas (Sobieraj, 2003), por lo que para efectos de generación y calibración de modelos espaciales *p. Ej.* Ferrer y colaboradores (2004) un sólo valor medido en una posición particular o un pequeño conjunto de valores, difícilmente representan la condición de un área, aún cuando esta sea pequeña y se asuma homogénea (parcela) (Russo y Bresler, 1981; Mallants et al., 1997; Sobieraj, 2003). Disponer de valores precisos de esta propiedad a diferentes escalas permite entonces estimar la capacidad de infiltración para el conjunto de la cuenca, establecer su balance, su modelo funcional facilitando el diseño de estructuras para el control de avenidas, estimar la disponibilidad de agua para el crecimiento vegetal o la percolación hídrica para la recarga de los acuíferos (EPA, 1988b, a; Ragab y Cooper, 1993; Amézketa Lizarraga et al., 2002)

En el laboratorio, la conductividad hidráulica se mide de distintas formas. La más común requiere núcleos inalterados de suelo en los que se hace pasar agua a carga hidráulica constante (Mallants et al., 1997; Wu et al., 1999) o variable (Johnson et al., 2005). En campo usualmente se emplean simuladores de lluvia, que pretenden incluir los factores de distribución espacial de la lluvia y su torrencialidad *e.g.* (Osuna-Ceja y Padilla-Ramírez, 1998; Poulénard et al., 2001), infiltrómetros ó permeámetros, donde se mide directamente el flujo de agua al interior del suelo (Amoozegar, 1992; Elrick y Reynolds, 1992; Angulo-Jaramillo et al., 2000; Mertens et al., 2002; Matula, 2003; Ziegler et al., 2006), y

posteriormente se emplean soluciones analíticas para estimar la conductividad hidráulica (Elrick y Reynolds, 1992).

Al extraer la muestra empleando cilindros metálicos o plásticos, el continuo poroso del suelo se interrumpe favoreciéndose la formación de canales de conducción directa (tubos) entre la superficie superior y la inferior de la muestra (Mallants et al., 1997), y la eliminación de pequeñas burbujas de aire atrapado en el suelo presentes en condiciones de precipitación natural (Dafonte et al., 1999). Los valores de la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) se consideran como una mejor aproximación de lo que ocurre en eventos de precipitación natural, no así las mediciones de conductividad hidráulica (K_s) realizadas en laboratorio (Elrick y Reynolds, 1992). Mallants y colaboradores mencionan que "...deberán de preferirse medidas de conductividad hidráulica saturada de campo, sobre aquellas de laboratorio, ya que es mas probable que la primera técnica proporcione resultados mas representativos debido a la conservación de la estructura del suelo, además de que evita el fenómeno de los tubos directos[§]." (Mallants et al., 1997).

En el mercado especializado existen dispositivos para estimar la K_{fs} en campo; sin embargo, todos presentan un problema común, las superficies de medición que son pequeñas (20-1,963.5 cm²). Por ello las áreas de trabajo deben ser muestreadas intensamente para conseguir valores representativos, que se traduce en un número importante de equipos para estudiar la K_{fs} con un costo y en un tiempo razonable. Además, debido al peso y consumo de agua de varios equipos comerciales (anillos dobles), los puntos de muestreo deben situarse a poca distancia de un vehículo de apoyo, limitando su representatividad (Bagarello et al., 2004).

Sin embargo los métodos clásicos de medición de los volúmenes de agua que entran en el suelo son muy demandantes en tiempo por lo que la automatización

[§] Traducción libre del original en inglés. pg. 23.

de la toma de datos podría disminuir errores humanos y el tiempo (Amézketa Lizarraga et al., 2002; Johnson et al., 2005; Špongrová, 2006)

En este capítulo se presenta un dispositivo compacto, con un consumo mínimo de agua y bajo costo que permite calcular la K_{fs} que posteriormente fue automatizado.

Esta investigación tuvo objetivos secuenciales; a) construir un dispositivo de anillo sencillo, carga constante, de bajo costo y consumo de agua reducido, b) definir de un conjunto de tres métodos de cálculo, cual es el mejor método para estimar la K_{fs} para el dispositivo construido c) probar si existe diferencia entre el dispositivo construido y un aparato comercial de referencia, d) probar la sensibilidad del dispositivo para detectar diferencias en la K_{fs} relacionadas a la variación en la textura del suelo, y posteriormente e) diseñar, construir y probar un dispositivo de automatización digital para dicho infiltrómetro.

El dispositivo construido ha sido denominado Infiltrómetro Portátil de Carga Constante y Anillo Sencillo (IPCCAS) y su descripción y prueba se encuentran aceptados para publicación en la revista Terra Latinoamericana Reg.1538 (Anexo 2).

Descripción y Construcción del Dispositivo

El dispositivo es una variante de los infiltrómetros de presión descritos por Elrick y Reynolds (1992) y Fortín (2003), y se clasifica como un infiltrómetro de presión de anillo sencillo (Angulo-Jaramillo et al., 2000; Esteves et al., 2005). Este tipo de dispositivos han sido utilizados previamente en la caracterización de la K_{fs} (Prieksat et al., 1992; Wu et al., 1999; Mertens et al., 2002; Matula, 2003). Y aunque existen diversos modelos comerciales (Fregoso *com. pers.* 2006), no se encontraron referencias sobre su construcción o aplicación en México.

El IPCCAS está construido en tres partes; la primera es el reservorio principal, formado por una botella de Mariotte construida con dos tubos de Plexiglas (polimetil-metacrilato) con diámetros de 63.5 mm y 9.0 mm, el mas grueso sellado por 2 tapones de goma (No.12) perforados para albergar uno el tubo de

burbujeo en la parte superior (tubo de 9.0 mm Diámetro) y el otro un tubo de salida de agua en la parte inferior. El Mariotte tiene adosada una regla flexible graduada en milímetros. En el tubo de salida se conecta una manguera con una válvula de paso.

La segunda parte, está compuesta por un anillo de hierro o acero de 88.0 mm diámetro y 80.0 mm longitud con tapa hermética y una campana hembra (para conectar la llave de paso), un tubo de purga soldado herméticamente y un mango de inserción que permite montar y desmontar el anillo fácilmente. En el tubo de purga se inserta un trozo de manguera de goma como empaque y un tubo de Plexiglas de 12.0 mm Diámetro y 200.0 mm longitud que sirve para medir la carga hidráulica aplicada.

La tercera parte (la base de soporte) se compone del disco de base y la caña de inserción fabricados ambos en PVC.

El dispositivo es similar al empleado por Prieksat y colaboradores (1992) difiriendo en que en nuestro caso, el anillo y el Mariotte se encuentran separados físicamente y conectados por una manguera flexible, lo que facilita el proceso de recarga del Mariotte, sin afectar la inserción del anillo. Además la base permite fijar el dispositivo con estacas en sitios con pendiente y que el tubo de burbujeo permite ajustar la carga hidráulica deseada.

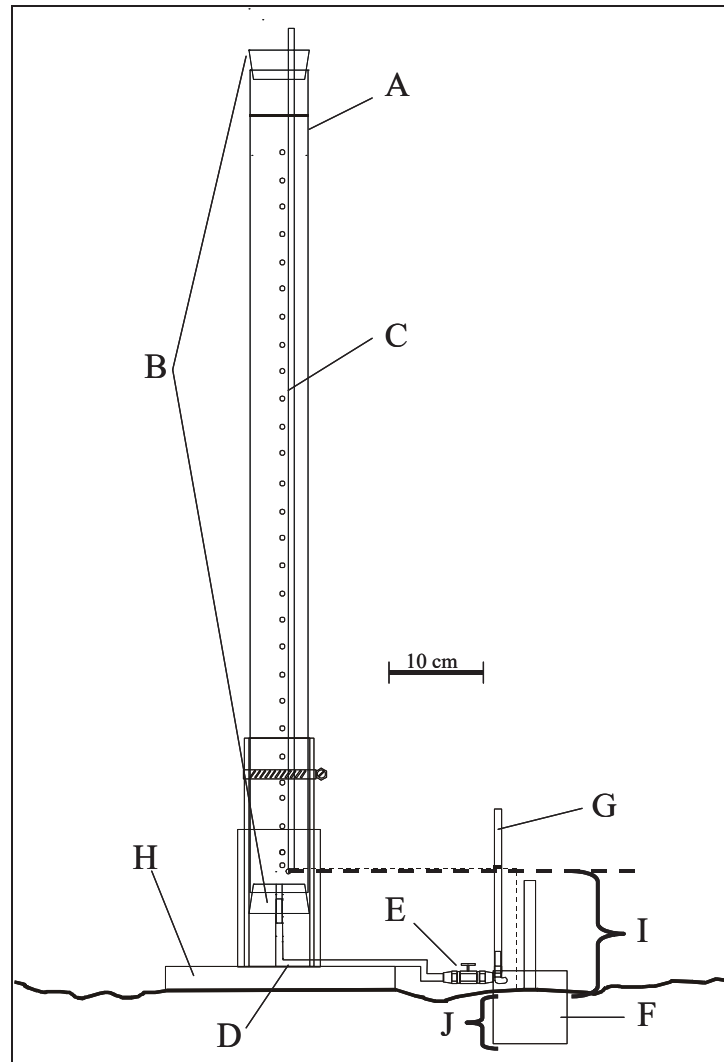


Figura 2.1. Esquema del IPCCAS armado y montado en campo; A) Reservorio principal (Mariotte 63.5 mm Diámetro), B) Tapones de goma No.12, C) Tubo de burbujeo (9.0 mm Diámetro), D) Tubo de salida de agua, E) Válvula de paso, F) Anillo sencillo (88.0 mm Diámetro y 80.0 mm longitud), G) Tubo de purga y medición de la carga hidráulica, H) Base de soporte, I) Carga hidráulica constante, J) Profundidad de inserción del anillo (60.0 mm)

La Figura 2.1 muestra el aspecto general del dispositivo ensamblado y montado para la medición en campo. El dispositivo puede construirse con materiales de bajo costo disponibles en una ferretería, teniendo un costo aproximado de \$ 600.00 (MN) en total.

Descripción de la unidad de Automatización

La unidad de automatización está basada en un sensor de presión diferencial de acuerdo con lo recomendado por Ankeny (1992), Casey y Derby (Casey y Derby, 2002) y Špongrová (2006), en lugar de un sensor de presión como en el dispositivo de Ankeny y colaboradores (1988) o en dos sensores de presión sincronizados de Preiksats y colaboradores (1992).

La unidad de automatización comprende a su vez tres partes, la primera es un sensor de presión diferencial. En este caso se empleó un circuito integrado piezométrico compensado por temperatura, de la serie MPX2010DP de Motorola/Free Scale Inc. que proporciona la altura del nivel del líquido a partir de un transductor piezométrico, el cual bajo presión genera una corriente eléctrica. El rango de respuesta se encuentra entre los 0 y 0.025 volts, para presiones entre 0 y 10 kPa (equivalente a 0 y 1.0197 m H₂O) con operatividad entre -40 y 125° C e histéresis de presión ± 0.1 kPa (Motorola, 2002). Este circuito integrado se encuentra pre-calibrado y compensado por la temperatura. El fabricante reporta una relación lineal entre la presión diferencial aplicada y el voltaje de salida. En la Figura 2.2 se muestra el sensor en su presentación de caja plástica 344C, con tomas de fluido paralelas y el esquema de compensación por temperatura.

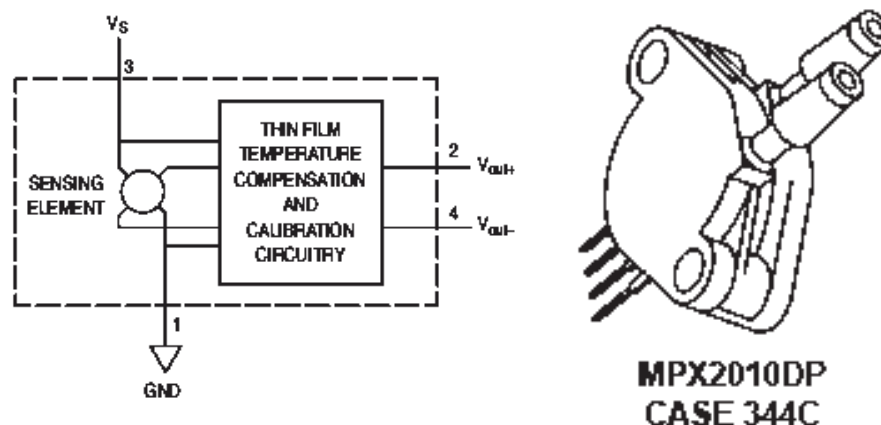


Figura 2.2. Esquema del sensor de presión calibrado y compensado por la temperatura y dibujo del sensor en presentación 344C (cubierta plástica), con entradas de fluido paralelas (Motorola, 2002))

Sin embargo, este circuito integrado requiere que la fuente de alimentación sea constante y sin variaciones para que la señal de salida sea confiable.

La segunda parte es un circuito de entrega de energía y acondicionamiento de señal. El cual mantiene la alimentación del sensor de presión constante y elimina las variaciones de voltaje. Además realiza un escalamiento de la señal analógica del sensor diferencial con rango 0 a 0.025 volts a un rango de 0 a 33 volts. Esto significa que el escalamiento "total" del sensor de presión al dispositivo de almacenamiento es de aproximadamente 1320 veces. Este circuito funciona con una batería de 9.0 volts (9V; 17.5 x 48.5 x 35.6 mm).

La tercera parte es un dispositivo de almacenamiento de datos no volátil (EL-USB3, LASCAR, Inc.) programable con un rango de recepción de 0 a 30 voltios. Este dispositivo requiere de una señal amplificada y escalada. El EL-USB3 se habilita para la adquisición y registro de datos en intervalos preprogramados que van desde 1 segundo hasta 12 horas, alcanzando a almacenar 32,510 registros, se conecta fácilmente mediante dos cables que se insertan en entradas estándar de 1.5 mm de diámetro y se aseguran con tornillos incluidos en el logger.

El EL-USB3 digitaliza la información analógica en datos con formato de 10 bits y el usuario puede programar en forma sencilla el intervalo de adquisición de toma de un conjunto de opciones predeterminadas (1s, 10s, 1min, 5min, 30min, 1hr, 6hr y 12hr), así como la hora de inicio de adquisición. Los datos pueden ser descargados a una computadora personal vía puerto USB empleando el programa proporcionado por el fabricante. Esta unidad tiene una demanda autónoma de energía por lo que emplea una batería desechable de litio tamaño ½ AA de 3.6 Volts, de vida prolongada que llega a durar hasta 1 año bajo uso normal (LASCAR-Inc., 2007)

En el infiltrómetro, la implementación de la unidad de automatización requiere de un segundo tubo dentro del Mariotte, el cual conecta el sensor con la cámara de aire en la parte superior del reservorio principal (Figura 2.5), un sistema de montaje y aseguramiento del sensor a la parte inferior de la caña de soporte, así

como otro sistema de aseguramiento para el contenedor del circuito (50 x 150 x 70 mm), puede utilizarse para este fin correas de velcro o ligas recubiertas.

El sensor se calibró previo al ensamblado de la unidad de automatización, aplicando un voltaje de 9 volts de entrada y una columna de agua con alturas entre 0.0 y 85.0 cm incrementando en intervalos 5 ó 10 c. Se obtuvieron dos ecuaciones mediante ajuste de mínimos cuadrados que describen la relación entre la altura de la columna y el voltaje de salida. Utilizando incrementos de 5 cm se obtuvo la ecuación $y=0.04091 x + 1.16627$ con $R^2=0.9996$ y $P<0.0001$ (N=18), mientras que para incrementos de 10 cm la ecuación obtenida fue $y=0.04126 x + 1.179$, con $R^2=0.9986$ y $P<0.0001$ (N=9).

Estas ecuaciones permiten calcular la altura de la columna de agua a partir de un voltaje de salida.

METODOLOGÍA

Área de Estudio

Para probar el dispositivo se realizaron mediciones de campo en dos zonas, la primera, ubicada en el volcán Jorullo, dentro de el Área Natural Protegida Reserva Patrimonial "Volcán Jorullo" en la cuenca del Río Balsas y la segunda en el sur de la ciudad de Morelia, en la cuenca de Cuitzeo, ambas en el Cinturón Volcánico Mexicano, en el estado de Michoacán, México (Figura 2.3). Los sitios difieren en ubicación geográfica, tipo de suelo, posición topográfica (Tabla 2.1) y condiciones climáticas.

Al sur de Morelia, en Atécuaro presenta cobertura herbácea de especies anuales. Cointzio tiene cobertura herbácea y de arbustos espinosos (<10%). Umécuaro tiene uso agrícola de temporal y cobertura herbácea de especies anuales. Huiramba tiene vegetación incipiente (gramíneas) mientras que Jorullo presenta cobertura de selva baja caducifolia abierta (SERINE, 2006). Todos los sitios presentaron pendientes bajas; menores al 10%.

En cuanto al clima, Atécuaro, Cointzio, Umécuaro y Huiramba tienen clima templado subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004) con temperatura promedio anual de 16.7°C, precipitación promedio anual es de 849.3 mm. El Jorullo tiene un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, con temperatura media anual de 27.4 °C, y precipitación promedio anual de 930.9 mm (García, 2004).

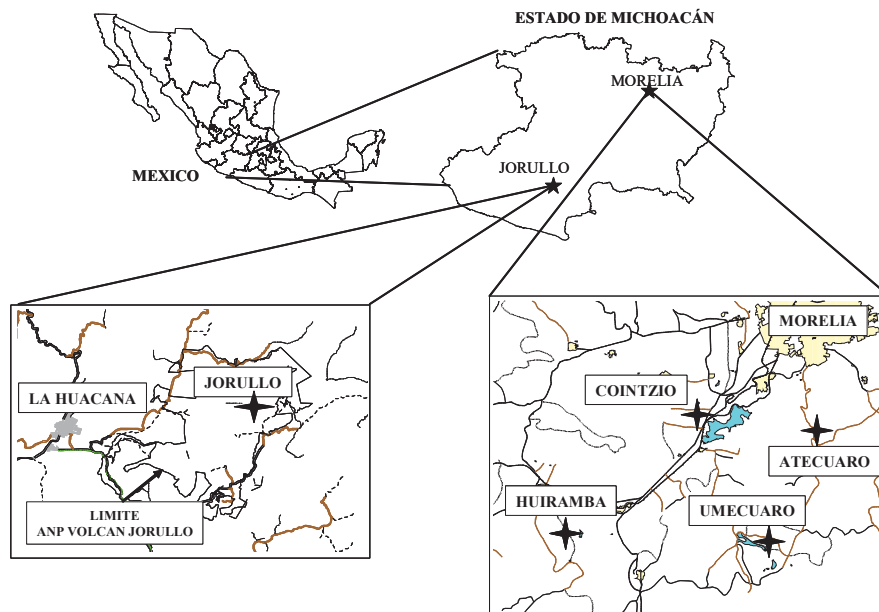


Figura 2.3. Ubicación de las zonas y sitios de muestreo

Adquisición de Datos

Se realizaron ensayos en los cinco sitios (Tabla 2.1) entre diciembre 2005 y febrero 2006 (época sin lluvias), con varias réplicas (Tabla 2.2) y distintos arreglos en cada sitio. Se empleó agua potable purificada o de la toma municipal cuyas características químicas se resumen en la Tabla 2.3.

El anillo se insertó en el suelo una profundidad de 60.0 mm empleando un martillo de goma. Se ajustó el tubo de burbujeo para la primera carga (h_1) (entre 10.0 y 130.0 mm.), una vez estabilizada ésta, se midió y se tomaron lecturas cada minuto en los primeros cinco minutos y después cada cinco minutos hasta

alcanzar un gasto estable (q_1) indicativo de la fase estacionaria ó 1.5 horas. En los suelos arenosos se registró cada minuto hasta alcanzar un gasto estable (q_1) o 0.5 horas. En todos los ensayos, una vez alcanzado el flujo estacionario o el tiempo preestablecido, se levantó la carga (h_2) (entre 20.0 y 180.0 mm.) ajustando el tubo de burbujeo y se realizaron registros nuevamente cada minuto para los suelos arenosos o cada cinco minutos para los demás, durante una hora más o hasta alcanzar un gasto estable (q_2).

Tabla 2.1. Ubicación y características de los sitios de muestro.

| Zona | Sitio | Coordenadas | Textura | Observaciones |
|--------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------|--|
| Sur de la cuenca de Cuitzeo | Volcán Jorullo | 101°43'23" W 18°56'49" N | Arenosa-franca | Arenosoles téfricos y háplicos [†] (SERINE, 2006) en ladera baja de cono volcánico |
| | Umécuaro | 101°14'15" W 19°31'6" N | Franco-Limosa | Ladera baja con Andosol húmico [‡] sobre basalto (INEGI, 1978d, 1979a) |
| | Cointzio | 101°16'55" W 19°38'6" N | Franco Arcillosa | Hombro de ladera, superficie cumbral y ladera alta en lomerío ignimbrítico |
| | Valle de Atécuaro (Zimpanio Sur) | 101°11'34" W 19°36'12" N | Arcillo-limosa | Valle aluvial, Acrisol órtico [‡] sobre basalto (INEGI, 1978d, 1979a) |
| | Huiramba | 101°24'21" W 19°31'7" N | Areno-limosa | Ladera baja de cono cinerítico, Acrisoles órticos y Litosoles [‡] sobre basalto (INEGI, 1978d, 1979b) |

[†]WRB, 1999 (FAO, 1999), [‡] Leyenda FAO, 1970 (INEGI, 1979a, 1982b)

Al terminarse el ensayo se dejó drenar 2 minutos, se retiró el anillo y se tomó una muestra de suelo del interior del anillo, para conocer el contenido de humedad final (θ_f) por método gravimétrico NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002). Previo al ensayo se obtuvo una muestra superficial tomada a una distancia de 100 mm. del punto de inserción del anillo, con un cilindro metálico con 54.5 mm de diámetro y 50.0 mm longitud. y calcular la humedad inicial (θ_i) NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2002) y la densidad aparente por el método del

núcleo (Miller y Donahue, 1990). Con la muestra del anillo se determinaron además, densidad real por el método del picnómetro, textura por el método del hidrómetro de Boyoucos y contenido de materia orgánica por oxidación en húmedo Walkley y Black (DOF, 2002). Con fines comparativos se realizaron mediciones en los mismos sitios utilizando el permeámetro Guelph (Soil-Moisture-Equipment-Corp., 1991), excepto en los suelos arenosos, carentes de estructura, donde no pudo instalarse debido al colapso de la perforación en la superficie del suelo. En la Tabla 2.2 se indica el número de repeticiones realizadas con este dispositivo.

Tabla 2.2. Uso del suelo, estructura, número de repeticiones por sitio N y arreglo espacial en cada sitio.

| Zona | Sitio | Uso/Estructura | N (N Guelph) | Observaciones |
|-----------------------------|----------------------------------|---|-----------------|--|
| Volcán Jorullo | Volcán Jorullo | Ganadería extensiva/sin estructura | 12 | 3 transectos de 4 puntos perpendiculares a la pendiente, espaciados aprox. 2 m entre puntos y aprox. 2 m entre transectos. |
| | Umécuaro | Agricultura de temporal en descanso (1 año)/granular y bloques subangulares débilmente desarrollada | 36 (6) | Tres transectos de 6 puntos que se cruzan en el centro, uno perpendicular y otro en el sentido principal de la pendiente, con puntos separados 3 m |
| Sur de la cuenca de Cuitzeo | Cointzio | Ganadería extensiva/bloques subangulares moderadamente desarrollada | 25 (17) | Transecto de 25 puntos con espacio de 5m en sentido de la pendiente |
| | Valle de Atécuaro (Zimpanio Sur) | Ganadería extensiva/bloques subangulares fuertemente desarrollada | 28 (15) | Tres transectos de 10 puntos a cada 5 m y 5 m entre transectos |
| | Huiramba | Ganadería extensiva/sin estructura | 8 | Dos transectos de 4 puntos con 2 m entre sitios y 1 m entre transectos |
| No total de Puntos | | | 109 (38) | |

Entre paréntesis se indica el número de observaciones realizadas con el Permeámetro de Guelph, en los sitios Volcán Jorullo y Huiramba no se pudo instalar el Permeámetro de Guelph.

Tabla 2.3. Características químicas del agua empleada en los ensayos de infiltración.

| Fuente del agua | pH | CE | Cationes | | | | Aniones | | | |
|--------------------|------|--------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| | | | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ⁺ | Mg ⁺ | CO ₃ ⁻ | HCO ₃ ⁻ | Cl ₂ ⁻ | SO ₄ ⁻ |
| Purificada Potable | 6.37 | 216.10 | 8.39 | 2.80 | 42.00 | 39.60 | 0.00 | 67.10 | 47.92 | 19.20 |
| Toma Municipal I | 6.21 | 348.00 | 44.73 | 4.16 | 52.00 | 34.80 | 0.00 | 189.10 | 21.30 | 14.40 |
| Toma Municipal II | 6.76 | 302.00 | 36.72 | 8.32 | 44.00 | 32.90 | 0.00 | 140.30 | 28.40 | 16.80 |

Conductividad eléctrica (CE) en μs , aniones y cationes en $mg \cdot l^{-1}$

Métodos de Cálculo de la Conductividad Hidráulica Saturada de Campo

El proceso de infiltración desde un infiltrómetro de anillo sencillo suele representarse con una gráfica de infiltración acumulada donde el tiempo se ubica en eje de las ordenadas y la infiltración acumulada en las abscisas, pueden diferenciarse dos fases; la fase transitoria presenta una sucesión de puntos con cambio rápido de pendiente partiendo del origen y está dominada por el componente capilar del suelo, mientras que la fase estacionaria tiene comportamiento de una línea recta, con una pendiente estable y está dominada por el componente gravitacional y la K_{fs} (Elrick y Reynolds, 1992).

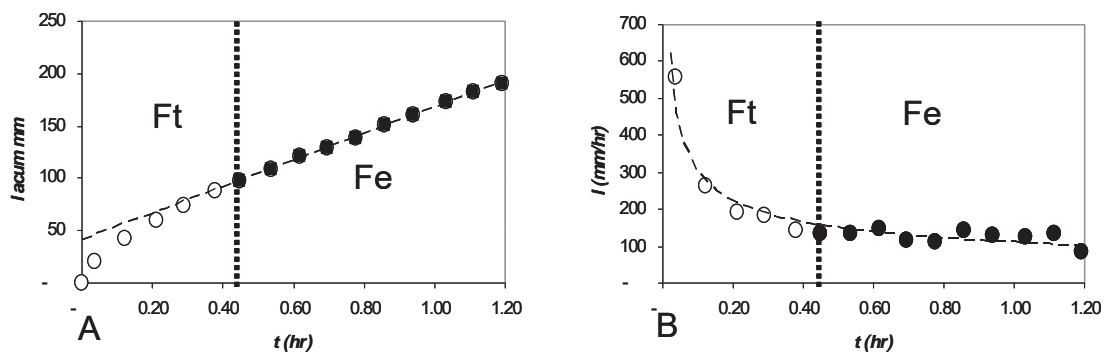


Figura 2.4. Curvas experimentales de infiltración acumulada (A) e infiltración instantánea (B). Se diferencian dos fases; la fase transitoria (Ft) o de humectación con flujo no estacionario, en la cual tanto los valores de infiltración acumulada como de infiltración instantánea cambian dentro de un tiempo corto. La fase estacionaria (Fe) con flujo saturado de campo presenta una tendencia lineal en la curva de infiltración acumulada (A) y una estabilización de la infiltración instantánea (B). La línea vertical representa el umbral de humedad del suelo que separa ambas fases.

Otra forma de representar la infiltración en función del tiempo es poner en las ordenadas el tiempo y en las abscisas la infiltración instantánea o tasa de infiltración I reportada como lámina/tiempo. Esta curva presenta una forma de J invertida, donde también se distinguen las dos fases. En la Figura 2.4 se muestran ambas formas de representar la infiltración como una función del tiempo.

Matemáticamente el flujo de agua en fase estacionaria (régimen estacionario) de un infiltrómetro de anillo sencillo puede representarse como:

$$Q_{PI} = \pi r^2 K_{fs} + (r/G_{PI}) (K_{fs} * h + \phi_m)$$

Donde Q_{PI} es el flujo de agua fuera del infiltrómetro, π es una constante (3.1416), r es el radio del anillo, K_{fs} es la conductividad hidráulica saturada de campo, h es la altura de carga y ϕ_m es componente capilar (Reynolds y Elrick, 1991; Elrick y Reynolds, 1992). El producto $K_{fs} * h$ representa el componente de la presión hidrostática del flujo y G_{PI} es el parámetro de forma $G_{PI} = 0.316(d/r) + 0.184$, donde d es la profundidad de inserción del anillo y r su radio.

El flujo Q_{PI} por lo tanto depende de la combinación de los flujos vertical y horizontal en el suelo (Tricker, 1978).

Wu y Pan (1997) desarrollaron una solución generalizada para infiltrómetros de anillo sencillo utilizando escalamiento tridimensional axisimétrico a partir de la ecuación de Richards;

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [K(h) \nabla h] - \frac{\partial K}{\partial z}$$

Donde θ es el contenido volumétrico de agua, h es la carga hidráulica, z corresponde a la profundidad y t es el tiempo. La conductividad hidráulica K se asume constante para un medio poroso saturado, pero varía dependiendo de θ o h en medios no saturados (Wu y Pan, 1997). Estos autores utilizaron la función de van Genuchten (1980) para resolver numéricamente la ecuación de Richard y solucionaron el problema de la complejidad del flujo tridimensional de una fuente

finita inundada y realizaron una evaluación numérica de su funcionalidad (Wu et al., 1997).

Posteriormente y aplicando la solución generalizada de Wu y Pan (1997), Wu y colaboradores (1999) desarrollaron dos métodos para calcular la K_{fs} a partir de datos de infiltración acumulada.

En este trabajo se aplicaron ambos métodos de Wu et al., (1999), además de un tercer método denominado de Dos Cargas para Anillo Sencillo (DCAS) para calcular la K_{fs} . Los métodos se describen brevemente a continuación. Para mayor detalle sobre los métodos el lector puede consultar los trabajos de Wu y Pan (1997), Wu et al., (1999), Reynolds y Elrick (1991) y Reynolds (2000).

Método Wu1

El primero de los métodos de Wu (Wu1 en lo sucesivo) utiliza datos de la curva de infiltración acumulada, sin necesidad de separar los datos de la fase transitoria y la estacionaria, y adopta la forma:

$$K_{fs} = (\Delta\theta \cdot \lambda_s) / T_c \quad [1]$$

Siendo K_{fs} la conductividad hidráulica saturada de campo, $\Delta\theta = \theta_f - \theta_i$; la diferencia en el contenido de humedad al inicio (θ_i) y final del ensayo (θ_f), donde además;

$$\lambda_s = 1/2[\{(h+G)^2 + 4GC\}^{1/2} - (h+G)]$$

$$T_c = 1/4 \cdot (Ba/bA)^2$$

$$C = 1/4 \Delta\theta \cdot (B/b)^2 \cdot (a/A)$$

Donde h es la carga hidráulica, G es el factor de forma; $d+(r/2)$, d es la profundidad de inserción del anillo y r el radio de este. A y B son coeficientes obtenidos por regresión de mínimos cuadrados para los datos de infiltración tiempo vs lámina acumulada, $a=0.9084$ y $b=0.1682$ correspondientes al intercepto y pendiente de la ecuación generalizada (Wu et al., 1999).

Este método se aplicó utilizando la primera (h_1) y la segunda carga (h_2) carga hidráulica.

Método Wu2

El segundo método de Wu y colaboradores (1999) (Wu2 en lo sucesivo), utiliza datos de la fase estacionaria de la curva de infiltración acumulada (tiempo vs lámina acumulada, ver Figura 2.4A) y emplea los coeficientes del intercepto y la pendiente de la ecuación generalizada $a=0.9084$ y $b=0.1682$ (Wu et al., 1999).

La solución con este método adopta la siguiente forma:

$$K_{fs}=A/(af) \quad [2]$$

Donde K_{fs} es la conductividad hidráulica saturada de campo, A es la pendiente de la recta obtenida por regresión de mínimos cuadrados (tiempo vs lámina acumulada), $a=0.9084$ es el intercepto de la ecuación generalizada obtenida por Wu y colaboradores (1999). El parámetro f se define a su vez como:

$$f=\{[h+(1/\alpha^*)]/G^*\}+1$$

donde h es la carga hidráulica, G^* es el factor de forma, análogo a G en el método de Wu1 definido como $G^*=d+(r/2)$, donde d es la profundidad de inserción del anillo y r el radio de este.

El valor de α^* representa el componente capilar. Los valores para α^* se tomaron de la tabla de Elrick y Reynolds (1992): p.10.

De acuerdo a las recomendaciones de estos autores α^* adquirió los valores de; 4 m^{-1} para la Arcilla Atécuaro, 12 m^{-1} para el Limo Umécuaro y el suelo Franco Cointzio y 36 m^{-1} para la Arena Huiramba y la Arena Jorullo.

Método DCAS

El método de Dos Cargas para Anillo Sencillo (DCAS) emplea datos de lámina acumulada de la fase estacionaria, específicamente los gastos (q_1 y q_2) para dos cargas hidráulicas (h_1 y h_2), además del valor Γ (Gamma) o factor de forma que relaciona la profundidad de inserción del anillo d y el radio del anillo (r). El método DCAS permite calcular la K_{fs} empleando las siguientes ecuaciones:

$$K_{fs}=\pi r \Gamma^* [(q_2-q_1)/(h_2-h_1)] \quad [3]$$

$$\Gamma=0.316*(d/r)+0.184 \quad [4]$$

Permeámetro de Guelph

La K_{fs} con el permeámetro Guelph se obtuvo aplicando el método recomendado por el fabricante (Soil-Moisture-Equipment-Corp., 1991).

Pruebas del infiltrómetro automático

Se llevaron a cabo pruebas en laboratorio y campo. En laboratorio se midió la altura de la columna en niveles fijos con burbujeo inducido, ascenso y descenso de la columna de agua. En campo se utilizó para obtener datos de infiltración de distintos suelos.

Pruebas de laboratorio

En laboratorio las pruebas tienen la finalidad de conocer la eficiencia del dispositivo de automatización a la variación de tensión inducida por burbujeo, para ello se implementó un montaje similar al utilizado por Ankeny (1992), la diferencia principal es la sustitución de la línea de vacío por un segundo reservorio de Mariotte que al desalojar agua, genera un vacío. La unidad de automatización se programó para registrar información a intervalos cada 1 y 10 segundos, mientras que el tiempo total de la prueba fue de aproximadamente 10 minutos obteniéndose dos tamaños de muestra $N=601$ para el intervalo de 1 segundo y $N= 61$ para el intervalo de registro de 10 segundos.

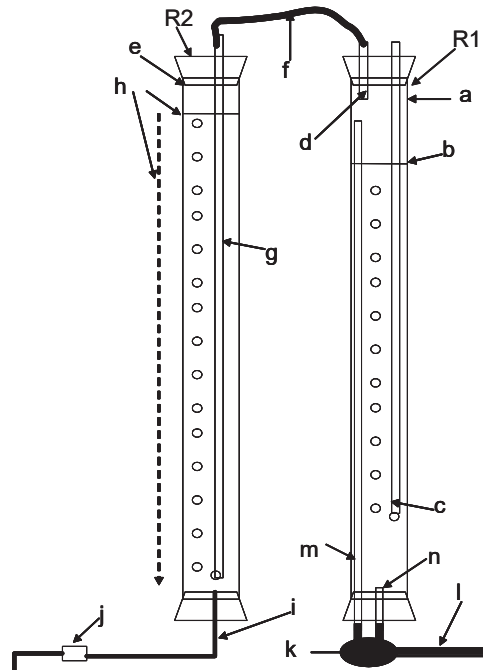


Figura 2.5. Esquema de montaje para prueba de sensibilidad al burbujeo. a) Reservorio R1, b) Nivel de agua constante en R1, c) Tubo de burbujeo en R1, d) Tubo en cámara aérea R1, e) Reservorio R2, f) Conexión entre los dos reservorios R1 y R2, g) Tubo de burbujeo en R2, h) Nivel de agua descendente R2, i) Tubo de salida de agua R2, j) Válvula de regulación, k) Sensor diferencial, l) Conexión al data logger, m) Tubo de referencia cámara de aire-sensor, n) Tubo de columna de agua-sensor.

La Figura 2.5 muestra el montaje del sistema de burbujeo. Este funciona con dos reservorios Mariotte interconectados. El primer reservorio (R1) mantiene un nivel constante (a y b). El burbujeo (c) se genera cuando la columna de agua del segundo reservorio (R2) desciende (h) al abrir la válvula de regulación (j). Este descenso genera una succión en la cámara de aire de R1, interconectada con el tubo de burbujeo de R2 (d, e, f, g).

El sensor diferencial se encuentra ubicado en la parte inferior de R1 (Figura 2.5k) y tiene dos tomas, (m) a la cámara de aire de R1 y (n) a la base de la columna de agua en el mismo reservorio.

Después de las pruebas de burbujeo se realizaron pruebas de ascenso y descenso de la columna de agua, con un montaje similar al empleado en campo, únicamente sin insertar el anillo en el suelo. En estas pruebas se llenó el infiltrómetro y posteriormente se abrió la válvula de paso. Esto se repitió varias veces con distintos niveles de apertura de la válvula. Se obtuvieron registros de

altura de la columna en forma automática cada segundo y manual cada 30 segundos y se analizó la relación entre ambas formas de medición.

Pruebas de campo

Con el fin de evaluar el funcionamiento del infiltrómetro automatizado en condiciones de campo, se llevaron a cabo pruebas en varias de las formaciones previamente mencionadas Arcilla Atécuaro, Limo Umécuaro, Franco Cointzio, además de la Arena la Joya que es un material muy similar a la Arena Huiramba, la Tabla 2.4 muestra la relación de las pruebas de campo del infiltrómetro automatizado.

Tabla 2.4. Relación de sitios de muestreo, repeticiones e intervalo de adquisición de datos para las pruebas de campo.

| Sitio | Intervalo de adquisición y Repeticiones Automático | Intervalo de adquisición y Repeticiones Manual |
|------------------|--|--|
| Arcilla Atécuaro | 5 min N=5 | 5 min N=5 |
| Limo Umécuaro | 1 min N=7 | 1 min N=7 |
| Franco Cointzio | 1 min N=8 | 1 min N=8 |
| Arena La Joya | 10 seg N=5 | 1 min N=5 |

Análisis

La K_{fs} obtenida por los distintos dispositivos (IPCCAS y Guelph) y por diferentes métodos se comparó empleando un análisis de varianza, donde los métodos fueron tomados como tratamientos, siendo el permeámetro de Guelph el dispositivo y método de referencia. En caso de presentarse diferencia entre alguno de los tratamientos se realizó una prueba de Diferencia Significativa Honesta de Tukey para tamaño de muestra desigual de Spjotvoll & Stoline

(StatSoft_Inc., 1998), (Tukey DSH en lo sucesivo) en su variante de formación de grupos homogéneos (StatSoft_Inc., 1998). Para la segunda parte del análisis respecto a la sensibilidad y la variación en la textura, los sitios (con distintas texturas) fueron tomados como tratamientos.

En el caso del segundo y tercer objetivo las hipótesis fueron:

Ho: No existe diferencia significativa entre los tratamientos (dispositivo-método).

Ha: Existe diferencia significativa entre un par de tratamientos (dispositivo-método).

Para el cuarto objetivo las hipótesis fueron:

Ho: No existe diferencia significativa entre los tratamientos (sitio-textura).

Ha: Existe diferencia significativa entre un par de tratamientos (sitio-textura).

Mientras que para el último objetivo relacionado con las pruebas de la unidad de automatización las hipótesis fueron:

Ho: Las medias de las poblaciones son iguales (sitio-método)

Ha: Las medias de las poblaciones son distintas (sitio-método)

Los ajustes se realizaron empleando el programa ORIGIN V7.0220 OriginLab Corp. y los análisis estadísticos se llevaron a cabo dentro del STATISTICA para Windows (StatSoft_Inc., 1998).

RESULTADOS

Se realizó un total de 147 ensayos de infiltración, 38 con el permeámetro Guelph y 109 con el IPCCAS. Las características de los suelos superficiales se presentan en la Tabla 5.

En general, los suelos se encontraban muy secos al inicio de los ensayos de infiltración ($\theta < 0.1 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) a excepción del Limo Umécuaro y la Arcilla Atécuaro (0.114 y $0.285 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). Los Andosoles (Limo Umécuaro) son suelos con gran capacidad de retención de humedad, mientras que topográficamente la Arcilla

Atécuaro se ubica en un valle aluvial, por lo que el elevado contenido de humedad inicial puede ser producto de la humedad residual.

Tras los ensayos, los contenidos de humedad variaron en los distintos suelos, siendo mas elevado el del Limo Umécuaro (Andosol) con $0.742 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$, y los menores los de las Arenas Jorullo y Huiramba (0.287 y $0.268 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) respectivamente, confirmando la baja capacidad de retención de humedad de estos materiales. Como se esperaba, el mayor cambio en el contenido de humedad se observó en el Limo Umécuaro ($0.627 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), mientras que el menor se presentó en la Arcilla Atécuaro ($0.193 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$), posiblemente debido a que el suelo se encontraba ya con un contenido de humedad considerable antes del ensayo y durante este alcanzó la condición de saturación (Tabla 2.5).

Tabla 2.5. Características de los suelos.

| Sitio | $\theta_i \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | $\theta_f \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | $\frac{\Delta\theta}{3} \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | DA $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | DR $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | EP $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ | MO % |
|---------------------|--|--|--|--|--|--|---------|
| Arcilla Atécuaro | 0.295 | 0.489 | 0.193 | 1.317 | 2.224 | 0.570 | 2.082 |
| | (0.034) | (0.084) | (0.081) | (0.119) | (0.254) | (0.047) | (0.565) |
| | N=28 | N=27 | N=27 | N=27 | N=27 | N=24 | N=25 |
| Limo Umécuaro | 0.114 | 0.742 | 0.627 | 0.704 | 1.942 | 0.370 | 5.190 |
| | (0.55) | (0.079) | (0.139) | (0.069) | (0.70) | (0.038) | (0.561) |
| | N=23 | N=23 | N=23 | N=28 | N=27 | N=26 | N=28 |
| Franco Cointzio | 0.047 | 0.406 | 0.366 | 1.040 | 2.40 | 0.437 | 4.328 |
| | (0.012) | (0.088) | (0.085) | (0.10) | (0.32) | (0.066) | (1.048) |
| | N=26 | N=26 | N=26 | N=28 | N=26 | N=26 | N=25 |
| Arena Jorullo | 0.026 | 0.287 | 0.262 | 1.18 | 2.71 | 0.522 | 2.530 |
| | (0.025) | (0.08) | (0.071) | (0.217) | (0.248) | (0.712) | (1.251) |
| | N=13 | N=12 | N=12 | N=12 | N=12 | N=12 | N=12 |
| Arena Huiramba | 0.052 | 0.268 | 0.215 | 1.217 | 2.18 | 0.451 | 1.10 |
| | (0.056) | (0.036) | (0.060) | (0.83) | (0.342) | (0.066) | (0.45) |
| | N=8 | N=8 | N=8 | N=8 | N=8 | N=8 | N=8 |

θ_i (humedad inicial), θ_f (humedad final), $\Delta\theta$ (diferencia de humedad), DA (densidad aparente), DR (densidad real), EP (espacio poroso), MO (materia orgánica), el primer valor corresponde al promedio, el número entre paréntesis a la desviación estándar y N al número de muestra

Contrario a lo esperado el mayor espacio poroso se observó en la Arcilla Atécuaro ($0.570 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) y el menor espacio poroso se encontró en el Limo Umécuaro ($0.370 \text{ cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$). Diversos autores han reportado cambios en la porosidad de suelos volcánicos como resultado de actividades agrícolas y pecuarias (Ball et al., 1997; Singleton et al., 2000).

En cuanto a la materia orgánica, como se esperaba el Limo Umécuaro mostró el mayor contenido (5.190 %) considerado normal para suelos de origen volcánico (Porta et al., 1999), seguida por el Suelo Franco Cointzio (4.328 %). El menor contenido se presentó en la Arena Huiramba (1.10 %), que se explica por la vegetación escasa en el área y el intemperismo incipiente del material.

Respecto a la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}), la Tabla 2.6 resume los resultados. En la Arcilla Atécuaro se obtuvieron los menores valores de K_{fs} de todo el estudio (5.47, 2.23 y $2.78 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$). Para el Limo Umécuaro, el IPCCAS con el método DCAS generó valores de K_{fs} negativos en cuatro de los ensayos por lo que fueron excluidos del análisis. De forma similar el permeámetro Guelph produjo resultados negativos en cuatro de los seis ensayos practicados en el sitio, y fueron eliminados (Tabla 2.6).

El análisis estadístico (ANOVA de una vía) para este sitio, rechaza la hipótesis nula (H_0), por lo que existe diferencia significativa entre los tratamientos (dispositivo-método) ($F=11.513$, $P<0.001$). La prueba de Tukey DSH indicó que existen diferencias significativas entre el IPCCAS con el método DCAS respecto al mismo dispositivo pero con los métodos de Wu1_h1 ($P=0.0001$), Wu2_h1 ($P=0.0035$) y Wu2_h2 ($P=0.0257$). No se presentó diferencia significativa entre los dos métodos de Wu para estimar la K_{fs} , tampoco se encontró diferencia significativa entre el IPCCAS con el método DCAS y el permeámetro de Guelph (Tabla 2.6).

Para el suelo franco de Cointzio, se encontró diferencia significativa al menos para un par de tratamientos (dispositivo-método) ($F=3.8493$, $P=0.0059$; se rechaza la hipótesis nula). El método DCAS, generó resultados negativos para 12.5 % de los ensayos en este sitio. La media relativamente alta del

permeámetro Guelph ($325.73 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) estuvo afectada por el valor máximo de K_{fs} $1,565 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$. En este sitio se observó la presencia de galerías de tuzas, probablemente *Thomomys umbrinus* (Apátiga, com. pers.) y se considera que el valor disparado de K_{fs} se encuentra asociado a la presencia de galerías. Ningún otro método registró una K_{fs} similar en este sitio.

Tabla 2.6. Conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$, para cada sitio y método empleado.

| Sitio | Wu1_h1 | Wu2_h1 | Wu2_h2 | DCAS | Guelph |
|------------------|--------------|---------------|-----------|-----------------|---------------|
| | 5.497 | 2.231 | | | 2.782 |
| Arcilla Atécuaro | (8.163) | (3.185) | ---- | --- | (2.584) |
| | N=26 | N=26 | | | N=13 |
| | a | a | | | a |
| | 79.551 | 150.401 | 191.27 | 508.92 | 95.05 |
| Limo | (63.58) | (82.86) | (75.31) | (442.94) | (97.09) |
| Umécuaro | N=36 | N=36 | N=30 | N=26 | N=3 |
| | a | a | a | b (**) | a, b (*) |
| | 71.46 | 88.38 | 97.12 | 143.2 | 325.73 |
| | (80.65) | (75.28) | (78.83) | (123.74) | (551.57) |
| Franco Cointzio | N=26 | N=25 | N=25 | N=21 | N=7 |
| | a | a, b | a, b | a, b | b (*) |
| | 708.30 | 963.41 | 4.14 | | |
| | (722.37) | (758.28) | (0.96) | | |
| Arena Jorullo | N=9 | N=11 | N=11 | ---- | ---- |
| | a | a | a | | |
| | 848.19 | 3975.24 | 4506.00 | 21827.68 | |
| | (949.35) | (2490.74) | (3218.53) | (33229.53) | |
| Arena Huiramba | N=8 | N=8 | N=8 | N=3 | ---- |
| | a | a | a | a | |

El primer número es el promedio, el número entre paréntesis () es la desviación estándar y N corresponde al número de muestra. Comparación entre métodos del mismo sitio (*) $P < 0.05$, (**) $P < 0.01$, misma letra indica pertenencia al mismo grupo, letras distintas indica pertenencia a diferentes grupos. Método de Wu1 con la primera carga (Wu1_h1), método de Wu2 con la primera carga (Wu2_h1), con la segunda carga (Wu2_h2), método de dos cargas para anillo sencillo (DCAS) y permeámetro Guelph (Guelph).

Al remover este dato, los valores mínimo ($13.36 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$), máximo ($233.91 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$), promedio ($118.77 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) y desviación estándar ($80.74 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$) para el permeámetro Guelph son similares a los de otros métodos empleados (Wu2_h2, Wu2_h2 y DCAS) y no se presentan diferencias significativas con estos.

En cuanto a la Arena Jorullo, el promedio de K_{fs} mas elevado para este sitio correspondió al método de Wu2 para la primera carga (Wu2_h1) ($963.41 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$), mientras que con el método Wu2_h2 (con la segunda carga), se obtuvo el promedio menor ($4.14 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$). De los doce ensayos practicados, uno se eliminó debido a la presencia a una fuga. Para el método Wu1 solamente se incluyen nueve de los doce ensayos, debido a un ajuste deficiente de los datos al modelo y la generación de resultados negativos. Para este sitio no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos (dispositivo-método; se acepta la hipótesis nula) (Tabla 2.5).

Para la Arena Huiramba los valores de K_{fs} se ubicaron entre 88.77 y $63,229.53 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos (dispositivo-método; no se rechaza la hipótesis nula) ($F=3.278$, $P=0.039$) debido al bajo número de muestra y la alta dispersión de los datos. Se observó sin embargo una tendencia clara de valores intermedios para el método Wu_1, medios altos para el Wu2 con ambas cargas (h1 y h2) y muy altos con el método DCAS (Tabla 2.6). Este último también produjo resultados de K_{fs} negativos; 62.5% de los ensayos, que fueron eliminados del análisis.

Es importante mencionar que en los dos sitios arenosos no se pudo instalar el Permeámetro Guelph ya que la perforación necesaria para introducir la sonda del permeámetro que es de $50.0 \times 120.0 \text{ mm}$ colapsaba debido a la carencia de estructura del material.

Comparación Entre Sitios

IPCCAS con los métodos de Wu

La Figura 2.6A muestra la distribución general de los valores de K_{fs} para cada sitio, puede apreciarse la amplitud de los valores para las arenas Jorullo y

Huiramba, con promedios ubicados en los 708.3 y 848.19 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ respectivamente. La dispersión es menor para el Limo Umécuaro y el suelo Franco Cointzio y muy reducida en el caso de la Arcilla Atécuaro. Esta gráfica es similar a la gráfica 6B, donde la arena Huiramba mantiene una dispersión semejante, pero la arena Jorullo muestra una dispersión menor, que casi no traslapa con la arena Huiramba. En la gráfica de la Figura 2.6A se aprecia que la dispersión de los valores de conductividad hidráulica saturada de campo para la arcilla Atécuaro, el limo Umécuaro y el suelo franco Cointzio son similares a los obtenidos con el IPCCAS con el método Wu2 (Figura 2.6B).

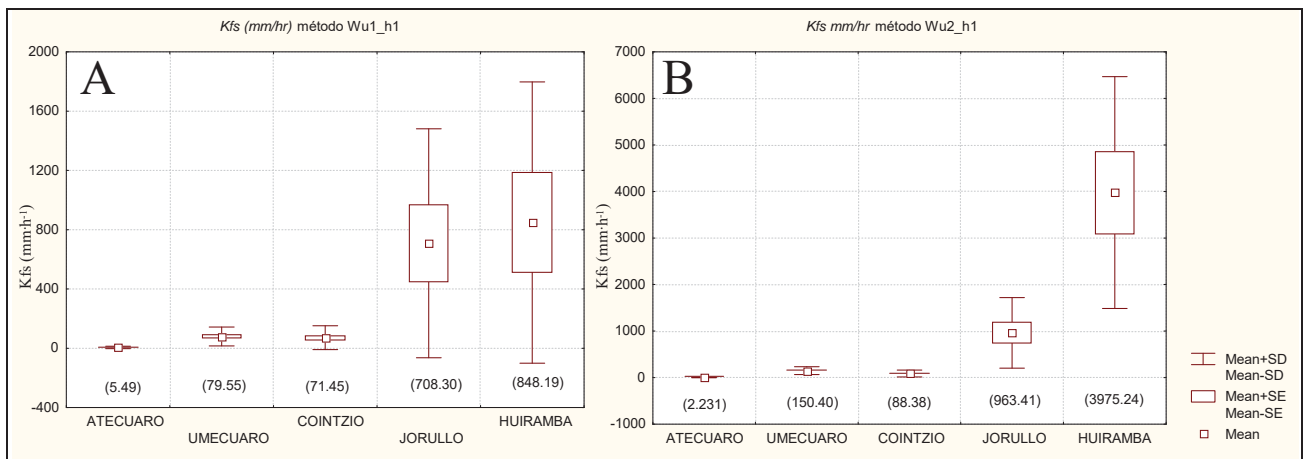


Figura 2.6. Gráficas de cajas (error estándar) y bigotes (desviación estándar) para la K_{fs} ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) en los diferentes sitios empleando el método Wu1_h1 (A) y Wu2_h1 (B); entre paréntesis se anota el promedio de K_{fs} para cada sitio.

Los resultados y los análisis estadísticos muestran que el funcionamiento del IPCCAS es adecuado, y que las soluciones matemáticas planteadas comparadas con un equipo de referencia (permeámetro de Guelph), no presentan diferencias estadísticas significativas en la mayoría de los casos (Tabla 2.6 y Tabla 2.7).

Se detectó en forma consistente una dependencia de la textura, en donde los suelos con textura mas gruesa (arenas Jorullo y Huiramba) presentan los valores mas elevados de conductividad hidráulica saturada de campo mientras que los suelos con texturas mas finas como el Limo Umécuaro, el Suelo Franco

Cointzio y la Arcilla Atécuaro mostraron valores menores, con los valores más bajos correspondiendo a la Arcilla Atécuaro.

Tabla 2.7. Comparación entre sitios con el mismo método (análisis de grupos homogéneos).

| Método/Sitio | Arcilla Atécuaro | Limo Umécuaro | Franco Cointzio | Arena Jorullo | Arena Huiramba |
|--------------|------------------|---------------|-----------------|---------------|----------------|
| Wu1_h1 | a1 | a1 | a1 | b1 (**) | b1 (**) |
| Wu2_h1 | a2 | b2 (**) | a2 | b2 (**) | c2 (**) |
| Wu2_h2 | --- | a3 | a3 | --- | b3 (**) |
| Guelph | a4 | a4 | a4 | --- | --- |
| DCAS | --- | a5 | a5 | --- | b5 (*) |

Misma letra en el renglón indica pertenencia al mismo grupo, letra distinta indica pertenencia a otro grupo y diferencia significativa (*) $P < 0.05$, (**) $P < 0.01$. El número es para diferenciar el método comparado. Método de Wu1 con la primera carga (Wu1_h1), método de Wu2 con la primera carga (Wu2_h1), con la segunda carga (Wu2_h2), permeámetro Guelph (Guelph) y método de dos cargas para anillo sencillo (DCAS).

Dispositivo de automatización

Pruebas de burbujeo

En la Figura 2.7 se presentan las gráficas de variación en la medición de la columna de agua “estática” con intervalos de toma cada segundo (A, B) y cada diez segundos (C y D). En este caso se mantuvo una altura de columna constante de 60 cm, sin embargo debido a la diferencia de altura entre la base del Mariotte y la ubicación del sensor, el dispositivo de automatización indicó una altura de 68.4 cm. Los intervalos de 1 segundo mostraron un error sistemático en la altura medición de la columna de agua, con valores entre 59.68 y 60.56 cm.

La variación inducida por el burbujeo, con intervalo de toma cada 10 segundos, muestra un comportamiento sin un patrón definido. Ankeny (1992) reporta patrones similares para los permeámetros de disco automatizados que implementó con dos transductores, y explica que la altura de la columna medida por los transductores varía debido a la modificación en la tensión dentro de la cámara de Mariotte. Los transductores no miden en si la altura de la columna, sino registran una presión, generando un voltaje, el cual, se utiliza para calcular

la altura de la columna de agua. En estos ensayos, cuando la burbuja asciende desde el tubo de burbujeo (Figura 2.5c) la tensión decrece. La amplitud de los cambios de tensión inducidos por el burbujeo dependen del diámetro del tubo de burbujeo y frecuencia de éste. Un tubo de burbujeo de diámetro pequeño reducirá la amplitud en los cambios de tensión registrados, pues las burbujas serían pequeñas y uniformes. Sin embargo, un tubo de burbujeo demasiado pequeño restringirá inevitablemente el flujo de aire, limitando la funcionalidad del Mariotte (Constanz y Murphy, 1987).

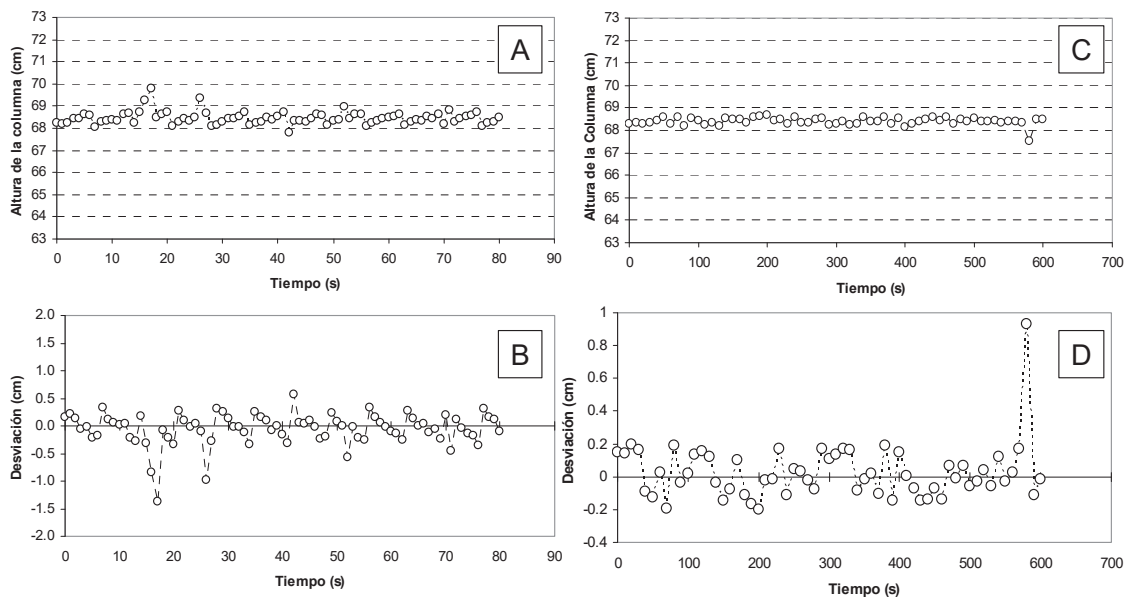


Figura 2.7. Variación en la medición de altura de una columna de agua estática (60 cm) por burbujeo inducido. A) intervalo de toma cada 1 seg y B) desviación respecto a la altura fija con intervalos cada 1 seg. C) intervalo de toma cada 10 seg, D) desviación respecto a la altura de toma con intervalos cada 10 seg.

Para el intervalo de adquisición de 10 segundos, la variación tiene una dispersión mas homogénea. La Tabla 2.8, muestra los estadísticos descriptivos para ambos intervalos de muestreo. Puede apreciarse que la desviación estándar es de 0.22 y 0.17 cm. Ankeny (1992) menciona que una calibración puede considerarse exitosa cuando las diferencias se separan entre 0.1 y 0.2 cm de la altura estática de la columna. En nuestro caso, las desviaciones se encuentran en el rango mencionado por este autor, mientras que los coeficientes

de variación para ambos intervalos de adquisición se ubicaron por debajo de 0.5%.

Tabla 2.8. Estadística descriptiva para variación en la altura de una columna de agua estática, inducida por burbujeo, con dos intervalos de adquisición de datos para el infiltrómetro automatizado.

| | Intervalo de adquisición de datos | |
|-----------------------------|-----------------------------------|------|
| | 1 s | 10 s |
| Altura "visual" (cm) | 60 | 60 |
| Altura mínima (cm) | 66.7 | 67.5 |
| Altura máxima (cm) | 70.38 | 68.7 |
| Altura promedio (cm) | 68.46 | 68.4 |
| Desviación Estándar | 0.22 | 0.17 |
| N | 601 | 61 |
| Coefficiente de Variación % | 0.32 | 0.24 |

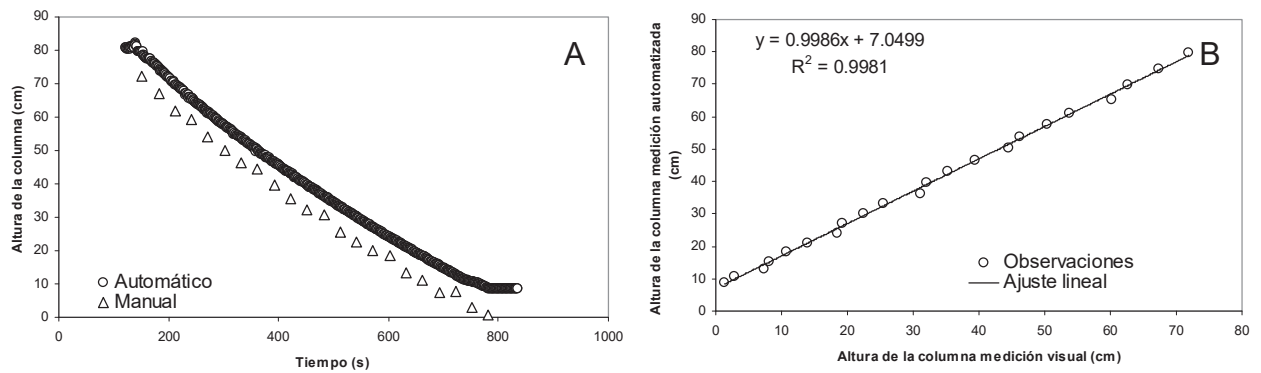


Figura 2.8. Registro de altura de la columna manual (30 s) y automática (1 s). A) comparación de forma de registro en columna descendente, B) registro manual vs registro automático con ajuste lineal.

Las mediciones de altura de la columna de agua en forma manual y automatizada se encontraron desfasadas (Figura 2.8, A). Esto debido a la distancia entre la base del Mariotte (0.0 en la escala manual) y el lugar de ubicación del sensor. En el ajuste entre las dos formas de medición se obtuvo un coeficiente de determinación $R^2=0.9981$ (Figura 2.8B), sin embargo la recta no pasa por el origen, el intercepto tiene un valor de 7.0499 cm mientras que la pendiente es de 0.9986. En este caso el intercepto corresponde la diferencia entre el punto de inserción del sensor y el nivel inicial (0.0) para la escala

manual. La pendiente corresponde al incremento en la altura medida manualmente con respecto a la obtenida mediante automatización, teniendo en este caso una relación de 1:0.9986, muy cercana a la relación 1:1 idónea.

Determinación de la K_{fs} con datos del infiltrómetro automatizado

La Figura 2.9 muestra las curvas de infiltración acumulada e infiltración instantánea para el Suelo Franco Cointzio y la Arena La Joya con datos obtenidos automáticamente con intervalos de toma cada 30 segundos y datos obtenidos manualmente con intervalos a cada minuto. Puede notarse la diferencia en la pendiente de la curva acumulada entre los métodos automático y manual en las dos formaciones. Conceptualmente, la pendiente en la fase estable de la infiltración acumulada corresponde a la tasa base de infiltración y concuerda bastante con la tasa base que se presenta en los dos suelos representada por la línea horizontal punteada Figura 2.9 C y F.

El análisis estadístico (Prueba de Tukey y ANOVA de una vía) no mostró diferencia significativa entre los métodos manual y automatizado. Pero si se detectaron diferencias significativas ($\alpha=0.05$) entre las diferentes formaciones estudiadas.

Tabla 2.9. Análisis estadístico Pruebas de Tukey, ANOVA de una vía y formación de grupos homogéneos para los dos métodos de adquisición de datos y cuatro sitios.

| | Método | | | | P | Significancia |
|-----------------------|----------------------|------|----------------------|------|--------|---------------|
| | Manual | | Automatico | | | |
| | Media ln K_{fs} | DS | Media ln K_{fs} | Ds | | |
| Arcilla Atecuaro | 2.46 a | 0.29 | 1.72 a | 0.31 | 0.4393 | NO |
| Suelo Franco Cointzio | 3.98 b,c | 0.82 | 3.79 b | 0.54 | 0.9937 | NO |
| Limo Umecuaró | 4.98 c | 0.41 | 4.52 b,c | 0.69 | 0.7888 | NO |
| Arena La Joya | 7.29 d | 0.62 | 7.71 d | 0.19 | 0.9277 | NO |

Misma letra indica pertenencia al mismo grupo, distinta letra indica pertenencia a grupos diferentes con $\alpha=0.05$

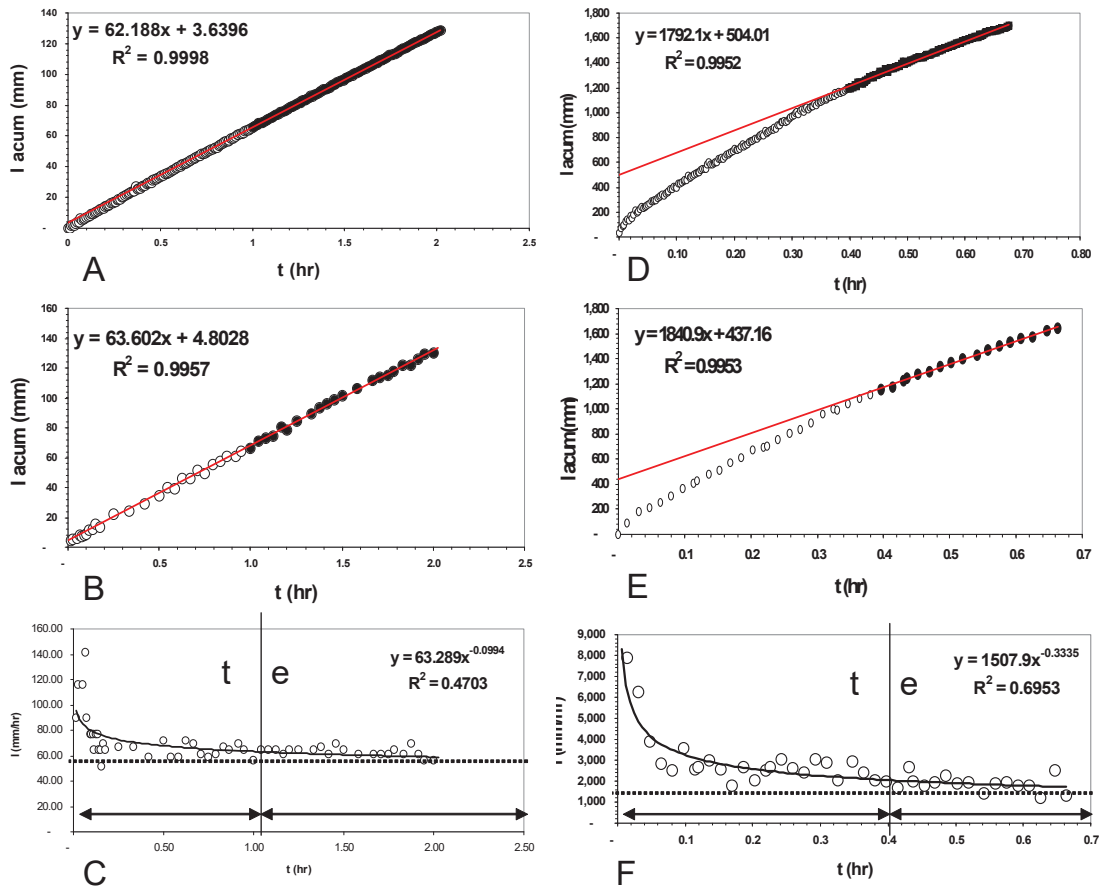


Figura 2.9. Curvas de infiltración acumulada e instantánea para dos suelos; Franco Cointzio (izquierda) (A, B, C) y Arena La Joya (derecha) (D, E, F), con ecuaciones ajustadas. Suelo Franco Cointzio A) Infiltración acumulada datos cada 10 segundos “automático”, B) Infiltración acumulada datos manuales, C) Curva de infiltración instantánea, con ajuste del modelo de Kostiakov; la línea vertical divide entre fase transitoria (t) y fase estacionaria (e), el umbral de humedad se alcanza poco después de 1 hora. Arena La Joya, D) Infiltración acumulada datos cada 10 segundos “automático”, E) Infiltración acumulada datos manuales, F) Curva de infiltración instantánea con división de entre ambas fases.

En cuanto a la formación de grupos homogéneos, se obtuvieron cuatro (Tabla 2.9), el primero (a) comprende la Arcilla Atécuaro, el segundo (b) comprende el Suelo Franco Cointzio automático y manual así como el Limo Umécuaro con mediciones automáticas. El tercer grupo (c) está compuesto por Umécuaro manual y Umécuaro Automático, mientras que el cuarto grupo incluye a las conductividades manual y automática para la Arena La Joya. El traslape entre las poblaciones de estas formaciones es mas claro en la Figura 2.10, donde se presentan las gráficas de cajas y bigotes para las cuatro formaciones sin

transformación logarítmica (Figura 2.10A) y con transformación logarítmica (Figura 2.10B).

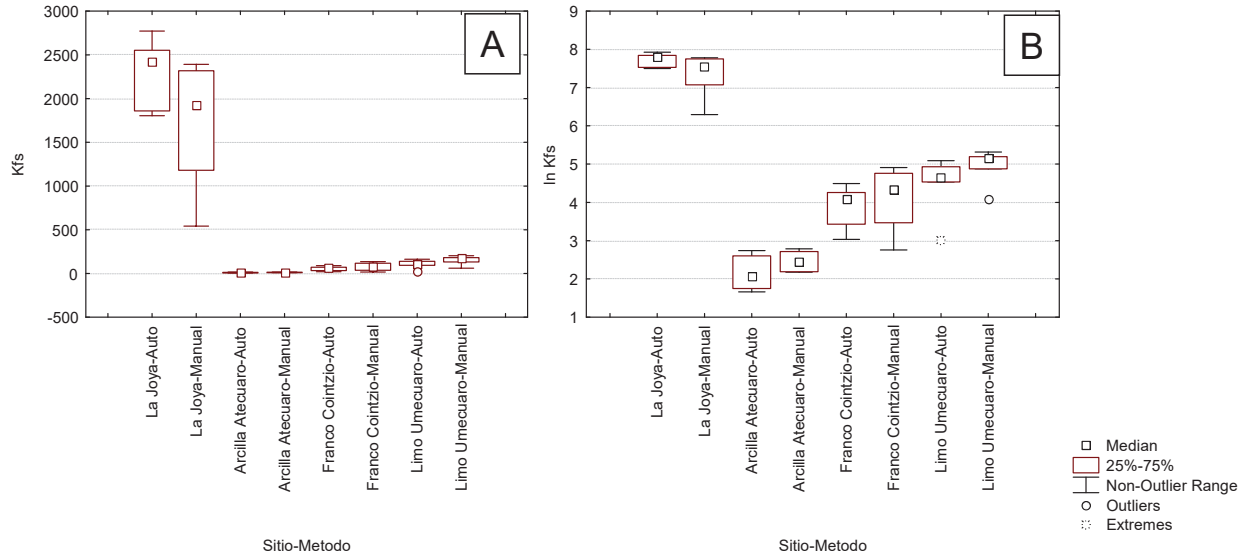


Figura 2.10. Gráficas de cajas (error estándar) y bigotes (desviación estándar) para la K_{fs} ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) y el $\ln K_{fs}$, obtenida mediante registros manuales y automatizados.

DISCUSION

Los valores de K_{fs} promedio obtenidos con el IPCCAS variaron entre $2.231 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ para la Arcilla Atécuaro y $21,827.68 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ para la Arena Huiramba. Los valores obtenidos para los Andosoles húmicos (Limo Umécuaro), que oscilaron entre 5.13 y $398.94 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ con un promedio de $150.40 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ (método Wu2_h1), son similares a aquellos obtenidos por otros autores, por ejemplo Regalado [2005] reporta para Andosoles en las islas canarias K_{fs} de 99.50 y $102.16 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ a partir del escalamiento de curvas de retención de humedad.

En cuanto al consumo de agua, el IPCCAS requirió entre 0.3 y 1.5 lt. para la arcilla Atécuaro, 1.0 y 5.2 lt. para el limo Umécuaro, 0.5 y 2.5 lt. para el suelo franco Cointizio, entre 7.5 y 12.5 lt. para la arena Huiramba y entre 3.5 y 8.5 lt. para la arena Jorullo, dependiendo del método. Aún cuyo el consumo de agua parece poco relevante, en nuestra experiencia, en suelos con K_{fs} medias o altas

como el Limo Umécuaro y los suelos arenosos del presente estudio, la cantidad de agua que el equipo de trabajo puede transportar hasta el sitio donde se conducen los ensayos es una limitante en la caracterización de la K_{fs} , especialmente cuando los trabajos están encaminados a evaluar esta propiedad en terrenos no agrícolas alejados de caminos y por lo tanto de vehículos de apoyo.

En este sentido, los métodos de Wu fueron los más económicos en agua, reduciéndose entre 50 y 75% el consumo respecto al método DCAS, permitiendo realizar el doble de ensayos de infiltración con el mismo volumen de agua.

Comparación con el Permeámetro Guelph

En cuanto al uso del Permeámetro Guelph como referencia y su comparación con otros métodos, algunos autores (Reynolds et al., 2000) mencionan que emplear un método específico o valor de K_{fs} como control, no es válido, puesto que no existe un valor único de referencia, sino que el valor o los valores de K_{fs} obtenidos dependen entre otras cosas del dispositivo, el marco conceptual en el que se fundamentan éste y el método de cálculo así como las soluciones matemáticas aplicadas.

Queremos aclarar que en este trabajo el Permeámetro de Guelph funciona como una “referencia metodológica” y no lo consideramos como el único método válido admisible. Nuestro grupo de trabajo estaba interesado en que el dispositivo aquí propuesto pudiera englobar la variación de suelos con texturas contrastantes, minimizando el error asociado al dispositivo y método de cálculo para poder comparar entre condiciones distintas del suelo superficial, que de acuerdo a Blume (*com. pers.* 2005) es la parte del suelo mas expuesta a modificaciones.

Autores previos han expresado que la comparación entre métodos (caso específico del permeámetro Guelph y un infiltrómetro de tensión) no es válido en una base punto por punto, ya a que los datos se toman en ubicaciones diferentes (Paz-González et al., 2001). Sin embargo, mencionan que si es

posible comparar la variación general y la tendencia en la escala de parcela en la cual ellos trabajaron.

En nuestro caso, comparamos los métodos de procesamiento, utilizando los mismos datos para cada uno de los puntos, por lo que es factible comparar punto por punto para cada uno de los métodos, sin embargo, la presencia de resultados negativos ocasionó inesperadamente la reducción del número de muestra de varios métodos incluyendo el de referencia.

Tomando en cuenta estas consideraciones, el dispositivo construido y descrito en el presente trabajo permitió estimar la conductividad hidráulica saturada de campo sin mostrar diferencias respecto al Permeámetro de Guelph en la mayoría de los casos.

Previamente se mencionó que no fue posible montar el Permeámetro Guelph en los sitios Huiramba y Jorullo debido al colapso del material, y la necesidad de este dispositivo de una perforación para realizar las mediciones. Esta condición, si bien no es el patrón de la mayoría de los suelos, limita seriamente los ambientes de muestreo para el dispositivo de referencia ya que requeriría de aditamentos especiales para funcionar en este tipo de materiales sin estructura, incrementando el costo del equipo. Empleando el IPCCAS, no se tuvieron contratiempos de este tipo.

Sin embargo, el dispositivo presentado en este trabajo está limitado a realizar ensayos a nivel superficial, por lo que el comportamiento y variación de la K_{fs} en otros horizontes del suelo se encuentra fuera de su alcance, lo que no ocurre con el Permeámetro Guelph, capaz de medir la K_{fs} hasta 80 cm. de profundidad sin necesidad de aditamentos especiales.

Valores negativos

Mertens y colaboradores (2002) explican que el método DCAS suele generar valores de K_{fs} negativos y que esto se debe a que el flujo saturado de la primera carga (h_1) es menor que el de la segunda carga (h_2). Una posible explicación para los sitios arenosos, es que durante la primera parte del ensayo (primera

carga) y una vez estando el suelo saturado, se redujo la cohesividad del material, de por sí baja. Posteriormente, al elevar la carga, dado que es necesario cerrar la llave de paso, la entrada violenta de agua “lavó” parte de las arenas confinadas dentro del anillo del infiltrómetro generando macroporos y canales de flujo preferencial, que ocasionaron que el gasto para la segunda carga fuera más elevado que para la primera.

En cuanto al Permeámetro Guelph, autores previos como Elrick y Reynolds (1992) reportan la obtención de valores negativos que pueden llegar a representar hasta el 45% del total de los ensayos, lo que concuerda los resultados de otros investigadores. (p. ej. Ángeles-Cervantes, *com. pers.* 2006; Muñoz-Nava, *com. pers.* 2008) y los de este trabajo (50% de los ensayos Limo Umécuaro). Elrick y Reynolds (1992) mencionan que los valores negativos se deben a la heterogeneidad del suelo y propusieron un método para solucionar este problema, sin embargo dicho método se encuentra fuera del alcance del presente trabajo.

Valores extremos

El método DCAS produjo los valores de K_{fs} promedio más elevados (508.92 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; Limo Umécuaro). El Permeámetro Guelph presentó también un valor extremo (1565.00 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$; suelo Franco Cointzio) asociado a bioturbación por la presencia de tuzas (*Thomomys umbrinus*). Para la Arena Huiramba el valor promedio de K_{fs} fue de 21,827.68 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ pero se encontró influido por un dato extremo (60,182.42 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$) cuya causa precisa se desconoce, pero consideramos puede estar asociada a la composición granulométrica del material (arenas y gravas), específicamente a la presencia de una capa gravosa por debajo de las arenas muestreadas.

Consideraciones sobre los métodos y el dispositivo

Los métodos de Wu, fueron los más consistentes, y estadísticamente no presentaron diferencias entre sí. El primero (Wu1_h1) aunque trabaja con el total de los datos del ensayo, el ajuste no fue adecuado para algunos de los ensayos

practicados (Arena Jorullo) por lo que tuvieron que ser desechados (27%), esto puede tener un serio impacto en la logística y resultados de la investigación. El segundo método de Wu *et al.* (1999) (Wu2) requiere segregar la fase de flujo estacionario y emplear un valor aproximado de α^* , siendo el método que mostró la mayor consistencia de todos, ya que se obtuvo un excelente ajuste al modelo, no produjo valores de K_{fs} negativos y requirió solo la aplicación de una carga, teniendo un consumo de agua menor que el método DCAS, además puede aplicarse tanto a una primera como a una segunda carga, siendo los resultados iguales en términos estadísticos al permeámetro de referencia. No obstante, requiere del uso de un valor aproximado de α^* que es cuestionado por algunos autores p. ej, Amoozegar (2002), sin embargo el uso de α^* evita la necesidad de tomar muestras de campo antes y después de los ensayos para estimar $\Delta\theta$.

Por otro lado Wu y colaboradores (1999) mencionan que el método (Wu2) es sensible al número de registros en la fase estacionaria, por lo que es importante llevar acabo mediciones constantes al menos cada cinco minutos como en este estudio.

El área reducida del IPCCAS, puede producir sesgos en la medición en suelos con arcillas expandibles como los Vertisoles, debido a que cuando están secos, el flujo ocurre entre las grietas, que funcionan como macroporos, y cuando está húmedo se da por sorbilidad y capilaridad en micro y mesoporos, por lo que deberá ser probada su utilidad en este tipo de suelos.

La fragilidad del material acrílico (polimetil-metacrilato) del IPCCAS, incrementa tras periodos prolongados de trabajo de campo debido a la degradación por exposición a los rayos UV. Podrían emplearse tubos de policarbonato o acrílico con tratamiento anti-UV como sustituto, con la desventaja de presentar un costo considerablemente mayor.

Los sitios Atécuaro, Umécuaro, Cointzio y Huiramba, representan condiciones edafológicas contrastantes dentro del universo de la cuenca de Cuitzeo, sirviendo como una pequeña muestra de la variación de la K_{fs} en la escala del relieve volcánico en la parte sur de esta cuenca. El dispositivo aquí presentado

ha permitido explorar esta variación de manera accesible que de otra forma permanecería incógnita para nosotros.

Unidad de Automatización

Previamente se discutió sobre la funcionalidad y las capacidades del infiltrómetro sin automatización.

Se encontró que el infiltrómetro automatizado es igualmente capaz de detectar las diferencias de la conductividad hidráulica saturada de campo asociadas a las diferencias texturales y bioturbación, puesto que se probó en las mismas formaciones que el dispositivo sin automatizar.

Para varias formaciones analizadas el Coeficiente de Variación fue menor al utilizar el módulo de automatización. Esta diferencia es atribuida a que la obtención de datos de la altura de la columna de agua en el reservorio del infiltrómetro empleando el módulo de automatización reduce el error en la medición, tanto en suelos con K_{fs} elevadas (Arena La Joya) como en aquellos con K_{fs} reducidas (Arcilla Atécuaro).

El método manual requiere de realizar los registros de altura de la columna de manera sistemática, ya sea en la parte inferior o superior del menisco de agua. Si se hacen las lecturas indistintamente, el error es aproximadamente ± 2.0 mm además del inducido por el burbujeo.

Una ventaja del dispositivo de automatización es la simplicidad en la transferencia de los registros y su inclusión en los programas de procesamiento y análisis, ya que los datos se descargan en forma digital y no requieren pasar por la fase de captura manual, como los registros obtenidos manualmente. Con la automatización se evitan los errores y el tiempo de captura, que se traduce en un incremento en la velocidad de análisis.

Aún cuando el dispositivo automatizado, está también sujeto a error en la medición de la altura de la columna de agua, con desviaciones estándar entre 1.7 y 2.2 mm (Tabla 8). Su capacidad para registrar el nivel en intervalos regulables por el usuario permite obtener una mayor cantidad de registros que

se traduce en mejores ajustes lineales de las fases estacionarias. Wu y colaboradores (1999) mencionan la sensibilidad del método Wu2 y recomiendan emplear la mayor cantidad de registros en fase estacionaria como sea posible.

CONCLUSIONES

- A. Construimos un dispositivo de bajo costo (aproximadamente \$600.00 MN) y fabricación sencilla, con un consumo de agua entre 0.3 y 12.5 *lt*, dependiendo de la textura del suelo, capaz de una resolución estadísticamente igual a aquella de un equipo comercial y que captó en forma eficiente la variación de la K_{fs} asociada a la variación textural, la porosidad y la presencia de bioturbación.
- B. De los tres métodos para cálculo de la K_{fs} aplicados a los datos obtenidos con el dispositivo construido y comparados con la referencia (Permeámetro Guelph), consideramos que la opción mas apropiada la constituyó el método Wu2, ya que trabaja con la mitad del volumen del agua requerida por el método DCAS, y no necesitó de la obtención de el valor $\Delta\theta$.
- C. Una desventaja importante del dispositivo construido en el presente trabajo es que funciona a nivel superficial, no pudiendo obtener datos de K_{fs} a profundidad como algunos dispositivos comerciales como el Permeámetro Guelph o el Permeámetro Compacto de Carga Constante de Amoozegar (1992; 2002). El dispositivo construido en el presente trabajo, permitió obtener datos de campo para estimar la K_{fs} a un costo muy por debajo de algunos de los equipos comúnmente utilizados para este fin.
- D. La inclusión del dispositivo de automatización USB redujo el tiempo de supervisión en la adquisición de datos, además de reducir significativamente el tiempo de transferencia de los registros al formato adecuado para ser procesados.

- E. El dispositivo de automatización USB fue capaz de medir una columna de agua entre 0.0 y 850 mm con un error de ± 2.0 mm en condiciones de burbujeo. Siendo este error similar al presente en los registros manuales.
- F. La K_{fs} calculada a partir de registros obtenidos con el infiltrómetro automatizado no mostró diferencia significativa con la K_{fs} calculada a partir de registros manuales.
- G. Se considera que una unidad de automatización programable de campo independiente de una computadora personal portátil sería de mayor utilidad para el infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo presentado.

CAPITULO 3. DESCRIPCIÓN DE SUELOS, MUESTREO DE INFILTRACIÓN Y RELACIONES ENTRE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA Y PROPIEDADES FISICO-QUÍMICAS

Como se mencionó en la introducción, este capítulo consta de tres partes. En la primera se describen, comentan y discuten cinco perfiles de suelo en el área de estudio en la Loma del Puerto del Tigre en el sur de la cuenca del Lago de Cuitzeo (Figura 1.3). En la segunda parte se explica como se realizó el muestreo de infiltración, para calcular la conductividad hidráulica saturada de campo y se analiza la variabilidad de esta propiedad utilizando herramientas estadísticas y geoestadísticas. En la tercera parte se analizan las relaciones entre las diferentes variables fisicoquímicas estudiadas y la conductividad hidráulica saturada de campo para las distintas coberturas.

Relación entre la cobertura vegetal, la infiltración y la K_{fs}

Existen diversas aproximaciones para el estudio de la conductividad hidráulica saturada (K_s) o la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) (Dafonte et al., 1999) utilizándose comúnmente simuladores de lluvia (Cerdà, 1996; Cerdà et al., 1997; Osuna-Ceja y Padilla-Ramírez, 1998; Cerdà, 2002), infiltrómetros de doble anillo (Sánchez-Andrés et al., 2002; Carlón-Allende, 2006), infiltrómetros o permeámetros de disco (McKenzie et al., 2001; Salako y Kirchhof, 2003), permeámetro de carga constante o amoozímometro (Sobieraj, 2003; Ziegler et al., 2006) o infiltrómetros de anillo sencillo (Davidoff y Selim, 1986; Mertens et al., 2002; Harden y Scruggs, 2003; Buczko et al., 2006). En este caso utilizamos el infiltrómetro de anillo sencillo descrito previamente en el Capítulo 2.

La infiltración es un proceso complejo, que en condiciones de campo y precipitación natural varía para cada evento (Wit, 2001), debido entre otras cosas a que es dependiente del contenido de humedad del suelo (Lassen y Lull,

1951; Cerdà, 1995). Algunos autores como Wit (2001) utilizan la conductividad hidráulica saturada (K_s) como descriptor de la infiltración para poder comparar en forma homologada el proceso de infiltración entre suelos y sitios con distintas características y contenidos de humedad inicial.

Por otro lado y conforme a la hipótesis establecida en el Capítulo 1 (Pg. 4), se puede mencionar que diversos autores hacen referencia a la relación existente entre la cobertura vegetal y la infiltración.

Se sabe que en algunos ambientes, por ejemplo en los de tipo semiárido las tasas de infiltración incrementan bajo áreas con vegetación en relación con áreas desprovistas de plantas. Esto se atribuye a la diferencia en materia orgánica, la microtopografía, la densidad aparente y la estabilidad de agregados, así como la resistencia a la penetración debajo de las plantas (Bochet, 1996 en (Wit, 2001). Pilgrim y colaboradores (1988) mencionan que la cobertura vegetal es muy importante para la infiltración, especialmente en ambientes áridos y semiáridos. Cerdà (1997b; 1997a) trabajando en matorrales semiáridos del sureste de España, describió un efecto diferencial entre la áreas desnudas y las áreas vegetadas en escalas finas (1-3 m), además de un efecto estacional en la infiltración. Lyford y Qashu (1969) obtuvieron tasas de infiltración tres veces mayores en sitios con vegetación que en sitios entre los manchones de vegetación, otras investigaciones indican una relación entre la cantidad de manillo y un incremento local en producción de biomasa y mayores tasas de infiltración en escalas pequeñas (Cerdà, 1997a; Bergkamp et al., 1999; Cerdà, 1999).

Por otro lado diversos autores han puntualizado sobre la relación entre cobertura del suelo, su uso y la infiltración (Pilgrim et al., 1988; Wit, 2001; Cichota et al., 2003; Mills y Fey, 2004). Esto se atribuye a la diferencia fisico-química de materia orgánica, la microtopografía, la densidad aparente y la estabilidad de agregados, así como la resistencia a la penetración debajo de de las plantas (Bochet, 1996 en (Wit, 2001). Pilgrim y colaboradores (1988) mencionan que la cobertura vegetal es muy importante para la infiltración, especialmente en

ambientes áridos y semiáridos. Cerdà (1997b; 1997a) trabajando en matorrales semiáridos del sureste de España, encontró un efecto diferencial entre la áreas desnudas y las áreas vegetadas en escalas finas (1-3 m). Lyford y Qashu (1969) obtuvieron tasas de infiltración tres veces mayores en sitios con vegetación que en sitios entre los parches de vegetación, otras investigaciones indican la existencia de una relación entre la cantidad de manitllo, un incremento local en producción de biomasa y mayores tasas de infiltración en escalas pequeñas (Cerdà, 1997a; Bergkamp et al., 1999; Cerdà, 1999). Si bien el material parental y los procesos pedogenéticos relacionados con la geomorfología son relevantes (Cerdà, 1998b; Bergkamp et al., 1999; Cerdà, 2002; Esteves et al., 2005), en áreas no agrícolas también lo es el tipo de vegetación (Johnson-Maynard et al., 2002; Mills y Fey, 2004) y su manejo, especialmente cuando los terrenos son pastoreados (Mwendera y Saleem, 1997; Singleton et al., 2000). Li y Shao (2006) reportan incremento en conductividad hidráulica saturada como consecuencia de la recuperación de la cobertura vegetal arbustiva y arborea para una cronosecuencia de 150 años en suelos franco-arcillo-limosos de la meseta de loess en China tanto para el suelo superficial 0-20 cm como subsuperficial 20-40 cm. Por otro lado, Sobieraj, quien estudió los patrones de variación de la K_s aplicando herramientas geoestadísticas en ambientes de bosques tropicales de Brasil, concluyó que los patrones encontrados están más relacionados a los procesos de bioturbación que a propiedades clásicamente relacionados como la textura, la densidad aparente y el espacio poroso (2001; Sobieraj, 2003; 2004). En el caso de la cuenca de Cuitzeo, López y colaboradores (2006) mencionan que existe un fenómeno de abandono de tierras y lo adjudican a la migración campesina. Ésto favorece la recuperación de la cubierta vegetal en ciertas áreas, que de acuerdo con estos autores incrementa la protección del suelo y favorece la infiltración.

DESCRIPCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS BAJO CINCO COBERTURAS

AREA DE ESTUDIO

Como se menciona previamente en el Capítulo 1, esta parte del trabajo se llevó a cabo en la zona llamada “Loma del Puerto del Tigre” en la porción sur de la cuenca de Cuitzeo. El área se encuentra aproximadamente a 18 km al Sur-Sureste de la ciudad de Morelia, capital del estado de Michoacán, con coordenadas 101°14'24" W, 19°33'00" N (Figura 1.3; pg 11).

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, los suelos son Acrisoles órticos (INEGI, 1979a) mientras que la litología es extrusiva básica, y aunque las cartas indican litología basálticas (INEGI, 1978d), las observaciones de campo en los cortes de carretera y cimientos de edificaciones indican la presencia de materiales ignimbríticos, probablemente de la Cantera de Morelia caracterizada por Bigioggero y colaboradores (2004).

La geoforma corresponde a un lomerío suavizado por ceniza volcánica. Los muestreos se realizaron en la porción alta de la geoforma (superficie cumbral y ladera alta) con pendiente media menor al 5°, con el fin de excluir factores aluviales y coluviales, así como el flujo lateral inducido por pendientes fuertes.

El clima (climograma en el Anexo 3) es de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano con temperatura promedio anual de 16.7° C y precipitación promedio anual es de 849.3 mm (García, 2004).

Se trabajó en cinco clases de cobertura vegetal y uso del suelo:

- Bosque de pino-encino cerrado (BPQ) en superficie cumbral, con una altitud de 2210 msnm y cobertura arbórea >70%, estrato arbustivo y herbáceo. En el estrato arbóreo domina *Pinus devoniana*, *P. leiophylla*, *Quercus magnolifolia* y *Q. castanea*.
- Agostadero (AG) en superficie cumbral y altitud de 2210 msnm. Se presentan individuos aislados del estrato arbustivo con cobertura

aproximada de este estrato de 12% y presencia de gramíneas y herbáceas con cobertura del 100%

- Cárcava (CA) en ladera alta (a 40 m de AG <10m de desnivel) y altitud de 2205 msnm. La cárcava es un área con cubierta vegetal muy baja o sin cubierta vegetal con procesos erosivos (erosión laminar y en cárcavas) evidentes.
- Parcela abandonada (PA) en ladera alta (a 150 m de distancia de AG y 20m de desnivel) a una altitud de 2190 msnm. Corresponde a una etapa temprana de la sucesión secundaria local, desarrollada al ser abandonada la tierra de labor (\pm 5 años), presenta elementos arbustivos (7% cobertura) y herbáceos (\pm 50% cobertura) así como individuos juveniles del estrato arbóreo (*Pinus spp.* y *Crataegus pubescens*).
- Plantación (PCu) en superficie cumbral a una altitud de 2195 msnm. La plantación corresponde a una reforestación de 35-40 años de *Cupresus lusitanica* con densidad promedio de 216 ind/ha y diámetro de copa promedio de 7.0 m, con cobertura de dosel de 83.7 %, presenta estrato rasante de musgos y escasos individuos herbáceos o arbustivos.

Todos los sitios se encuentran a menos de 160 m uno de otro, exceptuando la plantación de *Cupresus*, ubicada a 750 m de los demás.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS

Autores como Sobieraj (2003), Sobieraj y colaboradores (2004), Li y Shao (2006) ó Ziegler y colaboradores (2006) mencionan que el suelo superficial es el más susceptible a cambios por manejo o cambios en la vegetación.

MUESTREO Y ANÁLISIS

Para el reconocimiento, descripción y muestreo de los suelos, se excavaron perfiles para cada uno de los sitios con distinta cobertura vegetal (5 sitios) con profundidades entre 67 y 178 cm para analizar la variación del suelo superficial y

subsuperficial, además se excavó una zanja de 4.5 m con profundidad de 235 cm con el fin de conocer el patrón vertical desde la superficie hasta la saprolita.

Los perfiles fueron descritos en campo empleando una aproximación de horizontes, de acuerdo con los lineamientos recomendados por Siebe y colaboradores (1996) y el Soil Survey Staff (1951). Se recolectaron muestras de cada horizonte para realizar análisis fisicoquímicos de laboratorio.

En laboratorio se determinaron; pH en agua y en solución de cloruro de calcio 1.0 N a pH 7.0 por potenciómetro en solución 1:2, porcentaje de arena, limo y la arcilla de la fracción fina <2.0 mm del suelo por el método del hidrómetro de Boyoucos tras ataques con H_2O_2 al 35% y dispersar la muestra en hexametáfosfato de sodio, el contenido de materia orgánica por oxidación en húmedo (Walkley y Black) y la densidad real por el método del picnómetro (DOF, 2002). Para la densidad aparente se utilizó el método del cilindro (Miller y Donahue, 1990). El contenido de carbono orgánico se calculó dividiendo el % de materia orgánica por un factor de 1.724 (DOF, 2002) y posteriormente ajustando por la densidad aparente. La textura, como clase textural se obtuvo utilizando el programa Soil Water Characteristics V 6.1.51 (Saxton et al., 1986) a partir de los porcentajes de los componentes de la fracción fina (%Arena, %Limo, %Arcilla). El color en seco y en húmedo por comparación visual con las tablas de color Munsell para suelos. La conductividad eléctrica se obtuvo por medición directa con celda electroquímica, el Nitrógeno en forma de NH_4^+ así como el Fósforo en forma de fosfato (P_2O_5) y Hierro, Manganeseo, Aluminio, Cobre y Azufre asimilables por espectrofotometría UV-Vis, Calcio y Magnesio por complejometría por titulación con EDTA sódico y los carbonatos totales mediante titulación ácido-base (DOF, 2002). El Potasio se cuantificó por precipitación con tetrafenil-boro-sódico (Aguilar-Santelices et al., 1987).

El porcentaje de agregados estables en agua para dos tamaños 0.25 a 2.0 mm y 2.0 a 4.0 mm se cuantificó empleando la técnica de tamizado en húmedo y dispersión de agregados de Seybold y Herrick (2001) modificada. En esta se utilizan micro-tamices de 50.8 mm de diámetro y 76.2 mm de alto con tamaños

de malla deseados, en este caso malla 0.25 mm para agregados entre 0.25 a 2.0 mm y malla de 1.65 mm para agregados entre 2.0 y 4.0 mm. Los agregados se secaron al aire durante 7 días, tras lo cual se tamizaron en seco para separar las fracciones deseadas y se colocaron en los microtamices con una carga aproximada de $0.51 \text{ g}\cdot\text{cm}^2$. Los micro-tamices se acomodaron en una rejilla de agitación dentro de un recipiente plástico donde fueron humectados despacio por flujo vertical y lentamente sumergidos en agua destilada. Una vez sumergidas las muestras fueron agitadas durante 3 minutos en ciclos de ascenso-descenso recorriendo una distancia de 1.5 cm a una razón de 30 ciclos por minuto manteniendo los agregados sumergidos en todo momento. Posteriormente las muestras se secaron a peso constante en estufa eléctrica y se pesaron. Para determinar la cantidad de arenas los microtamices conteniendo las muestras se sumergieron en una solución de hexametáfosfato de sodio ($10 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$) que actuó como dispersante durante 5 min y se agitaron verticalmente. Los tamices fueron entonces ejuagados con un chorro fino de agua corriente hasta que solamente quedaron partículas primarias. Los tamices se colocaron en la estufa y después de haberse secado se registró el peso de la arena. El porcentaje de agregados estables en agua se calculó empleando la fórmula de Kemper y Koch (1966 *in* (Seybold y Herrick, 2001):

$$\%AEA = ((TAg - TAr) / (Ts - TAr)) \times 100$$

donde %AEA es el porcentaje de agregados estables en agua, TAg es el peso seco de los agregados estables en agua, TAr es el peso de la arena seca, Ts corresponde al peso de la muestra original de suelo secado al aire.

DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS

Para la clasificación, se siguió la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (FAO, 1999), utilizando datos analíticos de laboratorio del perfil ubicado en la plantación de *Cupresus* procedentes de un muestreo previo conducido por el Departamento de Ciencias de la Tierra del Instituto de Investigaciones Sobre los Recursos Naturales (INIRENA) de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El pedón descrito en este perfil fue clasificado como Lixisol Húmico.

A continuación se presenta la descripción sintética (tablas de 3.1 a 3.5) de cada uno de los perfiles excavados. Las tablas con datos analíticos se encuentran en el Anexo 4.

Perfil de bosque de pino-encino (BPQ)

Geológicamente la zona forma parte del eje volcánico transmexicano (Garduño Monroy, 1999b, a), localmente comprende materiales de la secuencia Oligoceno-Mioceno de Mil Cumbres (Pasquaré et al., 1991). La litología corresponde a rocas extrusivas de composición básica depositadas sobre ignimbrita riolítica de la Cantera de Morelia (Bigioggero et al., 2004).

Altitud: 2210 Msnm

Exposición: sur oeste

El perfil se ubica en la superficie cumbral o parteaguas de un lomerío suavizado por cenizas volcánicas, con pendiente de 1°, bajo un Bosque de pino-encino, con *Pinus devoniana*, *P. leiophylla*, *Quercus magnoliifolia* y *Q. castanea*. con una cobertura arbórea superior al 70% y con presencia de estratos arbustivo y herbáceo con coberturas del 30 y 15 % respectivamente.

Hay evidencias de incendio (de 10 años o mas) y de pastoreo vacuno y caballar.

Tabla 3.1. Características del perfil de bosque de pino- encino (BPQ).

| Ho | Profundidad en cm | Descripción |
|-----------------|-------------------|---|
| O1 | 22 a 8 | Hojarasca sin mineralización aparente. |
| O2 | 8 a 0 | Hojarasca parcialmente fragmentada y con mineralización incompleta |
| A ₁₁ | 0 a 5 | Mineral con abundante materia orgánica finamente fragmentada y mineralización avanzada, con límite superficial irregular por bioturbación. la densidad de raíces es muy alta. Color en seco, es rojo tenue (10R5/2) y rojo oscuro (10R3/2) en húmedo. Con estructura de bloques angulares biogénicos fuertemente desarrollada (10 a 30 mm), con cutanes de materia orgánica, delgados en los canales de bioturbación; se encontraron escarabajos, lombrices y larvas de insectos muy abundantes. Sin pedregosidad. El límite inferior es claro y uniforme. La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 90.4 y 90.2% respectivamente. Textura franca arcillo arenosa (60.36% de arena, 21.64 de arcilla y 48% de limo); densidad aparente de 1.0 g·cm ⁻³ ; densidad real de 1.7 g·cm ⁻³ ; moderadamente ácido (pH en |

| | | |
|-----------------|---------|---|
| | | agua 5.41; pH en CaCl ₂ de 4.55); elevada concentración de materia orgánica (5.70%); El complejo de cationes esta dominado por calcio y magnesio (2.48 y 2.09 cmol·kg ⁻¹), seguido por potasio (0.13 cmol·kg ⁻¹) y con muy baja presencia de sodio, por ello la CE es de 0.02 dS·m ⁻¹ ; los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.17, 0.018 y 0.025 cmol·kg ⁻¹ respectivamente; el porcentaje de carbonatos es de 1.3%; en tanto que la concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo soluble es de 0.88 y 0.023 cmol/kg ⁻¹ respectivamente. |
| A ₁₂ | 5 a 12 | <p>Color tanto en seco como en húmedo es rojo tenue (10R4/4) y (10R4/3). Estructura de bloques subangulares biogénicos fuertemente desarrollados de 15 a 45 mm. Manchas de carbón (menos del 1%) de color negro de 0.5 a 3.0 mm de forma irregular; se encontraron larvas de escarabajos y lombrices. Alta densidad de raíces. Sin pedregosidad. El límite inferior es claro y uniforme.</p> <p>La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 91.3 y 90.4 % respectivamente. De textura franco arcillo arenosa (46.4% de arena, 29.6% de arcilla y 24.0% de limo); Densidad aparente de 0.9 g·cm⁻³ densidad real de 2.5 g·cm⁻³; Moderadamente ácido (pH en agua 5.34; pH en CaCl₂ de 4.54); Materia orgánica alta (5.59%); El complejo catiónico esta dominado por calcio y magnesio (2.06 y 1.02 cmol·kg⁻¹), seguido por potasio (0.13 cmol·kg⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es muy baja (0.03 dS·m⁻¹). Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.23, 0.009 y 0.025 cmol·kg⁻¹ respectivamente; el porcentaje de carbonatos es de 1.42%. La concentración de nitrógeno (NH₄⁺) y de fósforo soluble es de 0.12 y 0.023 cmol/kg⁻¹ respectivamente.</p> |
| AB | 12 a 32 | <p>En esta capa están mezclados los horizontes superficiales del suelo sepultado con los depósitos mas recientes.</p> <p>Color es rojo tenue tanto en seco como en húmedo (10R4/4) y (10R4/3). Estructura de bloques angulares y subangulares moderadamente desarrollados (10 a 80 mm), con presencia de cutanes argílicos, delgados, escasos y dentro del ped. Con cutanes de materia orgánica en los canales biogénicos. Limite inferior difuso y uniforme. Sin pedregosidad.</p> <p>La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 82.2 y 91.7% respectivamente. De textura arcillosa (30.2% de arena, 48.4% de arcilla y 21.4 % de limo); Densidad aparente de 0.9 g·cm⁻³ densidad real de 2.1 g·cm⁻³; Ligeramente ácido (pH en agua 6.20; pH en CaCl₂ de 5.66), Materia orgánica moderada (3.50%); El complejo catiónico esta dominado por calcio y magnesio (0.98 y 0.46 cmol·kg⁻¹), seguido por potasio (0.15 cmol·kg⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.10 dS·m⁻¹. Los cloruros, el fierro y el azufre son de 0.17, 0.001 y 0.025 cmol·kg⁻¹ respectivamente. La concentración de carbonatos es de 1.32%. La concentración de nitrógeno (NH₄⁺) y de fósforo soluble es de 0.15, 0.024 cmol·kg⁻¹ respectivamente.</p> |
| 2AB | 32 a 38 | Color en seco y en húmedo es rojo tenue (10R4/4) y (10R3/4). Estructura de bloques subangulares moderadamente desarrollada de 10 a 50 mm; densidad de raíces mediana, con revestimientos de arcilla de |

| | | |
|------------------|---------|---|
| | | <p>hasta un mm en bioporos y canales de raíces. Actividad biológica moderada y límite inferior abrupto y uniforme. Pedregosidad menor al 1%. La estabilidad en agua de agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 44.8 y 92.0 respectivamente. La textura es arcilla (26.4% de arena, 52.9% de arcilla y 20.7% de limo); Densidad aparente de 0.9 g·cm⁻³ densidad real de 2.0 g·cm⁻³. Moderadamente ácido (pH en agua 5.40; pH en CaCl₂ de 4.42); materia orgánica moderadamente elevada (3.34%); el complejo catiónico esta dominado por calcio y magnesio (1.14 y 1.78 cmol·kg⁻¹), seguido por potasio (0.13 cmol·kg⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es muy baja de 0.06 dS·m⁻¹. Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.23, 0.004 y 0.109 cmol·kg⁻¹ respectivamente; el porcentaje de carbonatos es de 0.98%; la concentración de nitrógeno (NH₄⁺) y de fósforo soluble es de 0.88 y 0.023 cmol·kg⁻¹ respectivamente.</p> |
| 2Bt ₁ | 38 a 52 | <p>Color en seco rojo tenue (10R5/4) y rojo oscuro (10R3/4) en húmedo. Estructura de bloques subangulares moderadamente desarrollada (10 a 65 mm), densidad de raíces baja, revestimientos de arcilla en bioporos y canales de raíces de hasta un mm de espesor. Actividad biológica de lombrices. Limite inferior es gradual y uniforme. Se encontró un piroclasto grueso (lapilli) de mas de 5 mm fuertemente intemperizado. La estabilidad en agua de agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 23.4 y 91.4 % respectivamente; Textura arcillosa (13.6% de arena, 80.4% de arcilla y 6.0% de limo), Densidad aparente de 0.9 g·cm⁻³ densidad real de 2.3 g·cm⁻³ moderadamente ácido (pH en agua 5.56; pH en CaCl₂ de 4.35); Materia orgánica 1.53%; El complejo catiónico esta dominado por calcio y magnesio (0.93 y 0.15 cmol·kg⁻¹), seguido por potasio (0.13 cmol·kg⁻¹) y con muy baja presencia de sodio; la CE es de 0.05 dS·m⁻¹. Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.23, 0.009 y 0.094 cmol·kg⁻¹ respectivamente; el porcentaje de carbonatos es de 0.99%; la concentración de nitrógeno (NO₃) y de fósforo soluble es de 1.47 y 0.023 cmol·kg⁻¹ respectivamente.</p> |
| 2Bt ₂ | 52 a 76 | <p>Color en seco es pardo (7.5YR5/2) y pardo oscuro (7.5YR4/4) en húmedo. Estructura en bloques subangulares fuertemente desarrollada (15 a 80 mm). Densidad de raíces muy baja; revestimientos de arcilla en bioporos, canales de raíces y facetas laterales de los agregados. Se presentan manchas (2%) de color amarillo rojizo. Con limite muy definido y tamaño de 2 a 5 mm en la matriz. Limite inferior difuso e irregular. La estabilidad en agua de agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 28.3 y 92.9% respectivamente; Textura arcillosa (4.4% de arena, 83.6% de arcilla y 12.0% de limo); Densidad aparente de 1.0 g·cm⁻³ densidad real de 2.8 g·cm⁻³; ligeramente ácido (pH en agua 6.01; pH en CaCl₂ de 4.87); Materia orgánica moderadamente alta (1.04%); el complejo catiónico esta dominado por calcio y potasio (0.52 y 0.13 cmol·kg⁻¹), seguido por magnesio (0.10 cmol·kg⁻¹) y con muy baja presencia de sodio; la CE es de 0.02 dS·m⁻¹. Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.14, 0.009 y trazas cmol·kg⁻¹ respectivamente; la concentración de carbonatos es del 0.96%; la concentración de nitrógeno (NH₄⁺) y de fósforo soluble es de 1.76 y 0.023 cmol·kg⁻¹ respectivamente.</p> |

| | | |
|-----|--------|--|
| 2BC | > a 76 | Color en seco amarillo rojizo (7.5YR6/6) y pardo intenso (7.5YR5/6) en húmedo. Estructura de bloques angulares fuertemente desarrollados (10 a 60 mm). No hay raíces. Con revestimientos de arcilla en las caras laterales externas, delgados (< 1 mm). Presenta trozos de saprolita en forma de manchas y motas en un 40% de la superficie del Ho, de color amarillo rojizo, con límite claro (5 a 25 mm) de forma irregular. La estabilidad en agua de agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 11.5 y 88.9 % respectivamente; Textura arcillosa (5.6 % de arena, 74.4 % de arcilla y 20.0% de limo); densidad aparente de 1.1 g·cm ⁻³ densidad real de 1.9 g·cm ⁻³ moderadamente ácido (pH en agua 5.72 pH en CaCl ₂ de 5.32); materia orgánica de 0.60 %; el complejo catiónico esta dominado por calcio y magnesio y potasio (0.98 y 0.25 0.13 cmol·kg ⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.02 dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.28, 0.004 y trazas cmol·kg ⁻¹ respectivamente; la concentración de carbonatos es del 0.94 %; la concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo soluble es muy pobre de 0.24 y 0.023 cmol·kg ⁻¹ respectivamente. |
|-----|--------|--|

Perfil de Agostadero (AG)

Altitud 2210 Msnm

Exposición: nor oeste

El perfil se ubica en la superficie cumbre o parteaguas de un lomerío suavizado por cenizas volcánicas, con pendiente del 1°. El área se encuentra zona desprovista de árboles, sin embargo se presentan arbustos que con cobertura aproximada del 12% y las gramíneas y herbáceas anuales el 100% de la superficie. Hay evidencias de pastoreo vacuno y caballar.

Tabla 3.2. Características del perfil de agostadero (AG).

| Ho | Profundidad en cm | Descripción |
|-----------------|-------------------|---|
| Ap | 0 a 12 | Color en seco rojo tenue (10R4/3) y rojo oscuro (10R3/2) en húmedo. Estructura de bloques subangulares moderadamente desarrollada (5 a 30 mm). Densidad de raíces alta. Pedregosidad < al 1% El límite inferior es claro y uniforme. La estabilidad en agua de agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 92.1 y 92.0 % respectivamente. Textura franca (23.6% de arena, 26.4% de arcilla y 50.0% de limo). Densidad aparente de 0.8 g·cm ⁻³ densidad real de 2.3 g·cm ⁻³ . Moderadamente ácido (pH en agua 5.44; pH en CaCl ₂ de 4.79). Materia orgánica alta (5.91%). El complejo catiónico esta dominado por calcio y magnesio (0.93, 0.20 cmol·kg ⁻¹), seguido por potasio (0.15 cmol·kg ⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre es de 0.23, 0.004 y trazas cmol·kg ⁻¹ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 1.10% La concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo soluble es de 1.18 y 0.024 cmol·kg ⁻¹ respectivamente. |
| Ap ₂ | 12 a 27 | Color en seco pardo tenue (10R4/3) y rojo oscuro (10R3/2) en húmedo. Estructura de bloques subangulares fuertemente desarrollados (10 a 35 mm). Densidad de raíces moderada. Presencia de cutanes de arcilla y de materia orgánica (< 1 mm) en las caras de los agregados y tubos de raíces. Manchas con frecuencia < del 1 %, negras de 0.5 mm, irregulares y dentro del ped. El límite inferior es difuso y ondulado. La estabilidad en agua de agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 11.5 y 88.9 % respectivamente. Textura arcillosa (22.36 % de arena, 62.36 % de arcilla y 15.28% de limo). Densidad aparente de 0.99 g·cm ⁻³ densidad real de 2.3 g·cm ⁻³ . Moderadamente ácido (pH en agua 5.33; pH en CaCl ₂ de 4.71). Materia orgánica (2.63%). El complejo catiónico esta dominado por calcio y potasio (0.52 y 0.15 cmol·kg ⁻¹), seguido por Mg (0.10 cmol·kg ⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.17, 0.027 y 0.109 cmol·kg ⁻¹ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 1.14%. La concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo soluble es muy pobre |

| | | |
|----|---------|--|
| | | (0.24 y 0.024 cmol·kg ⁻¹ respectivamente). |
| Bt | 27 a 43 | Color en seco y en húmedo es pardo intenso (7.5YR5/6) y (7.5YR4/6). Estructura de bloques subangulares fuertemente desarrollados (5 a 55 mm). Argilanes en tubos de raíces de espesor inferior a 1 mm. Pocas raíces. Límite inferior difuso y ondulado. La estabilidad en agua de agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 11.5 y 88.9 % respectivamente. Textura arcillosa (4.92% de arena, 77.08% de arcilla y 18.0% de limo). Densidad aparente de 1.00 g·cm ⁻³ densidad real de 2.00 g·cm ⁻³ . Moderadamente ácido (pH en agua 5.80; pH en CaCl ₂ de 4.94). Materia orgánica (1.70%). El complejo catiónico esta dominado por calcio y magnesio (0.57 y 0.15 cmol·kg ⁻¹), seguido por potasio (0.15 cmol·kg ⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.03 dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.17, trazas y trazas cmol·kg ⁻¹ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 1.23%. La concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo soluble es muy pobre (0.59 y 0.024 cmol·kg ⁻¹ respectivamente). |
| BC | 43 a 67 | Color en seco amarillo(10YR7/6) y amarillo parduzco (10YR6/8) en húmedo. Estructura de bloques subangulares fuertemente desarrollado (7 a 70 mm). Muy pocas raíces. Argilanes abundantes en los canales de raíces y caras de agregados de hasta 1 mm de espesor. Manchas en el 4% de la superficie, de color amarillo rojizo (3 a 15 mm) de límite claro y forma irregular. Límite inferior difuso y quebrado. La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es 29.7 y 89.2 % respectivamente. Textura arcillosa (4.92% de arena, 64.36% de arcilla y 30.72% de limo). Densidad aparente de 0.90 g·cm ⁻³ densidad real de 2.50 g·cm ⁻³ . Moderadamente ácido (pH en agua 5.66; pH en CaCl ₂ de 4.69). Materia orgánica (0.49%). El complejo catiónico esta dominado por calcio y magnesio (0.62 y 0.71 cmol·kg ⁻¹), seguido por potasio (0.15 cmol·kg ⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.01 dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.14, 0.004 y 0.062 cmol·kg ⁻¹ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 1.39%. La concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo soluble es muy pobre (0.18 y 0.024 cmol·kg ⁻¹ respectivamente). |
| Cw | > de 67 | Color en seco amarillo (10YR7/6) y pardo amarillento (10YR5/6) en húmedo. Estructura de bloques subangulares moderadamente desarrollada (5 a 35mm). Sin raíces. Se considera que es una saprofita de ignimbrita fuertemente intemperizada. La estabilidad en agua de agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es de 2.5 y 91.3 % respectivamente. Textura arcillosa (4.36% de arena, 77.64% de arcilla y 18.0 % de limo). Densidad aparente de 0.9 g·cm ⁻³ densidad real de 2.10 g·cm ⁻³ Moderadamente ácido (pH en agua 5.85; pH en CaCl ₂ de 4.92).Materia orgánica (0.93%). El complejo catiónico esta dominado por calcio y magnesio (0.41, 0.25 cmol·kg ⁻¹), seguido por potasio (0.15 cmol·kg ⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.01 dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.17, 0.009 y 0.025 cmol·kg ⁻¹ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 1.08%. La concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo soluble es muy pobre (0.18 y 0.024 cmol·kg ⁻¹ respectivamente). |

Perfil en Carcava (C)

Altitud 2205 Msnm

Exposición: sur oeste

El perfil se ubica en una ladera alta, con pendiente del 1 %, en la parte de escarpe remontante de una cárcava. El sitio está desprovisto de vegetación, aflorando el suelo mineral en el área de la cárcava y cubierto de vegetación herbácea de gramíneas en el frente erosivo. Hay evidencias de erosión laminar y en cárcavas. Los horizontes evidencian un incremento de materia orgánica subsuperficialmente indicando un suelo sepultado.

Tabla 3.3. Características del perfil de cárcava (C).

| Ho | Profundidad en cm | Descripción |
|----|-------------------|--|
| A | 0 a 21 | Color en seco rojo tenue (10R4/2) y rojo oscuro (10R3/2) en húmedo. Estructura bloques subangulares moderadamente desarrollada (5 a 50 mm). Densidad de raíces muy alta. Hay presencia de cristales de cuarzo (0.5 mm) de forma redondeada. Actividad biológica con raíces abundantes y larvas de escarabajos. Limite inferior es gradual y uniforme. La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm es 77.3% y de 0.25 a 2 mm de 92.0% respectivamente. Textura arcillosa (28.36% de arena, 49.64% de arcilla y 22.0% de limo). Densidad aparente de $0.96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ densidad real de $2.00 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Moderadamente ácido (pH en agua 5.03; pH en CaCl_2 de 4.22). Materia orgánica alta (4.93%). El complejo catiónico esta dominado por esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.93 , 0.20 y $0.14 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$), con muy baja presencia de sodio. La CE es de $0.01 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.23 , trazas y $0.094 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 1.32%. La concentración de nitrógeno (NH_4^+) y de fósforo soluble son muy pobres (1.18 y $0.023 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente). |
| Bt | 21 a 43 | Color en seco rojo (10R5/6) y rojo oscuro (10R3/6) en húmedo. Estructura de bloques subangulares fuertemente desarrollada. Densidad de raíces alta. Presencia de argilanes en las caras de los agregados, moderadamente abundantes y de < de 1 mm de espesor. Hay cutanes de Mn fuera del ped, en las caras de los agregados, abundantes, de menos de 1 mm de espesor. Manchas por presencia de Mn, en 1% de color negro con límite claro, de 5 a 15 mm, de forma irregular y fuera del ped. Se presentan escasas facetas de deslizamiento. La actividad biológica corresponde a la presencia de raíces con alta densidad. El límite inferior es gradual y ondulado. La estabilidad en agua de agregados para las porciones de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es 77.3 y 92.0% respectivamente. Textura arcillosa (10.36% de arena, 74.92% de |

| | | |
|------|---------|--|
| | | arcilla y 14.72 % de limo). Densidad aparente de 0.93 g·cm ⁻³ densidad real de 2.60 g·cm ⁻³ . Neutro (pH en agua 6.47; pH en CaCl ₂ de 5.53). Materia orgánica (0.66%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.98, 0.05 0.14 cmol·kg ⁻¹), con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.01 dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.17, 0.004 y trazas cmol·kg ⁻¹ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 1.46%. La concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo soluble son muy pobres (0.12 y 0.023 cmol·kg ⁻¹ respectivamente). |
| 2A | 43 a 72 | Color en seco rojo (10R5/6) y rojo oscuro (10R3/6) en húmedo. Estructura de bloques subangulares fuertemente desarrollados (10 a 70 mm). Densidad de raíces mediana. Se presentan argilanes en tubos de raíces y caras de agregados de espesor inferior a 1 mm. Hay cutanes de Mn en caras de agregados, abundantes de menos de 1 mm de espesor. Manchas de Mn en 30 % de la superficie, de color negro, límite claro de 10 a 45 mm de forma irregular. Otras manchas de color pardo amarillento claro de 10 a 35 mm, de forma irregular, límite claro. Abundantes facetas de deslizamiento. Límite inferior difuso e irregular. La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y de 0.25 a 2 mm es 1.1 y 90.8% respectivamente. Textura arcillosa (6.36% de arena, 77.64% de arcilla y 16.0% de limo). Densidad aparente de 1.07 g·cm ⁻³ densidad real de 2.50 g·cm ⁻³ . Moderadamente ácido (pH en agua 6.45; pH en CaCl ₂ de 5.59). Se considera que este suelo fue sepultado por deslizamiento y el aumento de la materia orgánica (3.07%) apoya el supuesto. El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.62, 1.02 y 0.14 cmol·kg ⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.02 dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.11, 0.004 y trazas cmol·kg ⁻¹ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 1.39%. La concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo soluble son muy pobres (0.12 y 0.023 cmol·kg ⁻¹ respectivamente). |
| 2 Bt | > de 72 | Color en seco rojo (10R5/6) y rojo oscuro (10R3/6) en húmedo. Estructura bloques subangulares fuertemente desarrollados (5 a 35mm). Sin raíces. Presencia de argilanes en caras de agregados y tubos de raíces, muy abundantes de hasta 1 mm de espesor. Manchas en el 40% de la superficie de color pardo claro, con límite claro (de 20 a 50 mm), de forma irregular. La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y de 0.25 a 2 mm es de 0.5 y 88.9% respectivamente. Textura arcillosa (5.08% de arena, 74.92% de arcilla y 20.0% de limo). Densidad aparente de 1.17 g·cm ⁻³ densidad real de 2.70 g·cm ⁻³ . Moderadamente ácido (pH en agua 6.3; pH en CaCl ₂ de 5.7). Materia orgánica (2.74%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.52, 0.92 y 0.14 cmol·kg ⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.12 dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.17, 0.004 y 0.062 cmol·kg ⁻¹ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 1.42%. La concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo soluble son muy pobres (0.12 y 0.023 cmol·kg ⁻¹ respectivamente). |

Perfil en Parcela abandonada (PA)

Altitud 2190 Msnm

Exposición: sur oeste

Ubicación ladera alta con pendiente del 5°, bajo una zona en etapa temprana de sucesión secundaria local desarrollada al ser abandonada la tierra de labor por 5-7 años, presenta elementos arbustivos y herbáceos que cubren aproximadamente el 7 y 50% respectivamente, hay individuos juveniles del estrato arbóreo (*Pinus spp* y *Crataegus pubescens*) Hay evidencias de pastoreo vacuno y caballar y actividad de tuzas.

Tabla 3.4. Características del perfil de bosque de parcela abandonada (PA).

| Ho | Profundidad en cm | Descripción |
|-----------------|-------------------|---|
| Ap | 0 a 18 | Color en seco rojo tenue (10R4/4) y rojo oscuro (10R3/4) en húmedo. Estructura microgranular moderadamente desarrollada/ bloques subangulares débilmente desarrollada (10 a 40 mm). Densidad de raíces alta. Hay larvas de coleópteros y actividad de tuzas. El límite inferior es difuso y uniforme. La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es 81.8 y 87.25% respectivamente. Textura franco arenosa (51.64 % de arena, 16.36% de arcilla y 32.0% de limo) Densidad aparente de 0.97 g·cm ⁻³ densidad real de 1.95 g·cm ⁻³ . Moderadamente ácido (pH en agua 5.52; pH en CaCl ₂ de 4.80). Materia orgánica (4.11%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (1.96, 0.15 y 0.15 cmol·kg ⁻¹) con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.04 dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.23, 0.004 y 0.062 cmol·kg ⁻¹ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 1.68%. La concentración de nitrógeno (NH ₄ ⁺) y de fósforo asimilables es muy pobre de (2.06 y 0.024 cmol·kg ⁻¹ respectivamente). |
| Ap ₂ | 18 a 42 | Color en seco pardo (7.5YR5/4) y pardo intenso (7.5YR5/6) en húmedo. Estructura microgranular moderadamente desarrollada/ bloques subangulares (10 a 50mm) débilmente desarrollada. Densidad de raíces mediana. Actividad biológica de larvas de coleópteros y tuzas. Límite inferior gradual y uniforme. La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y de 0.25 a 2 mm es 45.3 y 88.2% respectivamente. Textura franca (51.64% de arena, 16.36% de arcilla y 32.0% de limo). Densidad aparente de 1.03 g·cm ⁻³ densidad real de 2.08 g·cm ⁻³ . Moderadamente ácido (pH en agua 5.64; pH en CaCl ₂ de 5.10). Materia orgánica alta (3.61%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (1.60, 0.41 y 0.15 cmol·kg ⁻¹) con muy baja presencia de sodio. La CE es muy baja de 0.03 dS·m ⁻¹ . Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.08, 0.009 y |

| | | |
|----|---------|---|
| | | trazas $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 0.87%. La concentración de nitrógeno (NH_4^+) y de fósforo soluble es muy baja (0.24, 0.024 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente). |
| AB | 42 a 59 | Color en seco rojo tenue (10R4/4) y rojo oscuro (10R3/4) en húmedo. Estructura de bloques subangulares moderadamente desarrollada (5 a 50mm). Densidad de raíces muy baja. Argilanes en caras de agregados, pocos de menos de 1 mm de espesor. Límite inferior gradual y ondulado. La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y de 0.25 a 2 mm es 1.40 y 91.5% respectivamente. Textura arcillosa (12.36% de arena, 73.64% de arcilla y 14% de limo). Densidad aparente de 0.90 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ densidad real de 2.50 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Levemente ácido (pH en agua 6.27; pH en CaCl_2 de 5.33). Materia orgánica (1.26%). El complejo catiónico está dominado por calcio, magnesio y potasio (1.19, 0.15 y 0.15 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) con muy baja presencia de sodio. La CE es extremadamente baja de 0.02 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Los cloruros, el hierro extractable y el azufre son de 0.17, trazas y 0.062 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 0.94%. La concentración de nitrógeno (NH_4^+) y de fósforo soluble es muy baja (1.18 y 0.024 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente). |
| Bt | 59 a 70 | Color en seco rojo (10R4/6) y rojo oscuro (10R3/4) en húmedo. Estructura de bloques angulares moderadamente desarrollados (11 a 55 mm). Densidad de raíces muy baja. Revestimientos de arcilla en tubos de raíces y caras de agregados. Manchas de Mn en el 1% de la superficie, de color negro, límite claro e irregular, de 1 a 3 mm en las caras de agregados. Actividad biológica con presencia de lombrices que generan poros vesiculares de hasta 15 mm de diámetro. Límite inferior difuso y ondulado. La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y de 0.25 a 2 mm es 0.3 y 91.7% respectivamente. Textura arcillosa (18.36% de arena, 67.64% de arcilla y 14.0% de limo). Densidad aparente de 0.90 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ densidad real de 2.08 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Levemente ácido (pH en agua 6.30; pH en CaCl_2 de 5.40). Materia orgánica (0.99%). El complejo catiónico está dominado por calcio, magnesio y potasio (1.19, 0.82 y 0.15 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$), con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.03 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Los cloruros, el hierro extractable y el azufre son de 0.14, 0.009 y 0.109 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 0.92%. La concentración de nitrógeno (NH_4^+) y de fósforo soluble son muy bajas (0.18, 0.024 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente). |
| Bt | > 70 | Color en seco rojo (10R4/6) y rojo oscuro (10R3/4) en húmedo. Estructura de bloques angulares fuertemente desarrollados (5 a 90 mm). Densidad de raíces muy baja. Argilanes fuera del ped, en caras de agregados, moderadamente abundantes de menos de 1 mm. Hay cutanes de Mn moderadamente abundantes, en caras de agregados, de color negro, con límites definidos, delgados de menos de 1 mm de espesor. Presencia de manchas de Mn en el 5% de la superficie del horizonte, negras, con límite claro, de 14 mm, forma irregular en caras de agregados. Las facetas de deslizamiento son pocas. La actividad biológica es de lombrices. La estabilidad en agua de los agregados 2 a 4 mm y 0.25 a 2 mm es 0.3 y 92.1% respectivamente. Textura arcillosa |

| | | |
|--|--|---|
| | | <p>(6.92% de arena, 80.36% de arcilla y 12.72% de limo). Densidad aparente de $0.96 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ densidad real de $2.50 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Ligeramente ácido (pH en agua 6.33; pH en CaCl_2 de 5.47). Materia orgánica (1.10%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.62, 0.51 y $0.15 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) con muy baja presencia de sodio. La CE es de $0.03 \text{ dS}\cdot\text{m}^{-1}$. Los cloruros, el fierro extractable y el azufre son de 0.17, 0.009 y trazas $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente. El porcentaje de carbonatos es de 0.78%. La concentración de nitrógeno (NH_4^+) y de fósforo soluble es muy baja (0.88 y $0.024 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ respectivamente).</p> |
|--|--|---|

Perfil en Plantación (PCu)

Altitud 2195 Msnm

Exposición: sur oeste

El perfil se ubica en la superficie cumbral o parteaguas de un lomerio suavizado por cenizas volcánicas, con pendiente de 2°, bajo reforestación de *Cupresus lusitanica* con edad de 35 a 40 años y densidad promedio de 216 árboles/ha, diámetro promedio de la copa de 7.0 mm con cobertura de dosel del 83.7%, con escasos individuos del estratos arbustivo y herbáceo y con estrato rasante de musgos muy abundante. El microrelieve muestra evidencias de actividad agrícola previa al establecimiento de la plantación.

Tabla 3.5. Características del perfil de bosque de plantación de *Cupresus* (PCu).

| Ho | Profundidad en cm | Descripción |
|-----------------|-------------------|--|
| Ap | 0 a 19 | <p>Color en seco pardo amarillento oscuro (10YR3/6) y pardo rojizo oscuro (5YR3/2) en húmedo. Estructura fuertemente desarrollada, parcialmente (50%) granular y parcialmente en bloques subangulares; con abundantes raíces (de 25 a 50/dm²) de tamaño fino (0.5 a 3 mm) del estrato herbáceo, con moderadas (5-10) raíces medianas, escasas gruesas (1 a 5/ dm²); con abundantes poros medianos a gruesos, irregulares que forman redes; con abundantes hifas; con reacción pobre al alofano; con reacción fuerte al H₂O₂, esta parte superficial se esta enriqueciendo con materia orgánica.</p> <p>La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y .025 a 2 mm es 79.5 y 89.6% respectivamente. Textura arcilla limosa (16.0% de arena, 45.4 % de arcilla y 38.6% de limo). Densidad aparente de 0.90 g·cm⁻³ densidad real de 2.50 g·cm⁻³. Moderadamente ácido (pH en agua 5.35; pH en CaCl₂ de 4.49). Materia orgánica elevada (5.10%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (1.20, 0.43 y 0.16 cmol·kg⁻¹) con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.03 dS·m⁻¹. La CIC es de 8.42 cmol·kg⁻¹ y la Sb es del 98%.La transición al siguiente horizonte es tenue y ondulada.</p> |
| Bt ₁ | 19 a 36 | <p>Color en seco rojo amarillento (5YR5/6) y pardo rojizo oscuro (2.5YR2.5/4) en húmedo. Estructura fuertemente desarrollada, bloques subangulares, grandes y gruesos; con pocas raíces (de 10 a 25/dm²) de tamaño fino (0.5 a 3 mm), con moderadas (5-10) raíces medianas, escasas gruesas (1 a 5/ dm²); con abundantes poros medianos y finos, irregulares que forman redes; con abundantes hifas; con reacción pobre al alofano; con reacción moderada al H₂O₂, la diferencia con el horizonte superior es el color por disminución la</p> |

| | | |
|-----------------|----------|--|
| | | <p>materia orgánica;</p> <p>La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y .025 a 2 mm es 50.9 y 87.1% respectivamente. Textura arcillosa (8.0% de arena, 65.3% de arcilla y 26.7% de limo). Densidad aparente de 1.10 g·cm⁻³ densidad real de 2.0 g·cm⁻³. Moderadamente ácido (pH en agua 5.80; pH en CaCl₂ de 5.26). Materia orgánica (2.60%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.60, 0.40 y 0.10 cmol·kg⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.01 dS·m⁻¹. La CIC es de 5.21 cmol·kg⁻¹ y la SB de 54.95%. La transición al siguiente horizonte es tenue y ondulada.</p> |
| Bt ₂ | 36 a 76 | <p>Color en seco rojo amarillento (5YR5/8) y pardo rojizo (2.5YR4/4) en húmedo. Estructura de bloques subangulares fuertemente desarrollada; con escasas raíces (5 a 10/dm²) de tamaño fino y mediano; con abundantes poros medianos y grandes, se observan irregulares formando redes; con recubrimiento de arcilla; con reacción pobre al alofano; con reacción moderada al H₂O₂.</p> <p>La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y .025 a 2 mm es 35.6 y 85.7% respectivamente. Textura arcillosa (5.0% de arena, 75.3% de arcilla y 19.7% de limo). Densidad aparente de 1.0 g·cm⁻³ densidad real de 2.2 g·cm⁻³. Moderadamente ácido (pH en agua 6.10; pH en CaCl₂ de 5.12). Materia orgánica (2.20%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.55, 0.45 y 0.05 cmol·kg⁻¹) con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.01 dS·m⁻¹. La CIC es de 5.14 cmol·kg⁻¹ y la SB de 48.94%. La transición al siguiente horizonte es tenue y ondulada.</p> |
| Bt ₃ | 76 a 99 | <p>Color en seco rojo amarillento (5YR4/6) y rojo (2.5YR4/6) en húmedo. Estructura de bloques subangulares fuertemente desarrollada; con muy escasas raíces (2 a 5/dm²) de tamaño fino y mediano; con abundantes poros medianos, irregulares que forman redes; con recubrimiento de arcilla; con reacción pobre al alofano; con reacción debil al H₂O₂.</p> <p>La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y .025 a 2 mm es 0.40 y 90.5% respectivamente. Textura arcillosa (4.5% de arena, 80.2 % de arcilla y 15.3% de limo). Densidad aparente de 1.00 g·cm⁻³ densidad real de 2.20 g·cm⁻³. Moderadamente ácido (pH en agua 5.35; pH en CaCl₂ de 4.14). Materia orgánica (2.00%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.50, 0.60 y 0.08 cmol·kg⁻¹) y con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.01 dS·m⁻¹. La CIC es de 5.67 cmol·kg⁻¹ y la SB de 51.14%. La transición del horizonte es tenue y ondulada.</p> |
| Bt ₄ | 99 a 146 | <p>Color en seco rojo (2.5YR4/8) y rojo oscuro (2.5YR3/6) en húmedo. Estructura de bloques subangulares, fuertemente desarrollada; con escasas raíces (1 a 5/dm²) de tamaño mediano; con abundantes poros medios y gruesos, irregulares que forman redes; con recubrimiento de arcilla; < del 1% de los pedrs muestran manchas de 1 a 2 mm de color gris azulado, que posiblemente se deben a reducción; con reacción pobre al alofano; con reacción muy débil al</p> |

| | | |
|-----------------|-----------|---|
| | | <p>H₂O₂.</p> <p>La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y .025 a 2 mm es 6.0 y 89.70% respectivamente. Textura arcillosa (4.5% de arena, 75.3% de arcilla y 20.2% de limo). Densidad aparente de 1.10 g·cm⁻³ densidad real de 2.00 g·cm⁻³. Moderadamente ácido (pH en agua 5.24; pH en CaCl₂ de 4.44). Materia orgánica (1.30%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.50, 0.63 y 0.08 cmol·kg⁻¹) con muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.01 dS·m⁻¹. La CIC es de 5.84 cmol·kg⁻¹ y la SB de 57.64%. La transición del horizonte es tenue y ondulada.</p> |
| Bt ₅ | 146 a 178 | <p>Color en seco rojo amarillento (5YR5/8) y rojo oscuro (2.5YR3/6) en húmedo.</p> <p>Estructura en bloques subangulares, grande, gruesa y fuertemente desarrollada; con escasas raíces (1 a 5/dm²) grande; con abundantes poros medianos y gruesos, irregulares que forman redes; hay microporos que tienen recubrimiento naranja, que parece fierro; también se observan recubrimientos de arcilla; < del 1% de los peds muestran manchas de 1 a 2 mm de color gris azulado, que posiblemente se deben a reducción; con reacción pobre al alofano; con reacción muy debil al H₂O₂.</p> <p>La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y 025 a 2 mm es 5.20 y 83.4% respectivamente Textura arcillosa (8.0 % de arena, 75.3% de arcilla y 16.7% de limo). Densidad aparente de 1.00 g·cm⁻³ densidad real de 2.20 g·cm⁻³. Moderadamente ácido (pH en agua 5.80; pH en CaCl₂ de 4.66). Materia orgánica (0.80%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.35, 0.65 y 0.07 cmol·kg⁻¹) y muy baja presencia de sodio. La CE es de 0.01 dS·m⁻¹. La CIC es de 5.24 cmol·kg⁻¹ y la SB de 52.41%. La transición de este al siguiente horizonte es tenue y ondulada.</p> |
| Bt ₆ | > de 178 | <p>Color en seco rojo amarillento (5YR4/6) y rojo oscuro (2.5YR3/6) en húmedo. Estructura en bloques subangulares, grande, gruesa y fuertemente desarrollada; < del 1% de los peds muestran manchas de 1 a 2 mm de color gris azulado, que posiblemente se deben a reducción; con escasas raíces (1 a 5/dm²) grande; con abundantes poros medianos y gruesos, irregulares que forman redes; en algunos poros hay vesículas que parece migración de fierro y algunos micro cuarzos que semejan al agata; con reacción pobre al alofano; con reacción muy debil al H₂O₂.</p> <p>La estabilidad en agua de los agregados de 2 a 4 mm y 025 a 2 mm es 8.9 y 83.10% respectivamente. Textura arcillosa (12% de arena, 65.3% de arcilla y 22.7% de limo). Densidad aparente de 1.00 g·cm⁻³ densidad real de 2.10 g·cm⁻³. Moderadamente ácido (pH en agua 6.03; pH en CaCl₂ de 5.63). Materia orgánica (0.65%). El complejo catiónico esta dominado por calcio, magnesio y potasio (0.25, 0.63 y 0.04 cmol·kg⁻¹) y muy baja presencia de sodio. La CE es de 1.01 dS/m. La CIC es de 4.57 cmol·kg⁻¹ y la SB de 48.65%</p> |

DISCUSIÓN E INTERPRETACIÓN DE LOS PERFILES

En general todos los perfiles analizados en la zona se ubican en pendiente muy suaves ($<5^\circ$), las características morfológicas y los datos recabados en campo y laboratorio indican que los suelos se han desarrollado *in situ*, bajo un régimen de humedad ústico, los materiales parentales son en todos los casos piroclastos. Los cuales bajo condiciones climáticas similares a las actuales evolucionaron formando suelos lavados con horizontes argílicos posiblemente en forma similar a la reportada por Sedov y colaboradores (2003a; 2003b) en otras áreas del eje volcánico transmexicano.

Los suelos originales en el área, cuyo posible mejor representante es el suelo en superficie cumbral bajo bosque de pino-encino pueden considerarse poligenéticos con un perfil complejo y presencia de discontinuidad litológica. Bajo esta óptica, el pipedón corresponde a un Cambisol, teniendo como horizonte diacrítico un horizonte cámbico, mientras que el endopedón corresponde a un suelo sepultado con horizonte diacrítico argílico, cuya clasificación lo ubica como un Lixisol.Húmico.

Características del Cambisol

En condiciones poco alteradas bajo un dosel con los tres estratos (arbóreo, arbustivo y herbáceo), presenta un mantillo grueso (22 cm. de espesor) y bien estructurado, con dos capas bien diferenciadas, una con hojarasca reciente sin descomposición aparente ni fragmentación, la segunda con descomposición y fragmentación avanzada del material vegetal.

Es un suelo delgado (de 30 a 40 cm) consta de tres capas, un horizonte A ócrico, delgado, rojizo, (que incluye dos subhorizontes) y un horizonte AB también subdividido y en el cual parece mezclarse el suelo sepultado con los materiales del suelo mas joven. Esta mezcla se evidencia por compartir características tanto de del Cambisol, como del Lixisol sepultado.

En el Cambisol en condiciones de bosque domina la estructura en bloques subangulares biogénicos, fuertemente desarrollada y muy estable. Los

agregados tienen origen tanto coprolítico como de refugios y galerías. La actividad biológica es intensa por raíces muy abundantes, canales de bioturbación con presencia de lombrices, escarabajos y muchas larvas de insectos. La textura es franco arcillo arenosa (por su origen es posible que haya pseudoarenas y pseudolimos). El pH (ligeramente ácido) es muy homogéneo en el perfil. Tiene abundante materia orgánica que es mayor en el horizonte superficial (5.7%) y decrece paulatinamente con la profundidad hasta 3.5%. Los cationes como el Calcio y el Magnesio tienen elevadas proporciones, posiblemente por la fuerte actividad biológica y los complejos organominerales.

Características del Lixisol Húmico

Este suelo tiene un origen similar al Cambisol previamente descrito, habiéndose formado de material piroclástico. Posteriormente fue sepultado por nuevos depósitos piroclásticos que han evolucionado hasta formar un Cambisol.

En el Lixisol, el horizonte superficial quedó mezclado con los nuevos depósitos por lo que muestra características de ambos suelos. Presenta un potente horizonte árgico (mayor de 50 cm), cuya estructura es de bloques subangulares, moderadamente desarrollada. Hay presencia de revestimientos de arcilla de hasta 1 mm en bioporos y canales de raíces.

La textura es arcillosa y los contenidos de arcilla van de 48% en la parte superior a 83% en la más profunda. El pH (ligeramente ácido) es muy homogéneo en el perfil y tiene abundante materia orgánica que decrece en la profundidad (3.34 a 0.60%). Los cationes (Ca, Mg, K y Na) tienen bajas concentraciones (de 1.65 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ a trazas)

La estabilidad en agua de los agregados de 2-4 mm es moderada (45%) y decrece rápidamente con la profundidad (a 11%), pero la estabilidad de los agregados mas pequeños (0.25-2mm) es muy elevada (92%) y decrece lentamente con la profundidad (a 89%).

La actividad biológica es intensa, pero menor que en el cambisol, sin embargo se detectó la presencia de lombrices, larvas de insectos y raíces a profundidades considerables.

Desde una perspectiva de conjunto, tanto por las características de los diferentes perfiles como la cercanía de los sitios se infiere que bajo alteración de la cubierta vegetal, como en el agostadero, en parcelas agrícolas en uso o abandonadas, en condiciones de cárcavas ó aún en suelos agrícolas con plantaciones forestales, la presencia del mantillo orgánico disminuye o desaparece y el Cambisol no es reconocible. Ya sea por perdida por erosión ó formación de un horizonte antrópico por paso de arado, que mezcla la porción correspondiente al cambisol ó deja expuestos los materiales arcillosos del Lixisol. La profundidad y características físico-químicas son diferentes en cada sitio de estudio, pero muestran similitudes que permiten inferir que se trata de un Lixisol..

3.2 MUESTREO DE INFILTRACIÓN

En el muestreo de infiltración se utilizó el infiltrómetro de anillo sencillo y carga constante descrito en el Capítulo 2.

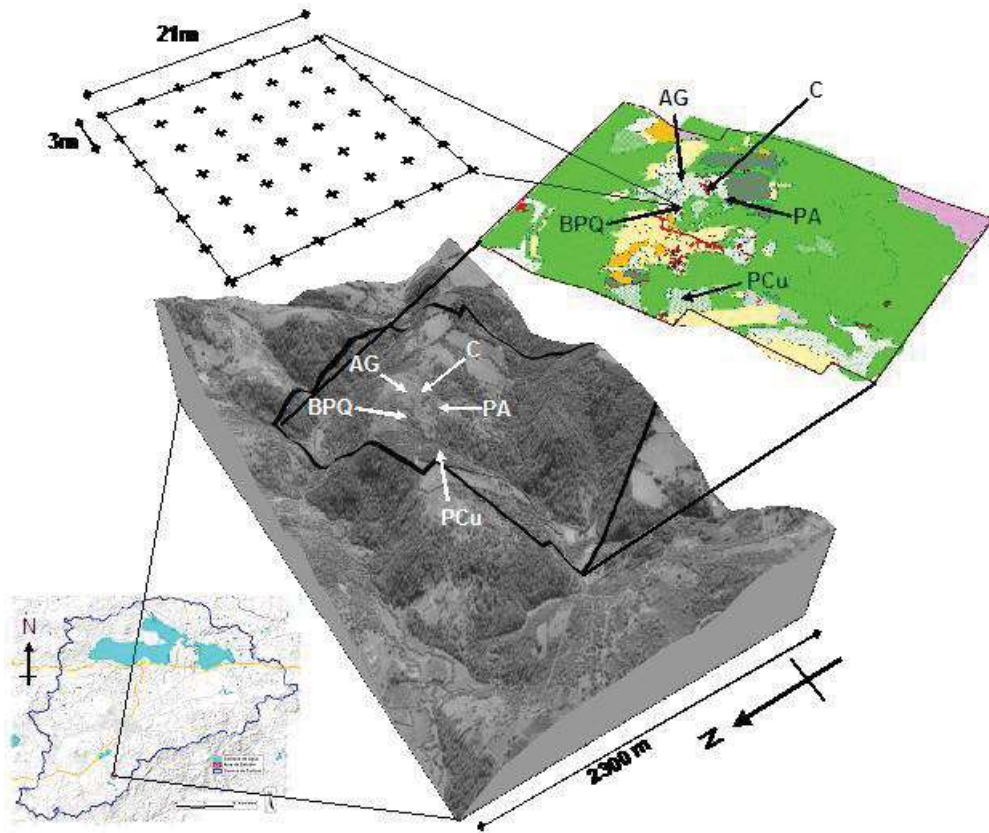


Figura 3.1. Ubicación de los sitios de muestreo en la Cuenca de Cuitzeo, relación respecto a las diferentes coberturas y usos en el área (mapa de uso del suelo) y ejemplo de disposición de la malla de muestreo de infiltración. Bosque de pino encino (BPQ), agostadero (AG), parcela abandonada (PA), cárcava (C), plantación de *Cupresus* (PCu).

Los ensayos de infiltración se distribuyeron en “sitios” de muestreo con un patrón regular de malla de 7x7 puntos (49 puntos) con separación de 3 metros en ambos sentidos, la Figura 3.1 ilustra el arreglo de los puntos en la malla y la ubicación de los sitios.

Los infiltrómetros fueron instalados conforme a lo mencionado en el Capítulo 2 (pg 22).

Para el cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo (K_{fs}) se empleó el método Wu2 (Wu et al., 1999) utilizando datos de la fase estacionaria de la curva de infiltración acumulada (tiempo vs lámina acumulada) y los parámetros a y b de la ecuación generalizada (Wu y Pan, 1997)

Además para cada punto donde se realizó el ensayo de infiltración y previo a este se tomaron muestras superficiales con un cilindro metálico a una distancia aproximada de 10 cm del sitio de inserción de infiltrómetro para determinar la densidad aparente por el método del cilindro (Miller y Donahue, 1990) y el contenido de humedad inicial por método gravimétrico (DOF, 2002), de esta muestra se obtuvo también el contenido de materia orgánica por el método de oxidación en húmedo Walkley y Black (DOF, 2002), las proporciones de arena, limo y arcilla en porcentaje por el método del hidrómetro de Boyoucos (NOM-021-RECNAT-2000; (DOF, 2002)). Se calculó el espacio poroso asumiendo una densidad real de $2.5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Duchaufour, 1975) y la proporción de agregados estables en agua para dos diámetros aparentes 2.0-4.0 mm y 0.25-2.0 mm, con mallas de 1.65 mm para el primer caso y 0.25 mm para el segundo, utilizando la técnica de Seybold y Herrick (2001) modificada.

Una vez terminado cada ensayo de infiltración se tomó una muestra del interior del anillo y se utilizó para estimar el contenido de humedad final por método gravimétrico.

Análisis estadístico y geoestadístico

Posteriormente, se realizaron pruebas de ajustes a la distribución normal para la K_{fs} , utilizando el estadístico W de Shapiro-Wilk, y se realizaron análisis de varianza de una vía (ANOVA) y de diferencia honesta significativa de Tukey (DHST) para tamaño de muestra desigual y su aplicación a la formación de grupos homogéneos (StatSoft, 1988).

La geoestadística y otros métodos de análisis de variación espacial han sido empleados en estudios donde se desea conocer la variación intrínseca de alguna propiedad, o variable en un ámbito espacialmente definido (Webster y

Oliver, 2001; Bishop y Lark, 2006). En nuestro caso aplicamos el enfoque geoestadístico para conocer los patrones de variación espacial de la K_{fs} para cada uno de los sitios.

Se parte del supuesto de que el valor de K_{fs} obtenido en cada uno de los puntos de muestreo es la realización de un proceso estocástico (Webster y Oliver, 2001). Uno de los puntos clave del análisis geoestadístico es la correcta estimación del variograma experimental (Webster y Oliver, 2001). Éste es un tipo especial de gráfica donde el eje de las ordenadas corresponde a la distancia, en intervalos definidos por el investigador y las abscisas a la semivarianza promedio de todos los pares de puntos dentro de un conjunto de datos en un intervalo de distancia definido.

Para cada conjunto de datos podemos estimar la semivarianza utilizando:

$$\gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) = \frac{1}{2} \{z(\mathbf{x}_i) - z(\mathbf{x}_j)\}^2 \quad [3.1]$$

Donde el término a la izquierda $\gamma(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$ es la semivarianza para un par de puntos cualesquiera y el término derecho es un medio de la diferencia cuadrática en el valor de la propiedad \mathbf{z} para estos puntos, por lo que para un conjunto de puntos separados por una distancia \mathbf{h} la semivarianza del intervalo de distancia está definida por:

$$\gamma(\mathbf{h}) = \frac{1}{2} [m(\mathbf{h})]^{-1} \sum_{i=1}^{m(\mathbf{h})} \{z(\mathbf{x}_i) - z(\mathbf{x}_i + \mathbf{h})\}^2 \quad [3.2]$$

Donde $\gamma(\mathbf{h})$ es la semivarianza para el intervalo de distancia \mathbf{h} y $m(\mathbf{h})$ corresponde al número de pares de puntos separados por la distancia \mathbf{h} .

Esto aplica siempre y cuando los puntos analizados se encuentren exactamente a la distancia \mathbf{h} . Sin embargo, debido a que esto no ocurre en la realidad, se emplean intervalos de distancia, donde los datos de la propiedad están definidos por $z_i = z(\mathbf{x}_i)$ donde $i=1, 2, \dots, N$. En este momento, el intervalo de distancia es

escalar, $h=|h|$, para el que γ_{μ} (media de las semivarianzas) puede calcularse solo a intervalos integrales y se lleva acabo de la siguiente forma:

$$\gamma_{\mu} = \frac{1}{2} [N-h]^{-1} \sum_{i=1}^{N-h} \{z_i - z_{i+h}\}^2 \quad [3.3]$$

Primero se calculan las diferencias cuadráticas entre los pares vecinos z_1 y z_2 , z_2 y z_3 , y así progresivamente hasta computar el total de pares para el primer intervalo h , para posteriormente promediarse. Esto para una condición unidimensional.

Para el caso de una retícula de tamaño regular en dos dimensiones con m renglones y n columnas tenemos que:

$$\gamma_{\mu(p,q)} = \frac{1}{2} [(m-p)(n-q)]^{-1} \sum_{i=1}^{m-p} \sum_{j=1}^{n-q} \{z(i,j) - z(i+p, j+q)\}^2, \quad [3.4]$$

$$\gamma_{\mu(p,-q)} = \frac{1}{2} [(m-p)(n-q)]^{-1} \sum_{i=1}^{m-p} \sum_{j=q+1}^{n-q} \{z(i,j) - z(i+p, j-q)\}^2,$$

Donde p y q son los intervalos en el sentido de las columnas y renglones respectivamente. En general el intervalo se puede considerar como el espaciado de la retícula (para mayor detalle consultar Webster y Oliver (2001)).

El semivariograma representa la “diferencia” que tienen entre si los puntos que se encuentran a un distancia definida, cuando una variable presenta autocorrelación espacial, esto es cuando se relaciona consigo misma en el espacio el variograma indica por lo general un incremento (Figura 3.2A) hasta alcanzar una meseta en donde el incremento de la distancia ya no se relaciona con un incremento en la semivarianza. Otra condición es que la semivarianza (γ) muestre un decremento con el incremento de la distancia (Figura 3.2B).

Cuando no existe relación espacial de las variables, se obtiene un efecto pepita (nugget en la literatura anglosajona) (Figura 3.2C) e indica que a las distancias

del muestreo no hay una dependencia espacial para la variable analizada (Webster y Oliver, 2001).

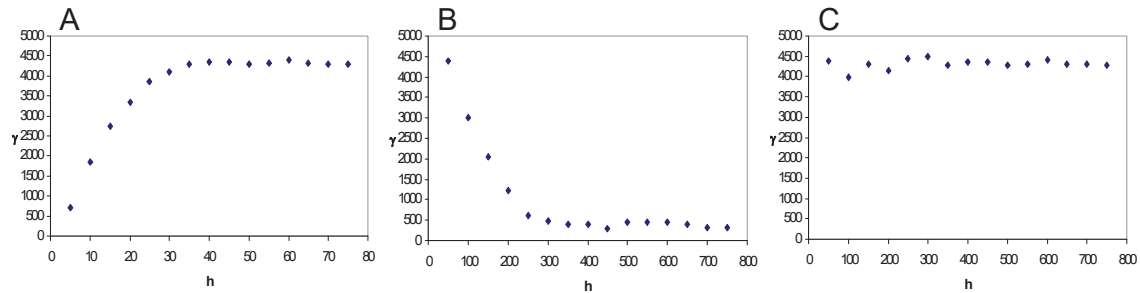


Figura 3.2. Variogramas típicos, A) incremento de la semivarianza (γ) con el incremento de la distancia (h), B) decremento de la semivarianza (γ) con el incremento de distancia (h) y C) fenómeno sin dependencia espacial semivarianza (γ) y distancia (h) para los intervalos muestreados, efecto pepita “puro”.

En el presente trabajo se empleó el programa VarioWin 2.21 y sus módulos Prevar2D, Vario2D with PCF y Model (Pannatier, 1996) para el cálculo y graficación de los semivariogramas. Los semivariogramas experimentales se calcularon a partir de los datos de K_{fs} y $\ln K_{fs}$ para cada uno de los sitios.

Distribución probabilística de la K_{fs}

Se realizaron un total de 231 ensayos de infiltración para los cinco tipos de cobertura y uso del suelo. Los parámetros de estadística descriptiva se presentan en la Tabla 3.6; las conductividades hidráulicas saturadas promedio se ubicaron en 99.72(PA), 160.76 (C), 378.94 (AG), 1578.57 (BPQ) y 264.30 (PCu) $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$.

Tabla 3.6. Estadística descriptiva para la conductividad hidráulica saturada de campo.

| Clave | Minimo | Máximo | Promedio | DS | N |
|-------|--------|---------|----------|---------|----|
| BPQ | 1.90 | 5817.24 | 1578.57 | 1576.78 | 43 |
| AG | 15.31 | 2144.38 | 378.94 | 465.97 | 42 |
| C | 0.34 | 975.25 | 160.76 | 246.41 | 49 |
| PA | 2.76 | 420.33 | 99.72 | 92.02 | 48 |
| PCu | 0.11 | 1282.83 | 264.30 | 393.47 | 49 |

(K_{fs}) en $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ para las distintas coberturas y usos del suelo bosque (BPQ), agostadero (AG), cárcava (C), parcela abandonada (PA) y plantación de *Cupresus* (PCu).

Las prueba Shapiro-Wilk empleando la hipótesis; Ho: La distribución observada y esperada son iguales, mostró que en todos los sitios la K_{fs} presentó una distribución Log-Normal (Tabla 3.7).

Este tipo de distribución probabilística está definida por una función de distribución tal que:

$$f(x) = 1/[(x-\theta)\sigma(2\pi)^{1/2}] * e^{-\{[\log(x-\theta)-\mu]^2 / 2\sigma^2\}} \quad [3.5]$$

$$\theta < x < \infty, \mu > 0, \sigma > 0$$

Donde μ la media, σ la desviación estándar, θ es el valor umbral o de ubicación, e es la base de los logaritmos naturales (2.71...) y π una constante con valor de 3.1416. Los datos de una población con función de distribución Log-normal, al ser transformados logaritmicamente ajustan a una distribución normal. En la Figura 3.3, se presentan las curvas acumulativas de la K_{fs} y $\ln K_{fs}$ para cada sitio.

La Tabla 3.7, muestra el resumen de las pruebas de ajuste, incluyendo el estadístico W de Shapiro-Wilk para los datos de K_{fs} y los transformados logaritmicamente.

Tabla 3.7. Resumen de prueba de ajustes a distribución normal para K_{fs} y su transformación logarítmica $\ln K_{fs}$

| Sitio | Conductividad Hidráulica Saturada de Campo (K_{fs}) | | | |
|-------|---|----------|---------|-----------|
| | Media $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ | Std.Dev. | W | p |
| AG | 378.94 | 465.97 | 0.72766 | 0.0000 ** |
| BPQ | 1578.57 | 1576.78 | 0.34461 | 0.0000** |
| C | 160.76 | 246.41 | 0.63695 | 0.0000** |
| PA | 99.72 | 92.02 | 0.80768 | 0.0000** |
| PCu | 264.30 | 393.47 | 0.68945 | 0.0009** |

| Sitio | Logaritmo natural de la Conductividad Hidráulica Saturada de Campo ($\ln K_{fs}$) | | | |
|-------|---|----------|---------|---------|
| | Media $\ln \text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ | Std.Dev. | W | P |
| AG | 5.30 | 1.17 | 0.98505 | 0.84871 |
| BPQ | 7.13 | 7.36 | 0.94353 | 0.12408 |
| C | 4.08 | 1.57 | 0.96488 | 0.15029 |
| PA | 4.17 | 1.05 | 0.94498 | 0.08532 |
| PCu | 4.22 | 2.24 | 0.88700 | 0.06136 |

Estadístico de Shapiro-Wilk (W) y su probabilidad (p), significancia * $\alpha=0.05$ y ** $\alpha=0.01$. Agostadero (AG), bosque de pino-encino (BPQ), cárcava (C), parcela abandonada (PA), plantación de *Cupresus* (PCu).

Diferentes autores reportan este tipo de funciones probabilísticas para ésta propiedad y otras relacionadas con el flujo de agua en el suelo (McIntyre y Tanner, 1959; Rogowski, 1972; Russo y Bresler, 1981; Esteves et al., 2005).

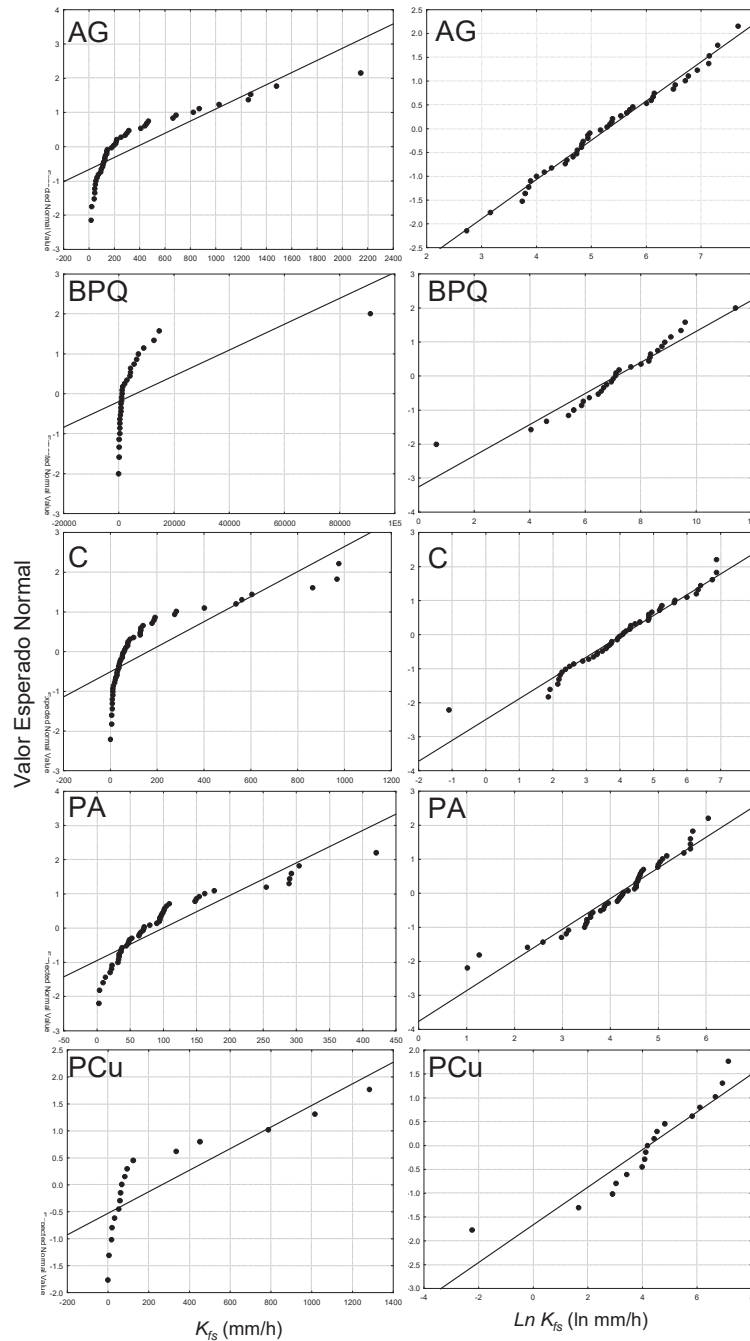


Figura 3.3. Curvas de probabilidad acumulada para K_{fs} a la izquierda y $\ln K_{fs}$ a la derecha para cinco coberturas y usos: Agostadero (AG), bosque de pino-encino (BPQ), cárcava (C), parcela abandonada (PA), plantación de *Cupresus* (PCu).

Variación espacial de la Kfs

Debido a la función de probabilidad encontrada para la conductividad hidráulica saturada de campo, el análisis de variación espacial con herramientas geoestadísticas se llevó a cabo con los datos transformados empleando el logaritmo natural (\ln), como lo recomiendan Webster y Oliver (2001).

Los variogramas experimentales se generaron utilizando distintos intervalos de distancia. Para la exploración de la variación de isotropía y anisotropía se generaron variogramas direccionales en intervalos de 10° , con una tolerancia angular de 22° . Para la generación de los modelos de variogramas se utilizaron los variogramas experimentales que se consideraron más consistentes en la representación de la variación.

Los variogramas experimentales obtenidos (Figura 3.4 A-J) muestran la presencia de patrones complejos de variación espacial. En el caso del bosque pino-encino (PBQ, Figura 3.4A), el variograma omnidireccional indica una correlación espacial negativa a distancias cortas y la presencia de un efecto pepita (nugget) importante. Sin embargo los variogramas direccionales, como por ejemplo a uno con dirección de 70° (Figura 3.4B), muestran que la variación se encuentra “anidada” desde distancias muy cortas; se obtuvo una curva con efecto pepita muy alto y posteriormente una primera meseta aproximadamente a los 12 m, para luego tener una caída entre los 20 y 28 m y posteriormente un ascenso típico de variogramas de variables no delimitadas (*unbounded*), con una forma exponencial.

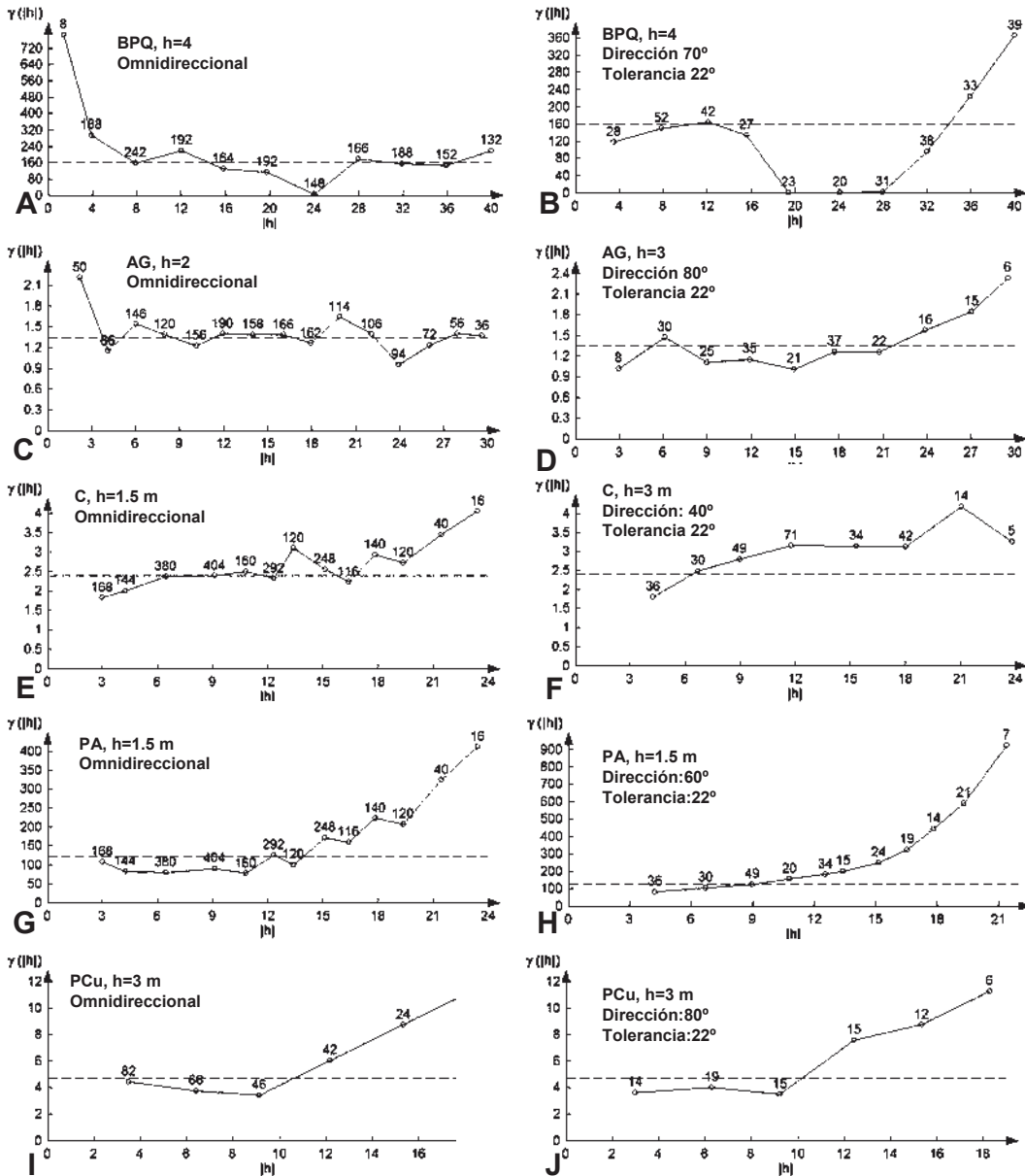


Figura 3.4. Variogramas experimentales para $\ln K_{fs}$; A y B) Bosque de pino-encino (BPQ), C y D) agostadero (AG), E y F) cárcava (C), G y H) parcela abandonada (PA), I y J) plantación de *Cupresus* (PCu). Izquierda, variogramas omnidireccionales, derecha variogramas direccionales con máxima variación. Los números representan la cantidad de pares.

La primera parte de este variograma (0-16 m) indica una alta variación en distancias cortas generando casi un efecto pepita absoluto. Para la segunda parte (20-40 m) hay un comportamiento similar a la parte inicial de un variograma *gausiano* (Webster y Oliver, 2001) con valores de γ bajos en varios

intervalos de distancia. Este comportamiento se interpreta como que la distancia existente entre los puntos para los intervalos muestreados es menor a la distancia a la cual se presenta la variación para el fenómeno estudiado (Webster y Oliver, 2001; Atkinson y Lloyd, 2007). La última parte de este variograma experimental se interpreta como que la distancia máxima de muestreo no corresponde a la distancia en la cual la variación se estabiliza y llega a la fase de meseta, por lo que se considera el muestreo debe ser más amplio.

El comportamiento espacial de la Kfs para el agostadero (AG) (Figura 3.4C) mostrado por el variograma omnidireccional es similar al del bosque (BPQ) (Figura 3.4A). Se presentan valores de γ muy altos a distancias cortas y posteriormente un efecto pepita muy marcado. El variograma direccional generado a 80° , muestra un efecto pepita considerable entre los 3 y 16 m, mas allá de esta distancia la semivarianza incrementa en forma casi lineal. Este variograma direccional es también no delimitado, pues no se alcanza la fase de meseta (Figura 3.4D).

En el caso de los variogramas experimentales para la cárcava (C), el variograma omnidireccional presenta una ligera curvatura para los primeros puntos (3-6 m), indicando un leve incremento en la semivarianza, para alcanzar una fase estable entre los 6 y 14 m y después incrementar sin alcanzar la fase estable (Figura 3.4E). El variograma direccional a 40° (Figura 3.4F) muestra semejanza en las distancias cortas con el omnidireccional (Figura 3.4E) pero difiere de este en que en el direccional es clara la tendencia al incremento de la semivarianza, alcanzándose una etapa de meseta entre los 12 y 24. Este variograma experimental (Figura 3.4F) muestra un elevado efecto pepita.

La parcela abandonada (PA) muestra un comportamiento similar a la parte inicial de un semivariograma de tipo *gausiano* (Webster y Oliver, 2001), tanto para el variograma omnidireccional (Figura 3.4G) como el direccional (Figura 3.4H). El omnidireccional muestra una fase pepita entre 0 y 12 m. A partir de esta distancia incrementa la semivarianza sin alcanzar una fase meseta. En el caso del variograma direccional (60°) se presenta un efecto pepita y posteriormente 3

a 15 m un incremento pequeño y constante de la semivarianza, para posteriormente 15-21 m darse una fase con comportamiento similar a una exponencial (Figura 3.4H).

En cuanto a los variogramas experimentales para la plantación de *Cupresus* (PCu) ambos, el omnidireccional y el direccional (Figura 3.4I,J), muestran un comportamiento similar a los anteriores, con un efecto pepita marcado para posteriormente incrementar sin llegar a una meseta.

Diferencias entre sitios

Con el fin de explorar la existencia de diferencias en la Kfs entre los sitios estudiados se realizó un análisis de varianza de una vía, utilizando el ln de Kfs como variable dependiente y el sitio como independiente. La hipótesis nula se enuncia como H_0 : las medias de ln Kfs entre los sitios son iguales, mientras que la hipótesis alternativa queda como H_a : las medias del ln Kfs de dos o más sitios son diferentes. La Tabla 3.8 muestra los resultados del análisis de ANOVA, con valor de $p=0.0031$, por lo tanto se rechaza H_0 , ya que se presenta diferencias al menos para un par de medias.

Tabla 3.8. Resumen del análisis de ANOVA para Kfs en los cinco sitios.

| Fuente | Grados de Libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Valor F | Valor p |
|--------|--------------------|-------------------|----------------|----------|---------|
| Modelo | 4 | 360.295395 | 90.0738488 | 35.58426 | 0.00031 |
| Error | 226 | 491.06895 | 2.53128325 | | |

Con el fin de conocer las relaciones entre los diferentes sitios se aplicó una prueba de diferencia honesta significativa de Tukey (StatSoft_Inc., 1998). Esta mostró diferencias significativas entre el sitio de bosque (BPQ) y todos los demás (Tabla 3.9); la cárcava (C) fue diferente al bosque (BPQ) y al agostadero (AG), pero estadísticamente igual a la parcela abandonada (PA) y la plantación de *Cupresus* (PCu). La parcela abandonada (PA) fue diferente del bosque (BPQ) y el agostadero (AG), pero estadísticamente igual a la cárcava (C) y la plantación de *Cupresus* (PCu). Ésta última fue diferente estadísticamente

solamente al bosque (BPQ). En la Figura 3.5 se puede apreciar el comportamiento de conjunto de los valores de la K_{fs} para los cinco sitios.

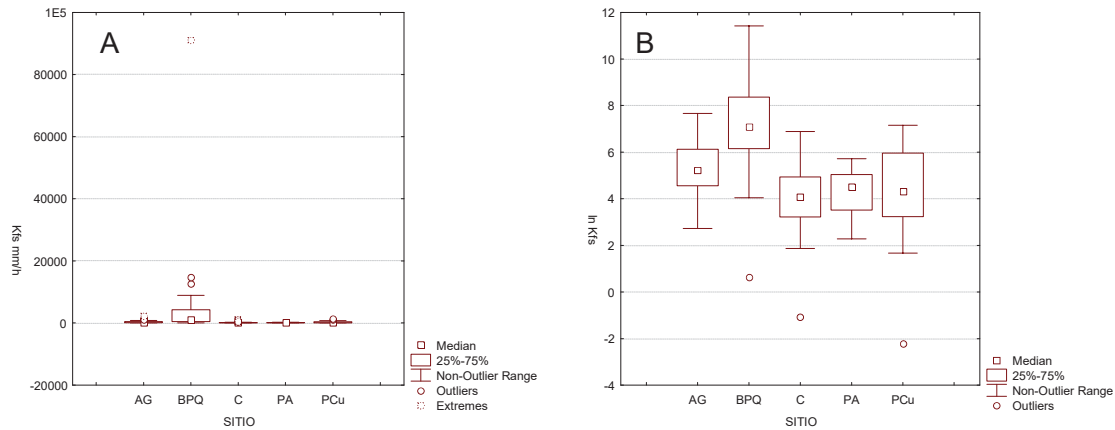


Figura 3.5. Valores de K_{fs} (A) y $\ln K_{fs}$ (B) en los cinco sitios.

Los sitios con mayor dispersión corresponden a la plantación de *Cupresus* (PCu) y el bosque (BPQ) (Figura 3.5). Puede apreciarse con mayor claridad las similitudes entre las poblaciones de los distintos sitios. Para BPQ la caja 25-75% se encuentra mas arriba que las demás, y no muestra traslape con ninguna, evidenciando el porqué se obtuvo diferencia significativa para este sitio respecto a los demás (Tabla 3.9).

Tabla 3.9. Matriz cruzada de valores de P para la prueba de Diferencia Honesta Significativa de Tukey para $\ln K_{fs}$ en cinco sitios, * $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

| Error=2.6249 | | | | | |
|-------------------------|------------|------------|----------|----------|-----|
| Grados de libertad: 226 | | | | | |
| SITIO | AG | BPQ | C | PA | PCu |
| AG | | | | | |
| BPQ | 0.000017** | | | | |
| C | 0.003265** | 0.000017** | | | |
| PA | 0.009041** | 0.000017** | 0.998614 | | |
| PCu | 0.137900 | 0.000017** | 0.998278 | 0.999982 | |

Agostadero (AG), bosque de pino-encino (BPQ), cárcava (C), parcela abandonada (PA), plantación de *Cupresus* (PCu).

El sitio con la menor dispersión es la parcela abandonada (PA) cuya “caja” 25-75% se traslapa en su mayor parte con la de la plantación y la cárcava, no

mostrando diferencias significativas con estos sitios. Este sitio no muestra traslape en la “caja” 25-75% ni con el agostadero (AG) así como tampoco con el bosque (BPQ).

Relaciones de la K_{fs} con otras propiedades

Explorando las relaciones entre la K_{fs} y las demás propiedades cuantificadas aplicando análisis de correlación, la transformación logarítmica de la K_{fs} mostró correlaciones significativas con todas las variables excepto la humedad final (θ_2), Tabla 3.10.

La transformación logarítmica de la K_{fs} tuvo relaciones positivas con los agregados estables en agua para los dos intervalos de tamaño analizados 2.0 a 4.0 y 0.25 a 2.0 mm (%AEA 2 a 4 y %AEA 0.25 a 2), también con el porcentaje de arena (%ARN) y el porcentaje de limo (%LIM) y relaciones negativas con el porcentaje de arcilla (%ARC), la densidad aparente (DA) y la humedad inicial (θ_0).

Tabla 3.10. Matriz de correlaciones entre $\ln K_{fs}$ y otras variables, correlaciones significativas * $\alpha < 0.05$, ** $\alpha < 0.01$

| | | %AEA 2-4 | %AEA 0.25-2 | % ARN | % ARC | % LIM | DA | θ_0 | θ_2 | C Org |
|--------------|-----|----------|-------------|-------|--------|-------|--------|------------|------------|-------|
| $\ln K_{fs}$ | R | .4869 | .3123 | .2557 | -.3312 | .1774 | -.3047 | -.1755 | .0192 | .4217 |
| | p | .000 | .000 | .002 | .000 | .033 | .000 | .035 | .818 | .000 |
| | Sig | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** | ** |

% Agregados estables en agua 2.0 – 4.0 mm (%AEA 2-4), % agregados estables en agua 0.25-2 mm (%AEA 0.25-2), % arena (%ARN), % arcilla (%ARC), % limo (%LIM), densidad aparente (DA), contenido de humedad inicial (θ_0), contenido de humedad final (θ_2), carbono orgánico (C Org).

DISCUSIÓN DE LA VARIACIÓN DE LA K_{fs}

Distribuciones probabilísticas

En la naturaleza, el suelo funciona como cuerpo tridimensional donde las propiedades varían en un continuo (*Continuum*). Webster (2000) menciona que el suelo puede entenderse como un medio donde rigen leyes fisicoquímicas en la alteración de los minerales y la transformación de las rocas y por ello poseen un componente “determinístico”. Sin embargo, debido a la complejidad y cantidad de interacciones entre los diversos factores, tienen un elevado

componente aleatorio y por ello deben abordarse espacialmente como un fenómeno “estocástico”, aún cuando el arreglo espacial no sea desordenado (Bakr et al., 1978). Dado que este acomodo es desconocido hasta antes de efectuar ciertas observaciones, *a priori* está oculto y la forma más prudente de aproximación es considerarlo como un sistema puramente estocástico (Webster, 2000).

Diversos autores han reportado que algunas propiedades del suelo como el contenido de materia orgánica, el contenido de arcilla o la humedad tienen distribuciones del tipo normal (McIntyre y Tanner, 1959; Rogowski, 1972).

En este trabajo encontramos que para el conjunto total (231 ensayos de infiltración) ciertas propiedades como el porcentaje de agregados estables en el intervalo de tamaño 0.25 a 2.0 mm, el porcentaje de arenas, de arcillas, limo y la densidad aparente tuvieron funciones de distribuciones normales.

Otras, sin embargo, tuvieron distribuciones probabilísticas de tipo Log-normal como la permeabilidad del aire, la conductividad hidráulica saturada y el flujo de agua (McIntyre y Tanner, 1959; Rogowski, 1972; Biggar y Nielsen, 1976; Russo y Bresler, 1981; Mallants et al., 1997; Mertens et al., 2002). Aunque estas pueden cambiar, dependiendo de la escala observada (Rogowski, 1972; Brejda et al., 2000). Por definición, en este tipo de distribución, los datos transformados logaritmicamente se ajustan a una distribución normal. Para este estudio, el conjunto completo de $\ln K_{fs}$ tuvo un comportamiento normal (Shapiro-Wilk $W=0.96205$, $p=0.3$). Si bien encontramos que para el conjunto total de ensayos, la K_{fs} tuvo una distribución Log-Normal, también para cada uno de los diferentes sitios por separado se obtuvieron distribuciones de este tipo (Tabla 3.7 y Figura 3.3).

Otras propiedades como el porcentaje de estabilidad de agregados para el intervalo de 2.0 a 4.0 mm, la humedad inicial, carbono orgánico tuvieron funciones de distribución distintas a la normal.

Variación espacial de la K_{fs}

Para los sitios estudiados, los variogramas muestran un comportamiento complejo de la variación espacial de la conductividad hidráulica saturada y se evidencian algunas cosas. Primero, que el esquema de muestreo no captura para ningún caso la variación máxima de la propiedad, puesto que no se alcanza la fase de meseta en los variogramas experimentales. Segundo, se presenta un efecto de variograma "llano" ocasionado por la variación existente por la propiedad en distancias cortas y producto del esquema de muestreo, en donde las distancias de muestreo no están reflejando cambios importantes en la variación de la propiedad indicando que probablemente éstos ocurren a mayores distancias. Tercero, existe un elemento de variación espacial considerable aún para distancias menores a las mínimas muestreadas, generándose un efecto pepita elevado, para algunos sitios dominante (agostadero). Mertens y colaboradores (2002) reportan la existencia de patrones espaciales similares para la K_{fs} en una ladera en un área pequeña 80 x 20 m, con rangos de 2.85 y 3.8 m, sin embargo encuentran un efecto pepita alto que indica una variación local elevada entre puntos aún a distancias cortas.

Estos mismos autores (Mertens et al., 2002) mencionan que esta elevada variación puede ser resultado de la historia de uso del suelo (huerto de frutales transformado a pastura) o la presencia de bioporos de lombrices o topos. Otros autores como p. ej Matula (2003) y Sobieraj (2003) encontraron que la presencia de macroporos por bioturbación es importante. Sobieraj (2003) y Sobieraj y colaboradores (2004) especifican que la bioturbación es responsable de la ausencia de patrones espaciales definidos para distancias de muestreo entre 10 y 25 m en suelos forestales en sitios tropicales; sin embargo menciona que a distancias pequeñas aparecen patrones espaciales entre 1 y 0.25 m, en donde la K_{fs} correlaciona con la textura controlada por la microtopografía, reportando valores pepita reducidos y rangos elevados en distancias pequeñas, revelándose en este caso un comportamiento anidado de la variación espacial.

En nuestro caso, todos los sitios presentaron valores pepita elevados, que pueden estar relacionados con la historia de uso del suelo. Pues aún cuando la presencia de raíces puede favorecer la compactación del suelo (Berger y Hager,

2000), también mejora las propiedades físicas facilitando la formación de macroporos por descomposición de las raíces (Chisci et al., 2001) o por el aporte de materia orgánica directa en el suelo (Li y Shao, 2006). Aún cuando no se encontraron referencias al respecto, la remoción de la vegetación arborea o arbustiva puede incrementar los canales de flujo preferencial a profundidades considerables por la simple pudrición de las raíces.

La variación espacial de la conductividad hidráulica ha sido descrita como el resultado de varios procesos independientes operando a diferentes escalas espaciales y temporales, con jerarquías anidadas (Sobieraj et al., 2004). Esta sobreposición de procesos actuando de manera simultánea en diferentes escalas (Burrough, 1983a, b) puede generar distribuciones caóticas no lineales como las mencionadas por Phillips (1993).

Sin embargo, desde la perspectiva propuesta por Russo y Bresler (1981) y Webster (2000) en donde las propiedades edáficas, incluyendo las hidráulicas pueden ser conceptualizadas como el resultado de un proceso estocástico regionalizado, su variación puede describirse mediante funciones de distribución probabilística (Russo y Bresler, 1981) y funciones de auto correlación espacial (Russo y Bresler, 1981; Webster y Oliver, 2001).

El conocer los patrones de autocorrelación permite entonces estimar los valores de las propiedades para cada propiedad dentro del intervalo de distancia donde se presenta autocorrelación (Russo y Bresler, 1981). Mas allá de esta distancia los valores pueden estimarse empleando las funciones de distribución probabilística.

En este estudio, el modelamiento de los variogramas experimentales para la Kfs no fue exitoso, de forma que aún cuando se detectaron patrones de variación espacial para esta propiedad, no pudieron ajustarse los modelos de variograma utilizando los modelos más comunes como esférico, gaussiano, exponencial o lineal.

La aproximación conceptual en que la Kfs puede ser representada como la realización de un proceso estocástico regionalizado (Russo y Bresler, 1981) es

una alternativa que en teoría permitiría representar la variación espacial de la conductividad hidráulica saturada, cuando la función de variación espacial, como en este caso, es desconocida o no se presenta un patrón de variación, y se asume una variación caótica. En el caso en que se llegase a modelar, para el dominio espacial del efecto pepita o más allá del rango establecido por los variogramas experimentales y las funciones de autocorrelación podrían emplearse funciones de distribución para aproximar (modelar) esta propiedad.

3.3 RELACIONES ENTRE LA Kfs Y PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Variación de las propiedades fisicoquímicas en los sitios

Respecto a las otras propiedades analizadas, los porcentajes de arena fueron estadísticamente distintos entre la cárcava y todos los demás sitios y se formaron cuatro grupos, el primero con la cárcava con % promedio de 20.92, el segundo que comprende al bosque de pino-encino y la plantación de *Cupresus* con promedios de 35.92 y 31.10% respectivamente, un tercero que abarcó el bosque de pino-encino junto con la parcela abandonada y un cuarto comprendiendo la parcela abandonada y el agostadero con porcentajes de arena promedio de 40.0 y 42.05% respectivamente (Tabla 3.11).

Para el caso del contenido de arcilla, se formaron cuatro grupos, un primero con la parcela abandonada con valor promedio de 26.36%, un segundo abarcando el agostadero con 35.10% y el bosque de pino-encino con 33.71%, un tercero que incluye el agostadero y la plantación de *Cupresus* (41.19%) y un cuarto que comprendió únicamente la cárcava con valor promedio de 57.49% (Tabla 3.11). Estas diferencias en las proporciones granulométricas se expresan como diferencias de textura. Los distintos sitios tuvieron texturas mezcladas, con patrones más o menos claros.

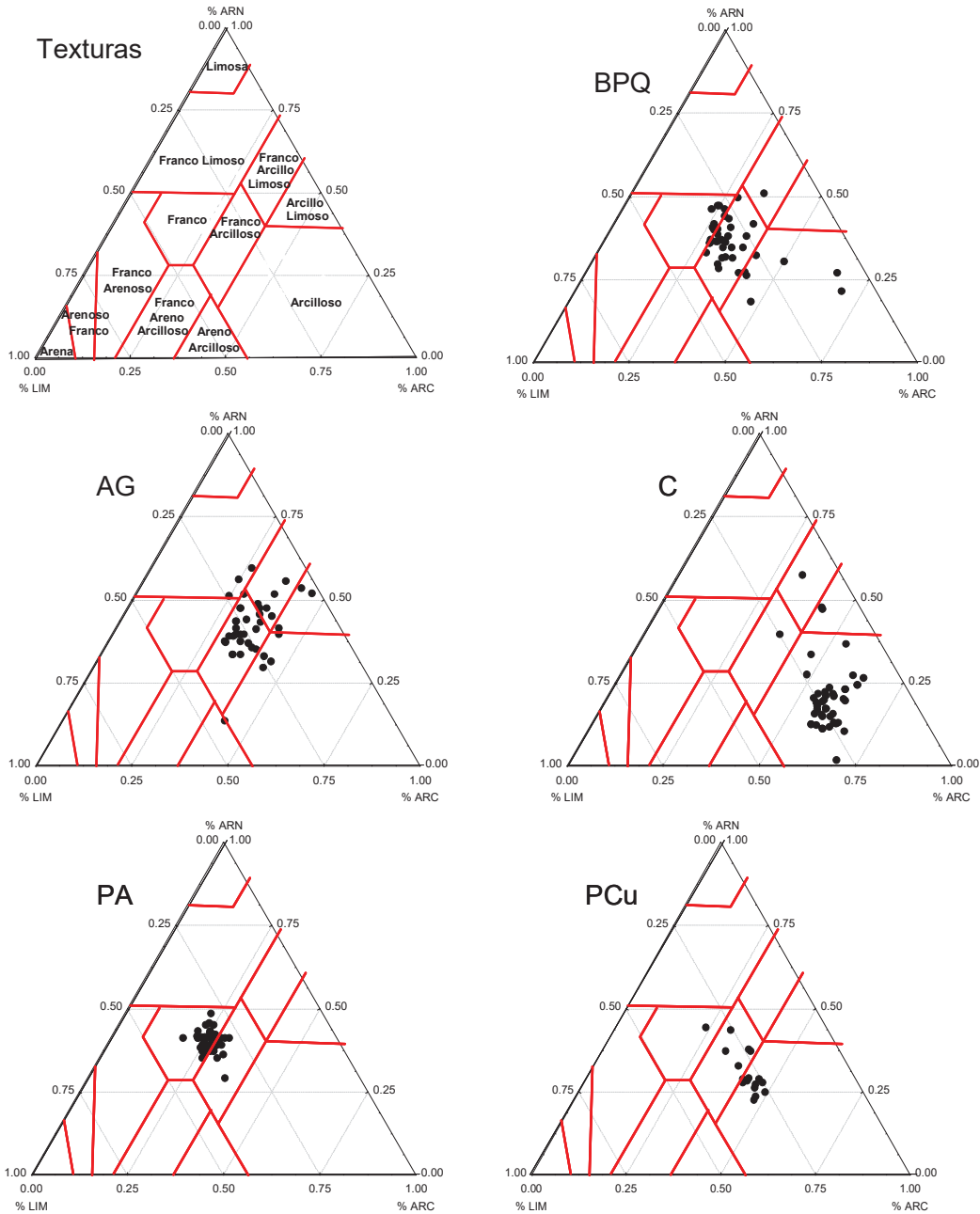


Figura 3.6. Triángulos de texturas. Bosque de pino-encino (BPQ), agostadero (AG), cárcava (C), parcela abandonada (PA), plantación de *Cupresus* (PCu).

En la Figura 3.6 se presentan los triángulos de textura para los diferentes sitios. El bosque de pino-encino mostró predominancia de texturas francas y franco-arcillosas y algunos puntos con texturas arcillosas. En el agostadero se presentaron principalmente texturas francas y franco-arcillo-limosas, con algunos puntos de muestreo de infiltración con textura franco-limosa y uno en areno-

arcillosa. La cárcava tuvo una predominancia de texturas arcillosas con pocos puntos de muestreo en otras texturas como franco arcilloso, arcillo-limoso o franco-arcillo-limoso. Las texturas en la parcela abandonada fueron predominantemente francas y franco-arcillosa mientras que en la plantación de *Cupresus* fueron principalmente arcillosas y franco-arcillosas.

Puesto que el análisis de varianza mostró diferencias significativas para los contenidos de arena, arcilla y limo aún en distancias cortas (<160 m) (Tabla 3.11), se infiere una alta heterogeneidad de la granulometría del horizonte superficial entre los sitios, apoyado por las observaciones de los perfiles comentados previamente.

Tabla 3.11. Medias, y desviaciones estándar para diferentes propiedades fisicoquímicas del suelo superficial.

| Propiedad | Sitio | | | | | ANOVA F (p) |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|
| | AG | BPQ | C | PA | PCu | |
| % Arena | 42.05 ^d (8.53) | 35.92 ^{b,c} (6.21) | 20.92 ^a (10.37) | 40.00 ^{c,d} (3.2) | 31.10 ^b (6.64) | 55.394 [<0.001] |
| % Limo | 22.86 ^{a,b} (7.98) | 30.37 ^{c,d} (5.75) | 21.60 ^a (5.89) | 33.64 ^d (2.49) | 27.71 ^{b,c} (2.5) | 33.321 [<0.001] |
| % Arcilla | 35.10 ^{b,c} (5.46) | 33.71 ^b (8.87) | 57.49 ^d (7.18) | 26.36 ^a (2.99) | 41.19 ^c (6.79) | 144.917 [<0.001] |
| DA (g·cm ⁻³) | 0.85 ^a (0.10) | 0.85 ^a (0.09) | 1.07 ^b (0.12) | 0.72 ^a (0.12) | 0.89 ^a (0.11) | 51.941 [<0.001] |
| %AEA 2-4 mm | 90.85 ^d (6.49) | 89.46 ^d (14.97) | 19.14 ^a (19.09) | 44.91 ^b (13.03) | 71.41 ^c (15.28) | 210.948 [<0.001] |
| %AEA 0.25- 2.0 mm | 94.43 ^b (4.95) | 89.58 ^b (5.03) | 71.46 ^a (13.00) | 78.78 ^a (6.96) | 87.63 ^b (5.45) | 56.76 [<0.001] |
| COrg (g·cm ³) | 0.078 ^b (0.022) | 0.13 ^c (0.05) | 0.009 ^a (0.007) | 0.075 ^b (0.031) | 0.093 ^{b,c} (0.053) | 67.157 [<0.001] |

Agostadero (AG), bosque de pino-encino (BPQ), cárcava (C), parcela abandonada (PA), plantación de *Cupresus* (PCu). Densidad aparente (DA), % agregados estables en agua 2.0-4.0 mm (%AEA 2-4 mm) y 0.25-2.0 mm (%AEA 0.25-2.0 mm), carbono orgánico (COrg).

Medias con distinta letra en el mismo renglón son distintas al 0.05 (prueba diferencia honesta significativa de Tukey).

Datos entre paréntesis son desviaciones estándar, datos entre corchetes son valores de *p* para el ANOVA.

El análisis de distribución probabilística indicó que la densidad aparente presentó una distribución normal para todos los sitios. Para esta propiedad se obtuvieron valores medios para el agostadero (AG), el bosque (BPQ) y la plantación de *Cupresus* (PCu) con valores promedio entre 0.85 y 0.89 g·cm⁻³. La cárcava (C) por otra parte tuvo la mayor densidad aparente promedio 1.07 g·cm⁻³ (Tabla 3.11), mientras que la menor densidad aparente promedio se obtuvo en la parcela abandonada (PA) con valor de 0.72 g·cm⁻³ esto probablemente relacionado con la formación del horizonte Ap previamente descrito. El análisis de ANOVA entre sitios para esta propiedad indicó diferencia significativa la cárcava y todos los demás sitios (Tabla 3.11).

En cuanto a la estabilidad de agregados de 2.0 a 4.0 mm el análisis estadístico indicó diferencias significativas para esta propiedad. La cárcava fue distinta a todos los demás, con un valor promedio de 19.14% y desviación estándar de (19.09), muy por debajo de la parcela abandonada con promedio de 44.91%, siendo éste sitio estadísticamente diferente a la plantación de *Cupresus* con valor promedio de 71.41%. El bosque de pino-encino y el agostadero tuvieron valores promedio de 90.85% y 89.46 % respectivamente, y formaron un grupo, sin diferencia entre ellos, pero con diferencias con todos los demás (Tabla 3.11)

Respecto a la estabilidad de agregados estables en agua con tamaño de 0.25 a 2.0 mm, se formaron dos grupos bien definidos, el primero, con estabilidades promedio de 71.46 y 78.78% comprendiendo la cárcava y la parcela abandonada. El segundo con promedios entre 87.63 y 94.43% que incluyó el agostadero, el bosque de pino-encino y la plantación de *Cupresus*.

Los datos indican que en general para el suelo superficial, los agregados de menor tamaño (0.25 a 2.0 mm) son más estables que los de mayor tamaño en el suelo superficial, que concuerda con lo reportado previamente por Zhang y Horn (2001).

En cuanto al contenido de carbono orgánico, los valores mas altos correspondieron al sitio de bosque con 0.13 g·cm⁻³ La cárcava fue el sitio con menor cantidad de carbono orgánico, en promedio 0.009 g·cm⁻³. El análisis de

formación de grupos homogéneos indicó que la formación de tres grupos, el primero incluye a la cárcava, un segundo que agrupa a la parcela abandonada (promedio de $0.075 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), el agostadero ($0.078 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y la plantación de *Cupresus* ($0.093 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$), mientras que el tercero abarca tanto a la plantación de *Cupresus* como al bosque de pino-encino ($0.13 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

Relaciones entre K_{fs} y propiedades fisicoquímicas

Se realizaron un total de 231 ensayos de infiltración para los cinco tipos de cobertura y uso del suelo, a continuación se puntualizan las relaciones entre diferentes propiedades fisicoquímicas y la K_{fs} para los distintos sitios estudiados.

Agostadero

Para este sitio solamente se obtuvo una correlación significativa; entre $\ln K_{fs}$ y volumen de Carbono orgánico (C Org Vol) ($r=0.3152$, $p=0.045$). Ambas variables con distribuciones normales. La regresión entre estas dos variables arrojó un modelo de regresión significativo pero con r^2 reducida ($r^2=0.0991$, $p=0.0424$) indicando una baja predicibilidad de $\ln K_{fs}$ a partir del volumen de Carbono orgánico.

Bosque de pino-encino

Para el caso del bosque de pino-encino se obtuvieron tres correlaciones significativas, dos positivas y una negativa para $\ln K_{fs}$, la primera con el % agregados estables en agua 2.0 a 4.0 mm (%AEA 2-4) $r=0.5358$, $p=0.002$, la segunda con % limo (%LIM) $r=0.3994$, $p=0.029$ y la tercera con la densidad aparente (DA) $r=-0.4408$, $p=0.015$. En forma similar al agostadero, los coeficientes de correlación fueron bajos, con valores de p significativos ($\alpha=0.05$). Las regresiones entre $\ln K_{fs}$ y las tres variables con las que se obtuvieron correlaciones significativas permitió generar tres modelos lineales que se presentan en la Tabla 3.12. Utilizando una aproximación de regresión múltiple por pasos se obtuvo un modelo lineal múltiple para las mismas variables con $R^2=0.529$ y $p=0.00017$ (Tabla 3.13).

Tabla 3.12. Modelos lineales para las variables correlacionadas significativamente con $\ln K_{fs}$ en cobertura de bosque de pino-encino, $^*\alpha=0.05$, $^{**}\alpha=0.05$.

| Modelo lineal | r^2 | r | p |
|--|--------|---------|----------|
| $\ln K_{fs} = 0.2483 + 0.08004 * \%AEA\ 2-4$ | 0.2871 | 0.5358 | 0.0023** |
| $\ln K_{fs} = 0.3071 + 0.22505 * \%LIM$ | 0.1595 | 0.3994 | 0.0288* |
| $\ln K_{fs} = 15.5683 - 9.67496 * DA$ | 0.1943 | -0.4408 | 0.0148* |

Porcentaje de agregados estables en agua con diámetro aparente 2.0 a 4.0 mm (%AEA 2.0 a - 4.0) % limo (%LIM), densidad aparente g/cm^3 (DA).

Tabla 3.13. Modelos lineales para las variables correlacionadas significativamente con $\ln K_{fs}$ en cobertura de bosque de pino-encino, $^*\alpha=0.05$, $^{**}\alpha=0.01$.

| Modelo para $\ln K_{fs}$ | | | | | |
|---|----------------|-------------|--------|------|-----------|
| $\ln K_{fs} = -0.72645 + 0.06582 * \%AEA\ 2-4 + 0.23737 * \%LIM - 6.24704 * DA$ | | | | | |
| R^2 | R^2 ajustada | Error Estd. | F | gl | p |
| 0.5297 | 0.4754 | 1.6034 | 9.7617 | 3,26 | 0.00017** |

Porcentaje de agregados estables en agua con diámetro aparente 2.0 a 4.0 mm (%AEA 2 a 4) % limo (%LIM), densidad aparente g/cm^3 (DA).

Cárcava y parcela abandonada

Para las coberturas de cárcava (C) y parcela abandonada (PA), no se encontró ninguna variable de las analizadas correlacionada significativamente con la conductividad hidráulica saturada en su forma original o su transformación logarítmica. Se realizaron igualmente análisis de regresión. Para la cárcava únicamente el % de agregados estables obtuvo un modelo con significancia, con forma; $\ln K_{fs} = 3.72905159 + 0.0231350479 * \%AEA\ 2-4$, con $p=0.0377$, pero con un valor de r^2 muy bajo ($r^2=0.1035$) y por lo tanto muy baja capacidad predictiva. En el caso de la parcela abandonada no se obtuvieron modelos lineales con significancia.

Plantación de Cupresus

Para el caso de la plantación de *Cupresus* se obtuvieron correlaciones significativas entre K_{fs} y el porcentaje de limo ($r=0.2862$, $p=0.026$), K_{fs} y el contenido de humedad final (θ_2) ($r=0.7689$, $p=0.0001$) y entre K_{fs} y el carbono

orgánico ($r=0.6891$, $p=0.002$). Las regresiones lineales permitieron obtener tres modelos, uno para cada variable correlacionada (Tabla 3.14), además de un modelo obtenido por regresión lineal múltiple (Tabla 3.15).

Tabla 3.14. Modelos lineales para las variables correlacionadas significativamente con $\ln K_{fs}$ en cobertura de plantación de *Cupresus*, $^*\alpha=0.05$, $^{**}\alpha=0.01$.

| Modelo lineal | r^2 | r | p |
|---|--------|--------|----------|
| $K_{fs} = 3.1507 + 15.3480 * C \text{ Org}$ | 0.2874 | 0.5361 | 0.0323** |
| $K_{fs} = -5.1055 + 0.35197 * \%LIM$ | 0.3335 | 0.5775 | 0.0192** |
| $K_{fs} = 2.8868 + 2.2547 * \theta_2$ | 0.2566 | 0.5256 | 0.0365** |

Carbono orgánico ($C \text{ Org g/cm}^3$) % limo (%LIM), contenido de humedad final (θ_2).

Tabla 3.15. Modelos lineales para las variables correlacionadas significativamente con $\ln K_{fs}$ en cobertura de plantación de *Cupresus*, $^*\alpha=0.05$, $^{**}\alpha=0.01$.

| Modelo para $\ln K_{fs}$ | | | | | |
|---|----------------|-------------|--------|------|-----------|
| $\ln K_{fs} = -1221.83 + 30.57 * \%LIM + 1102.19 * \theta_2 - 2059.6 * C \text{ Org}$ | | | | | |
| R^2 | R^2 ajustada | Error Estd. | F | gl | p |
| 0.6295 | 0.5440 | 1.6034 | 7.3629 | 3,35 | <.00394** |

Carbono orgánico ($C \text{ Org g/cm}^3$) % limo (%LIM), contenido de humedad final (θ_2).

El error medio cuadrático para el modelo obtenido mediante regresión múltiple por pasos es de 232.34 mm/h, poco menos que el valor promedio de la K_{fs} en el sitio (264.3 mm/h) y cerca de la mitad de la desviación estándar para el sitio (383.47) indicando que el modelo tiene una capacidad predictiva limitada.

Cobertura vegetal y uso del suelo

Se exploró la relación existente entre la conductividad hidráulica y algunas variables fisicoquímicas, existen ciertos puntos importantes. Uno de ellos es que en varias coberturas no se detectó una relación importante entre la conductividad hidráulica y la densidad aparente, salvo en el bosque de pino-encino. Se esperaba para toda el área estudiada una relación mas directa entre esta propiedad, dado que refleja en forma indirecta el volumen de espacio poroso presente en el suelo. Una posible explicación, es que la muestra utilizada

para calcular la densidad aparente se tomó de un sitio si bien cercano, no exactamente el mismo en donde se realizó el ensayo de infiltración. También es posible que la muestra de densidad aparente no refleje las condiciones de porosidad puntuales en la superficie del ensayo.

Para el caso del agostadero, aún tras haber transformado las variables para ajustar a distribuciones normales, el análisis de correlación indicó una relación entre la conductividad hidráulica saturada de campo (como $\ln K_{fs}$) y el contenido de carbono orgánico en volumen (ajustado por la densidad) ($r=0.3152$, $p=0.045$). Para la regresión entre estas dos variables, el resultado fue un modelo lineal con muy baja capacidad de predicción ($r^2=0.0991$) aunque significativo ($p=0.0424$) o mas bien, marginalmente significativo. Lo anterior indica una muy baja dependencia de la conductividad hidráulica con estas variables. Por lo que en esta cobertura y uso del suelo el proceso de variación está determinado por otras variables de control.

En el sitio con cobertura vegetal de bosque de pino encino (BPQ) hubo tres variables relacionadas con el $\ln K_{fs}$, los agregados estables de 2 a 4 mm, el % limo y la densidad aparente. Aún cuando se tuvieron r^2 bajas para los modelos lineales individuales, ó para el modelo de regresión lineal múltiple con estas variables, éstos fueron significativos. Estos resultados sugieren que en este ambiente con gran cantidad de macroporos y canales de flujo preferencial, hay pequeñas modificaciones en el espacio poroso que determinan la conductividad hidráulica. Entre menor sea la densidad aparente, mayor es el espacio poroso del suelo. Este sitio es completamente distinto a los demás en cuanto a la conductividad hidráulica (analizada como $\ln K_{fs}$); estadísticamente se constataron las diferencias para la estabilidad de agregados de 2.0 a 4.0 mm entre este sitio y el resto (excepto el agostadero). Estas diferencias estadísticas son el reflejo de los procesos de bioturbación que incrementan el espacio poroso del suelo favoreciendo el flujo preferencial y disminuyendo la densidad aparente. Estos procesos de bioturbación fueron claramente identificados en la descripción del perfil para este sitio. Éste perfil fue el único de los estudiados donde se

podieron diferenciar claramente dos subhorizontes con estructura biogénica dentro del horizonte superficial, con un elevado contenido de arenas.

En el sitio de cárcava se esperaba encontrar una fuerte relación entre el contenido de arcillas o arenas y la K_{fs} , pero no fue así. Esta cobertura fue en la que se observaron los menores valores de K_{fs} . Al parecer, la pérdida de los horizontes superficiales y el afloramiento de los horizontes B_t reducen significativamente las tasas de infiltración del suelo superficial. Las diferencias en la conductividad hidráulica en este caso se atribuyen a la posible presencia de macroporos cuyo patrón de distribución puede ser una función independiente de variables como la densidad aparente o la textura.

En el caso de la parcela abandonada, no se obtuvieron correlaciones significativas con ninguna variable y el modelo lineal divariado explorado tiene una limitada capacidad explicativa. Parece ser, que en esta cobertura y uso del suelo, la variación de la K_{fs} atribuible a los macroporos no es dependiente de las variables exploradas.

Para el sitio con plantación de *Cupresus*, aún cuando los valores de r^2 tanto para los modelos divariados como para el multivariado fueron bajos, se encontraron correlaciones significativas de las variables analizadas con la conductividad hidráulica saturada, indicando que estas pueden estar formando parte del control de la K_{fs} . En el caso del limo, este está relacionado con la clase textural, la distribución y tamaño de los poros (Fuentes et al., 2004). El contenido final de humedad está relacionado igualmente con el espacio poroso, mientras que el contenido de carbono orgánico está relacionado con la estabilidad de agregados (Cerdà et al., 1995; Cabria et al., 2002; Shaver et al., 2002; Li y Shao, 2006), aunque se sabe que hay otros factores relacionados como el contenido de hierro y otros minerales (Zhang y Horn, 2001).

Estos resultados no soportan el marco conceptual en el que se basa una parte de la política nacional de los programas de pagos por servicios ambientales hidrológicos de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR, 2007), donde se asume una relación directa entre el incremento la cobertura vegetal,

específicamente de los componentes arbóreos y el aumento de capacidad de infiltración (Perevochtchikova et al., 2005; Cuevas-Flores et al., 2007)

Textura y bioturbación

Un aspecto interesante es que en la literatura especializada comúnmente se refiere a la vegetación como un promotor de la infiltración por su efecto en las propiedades del suelo (Pilgrim et al., 1988; Wit, 2001; Cichota et al., 2003; Mills y Fey, 2004; Li y Shao, 2006).

En este estudio, encontramos, que aún con coberturas arbóreas elevadas, como en la plantación de *Cupresus* pueden darse valores relativamente bajos de conductividad hidráulica, en forma que el sitio, no tenga diferencia estadística a un área de cultivo abandonada (Parcela abandonada) o una cárcava. Esto indica que una cobertura vegetal densa no se relaciona necesariamente con mayor capacidad de infiltración ó conductividades hidráulicas saturadas elevadas. Sin embargo, en los programas gubernamentales de pago por servicios ambientales, a nivel nacional, es el criterio más importante para definir la aptitud de los terrenos (Cotler y Balvanera, 2006).

El perfil ubicado en la plantación de *Cupresus* no mostró evidencia de bioturbación como las que presentó el bosque de pino-encino. Aún cuando los contenidos de materia orgánica son similares (5.26 y 5.1 %) para los horizontes superficiales, la plantación no mostró los horizontes franco-arcillosos o incluso franco-arenosos que si se encontraron en los sitios de bosque y agostadero. Sin embargo, en conjunto y desde la perspectiva del sitio, por encima del perfil descrito, los datos provenientes de los ensayos de infiltración indican que ni las proporciones de arena ni arcilla fueron estadísticamente distintas entre el bosque y la plantación. Sin embargo, las diferencias en las proporciones de material determinante de la textura; % arena y % limo entre algunos de los sitios y sus diferencias en la conductividad hidráulica saturada indican un posible

control de la textura, aún cuando no existan correlaciones significativas para varios sitios (cárcava, agostadero ó parcela abandonada) entre los porcentajes de material fino y la K_{fs} . Esta relación ha sido reconocida desde hace varias décadas (Soil-Survey-Staff, 1951) y es parte fundamental de diversos modelos de pedotransferencia (Tietje y Hennings, 1996; Lin et al., 1999; Elsenbeer, 2001; Pachepsky y Rawls, 2003; Ferrer et al., 2004; Romano, 2004; Chirico et al., 2007).

Por encima de la escala del sitio, incluyendo los datos de todos los sitios en el análisis, los porcentajes de arena, limo y arcilla correlacionan significativamente con el $\ln K_{fs}$, $r^2=0.2017$, $p= 0.006$ para % arena, $r^2= -0.2276$, $p=0.002$ para el % arcilla, indicando una relación positiva, en el $\ln K_{fs}$ con el aumento de las arenas, y un decremento del $\ln K_{fs}$ con el incremento de las arcillas. Esta misma tendencia se reportó previamente en el Capítulo 2 empleando el mismo dispositivo. La Figura 3.7 muestra este patrón para las dos variables.

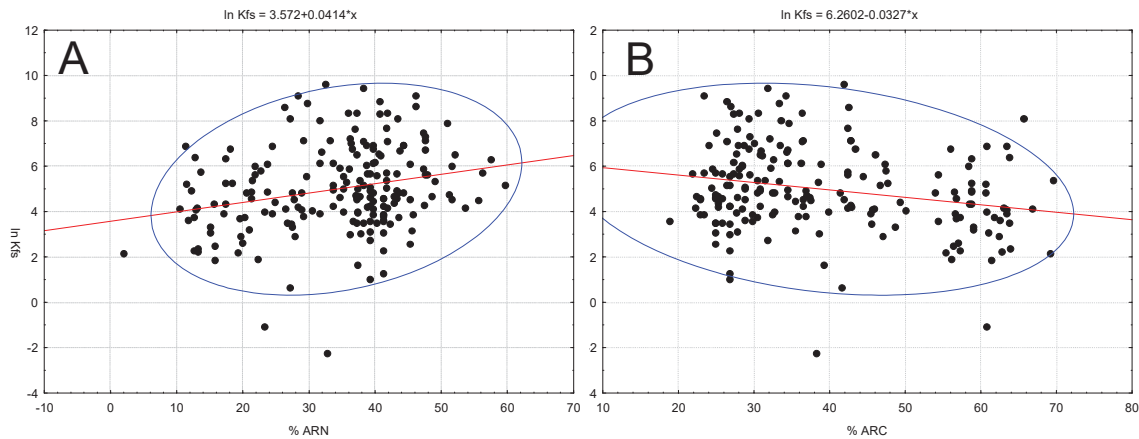


Figura 3.7. Dispersogramas mostrando la relación global entre % Arena y $\ln K_{fs}$ (A) y % Arcilla y $\ln K_{fs}$ (B).

Los datos de conductividad hidráulica y las descripciones de los perfiles indican que la bioturbación parece ser un proceso clave en la modificación de las rutas preferenciales de flujo hidráulico en los suelos. Las diferencias en estructura encontradas entre los sitios son similares a las reportadas por otros autores (Frouz et al., 2007b). Ésta, está relacionada no solo con la composición vegetal

y el uso del suelo por las características del mantillo (Shakir y Dindal, 1997), sino también con la historia de uso (Raty y Huhta, 2004; Callaham et al., 2006). Este es un aspecto relevante pues las comunidades de macroinvertebrados pueden modificar las propiedades fisicoquímicas del suelo favoreciendo la formación de humus, generando canales y bioporos, incorporando materia orgánica en la matriz del suelo e incrementando la estabilidad de los agregados (Frouz et al., 2007b; Mboukou-Kimbatsa et al., 2007). Sin embargo su efecto va más allá de los horizontes superficiales, ya que pueden alterar la estratificación de los horizontes del suelo, por la translocación material entre los horizontes (Eisenhauer et al., 2007), y favorecer la conectividad hidráulica entre la superficie y horizontes profundos vía macro y mesoporos (Pitkanen y Nuutinen, 1998).

Sin embargo, la bioturbación no solo comprende las actividades de los macroinvertebrados del suelo, abarca también la mesofauna edáfica (Wang et al., 1996; Sobieraj, 2003; Tsukamoto y Sabang, 2005; Eisenhauer et al., 2007; Frouz et al., 2007a), los vertebrados (Sobieraj, 2003; Zaitlin et al., 2007) desde pequeños roedores y tuzas (Matula, 2003; Zaitlin et al., 2007) hasta armadillos (Sobieraj, 2003), así como también la bioturbación por las raíces (Chisci et al., 2001; Dasgupta, 2005; Gregory, 2006; Watteau et al., 2006).

Aún cuando el flujo laminar del agua en un medio poroso saturado está definido por la ley de Darcy, en un medio insaturado, la ecuación de Richard es una aproximación más realista (Špongrová, 2006). Sin embargo, varios autores han documentado que la infiltración en la zona vadosa ocurre principalmente por flujo preferencial (Mohanty et al., 1988; Shouse y Mohanty, 1988; Logsdon y Jaynes, 1996; Mohanty et al., 1997) y no dentro de la matriz del suelo. El flujo preferencial permite el movimiento rápido del agua a través del suelo, que por lo general evita el paso por la matriz del suelo, por un lado facilita la recarga local y por otro puede favorecer la contaminación de los acuíferos (Ranade y Gupta, 1987; DiCarlo et al., 1999; Dasgupta et al., 2006). El flujo preferencial ocurre generalmente en a través de macroporos, éstos tienen tres orígenes principales a) actividad biológica (macro y mesoinvertebrados y túneles generados por la

podrición de las raíces), b) actividades culturales y de manejo del suelo y c) fenómenos naturales como el fracturamiento de las rocas y erosión en tubos. Por lo tanto el proceso de infiltración se encuentra determinado en gran parte por las condiciones ambientales naturales (Dasgupta, 2005).

Relaciones entre suelo, vegetación y conductividad hidráulica; modelo local

Las características de los perfiles estudiados, los cortes de carretera y los afloramientos en los fondos de cárcavas y barrancos indican que el suelo se formó *in situ* a partir de cenizas volcánicas por intemperismo, y se diferencian al menos dos etapas de depositación. Una primera que conforma los horizontes intermedios comprendiendo el Lixisol enterrado, formado a partir de piroclastos depositados sobre materiales ignimbríticos que conforman el horizonte C_w . Evidencia de esto son los gránulos de lapilli intemperizado encontrados en los perfiles de la superficie cumbral en el perfil de bosque de pino-encino, en donde se mantiene la forma, pero los minerales primarios se encuentran intemperizados y son altamente deleznable.

En una segunda etapa, nuevos piroclastos se depositaron sobre el suelo previamente formado los horizontes superficiales A_{11} , A_{12} y AB característicos del Cambisol (Figura 3.8)

Todos los perfiles, excepto el de la plantación de *Cupresus*, tienen en superficie horizontes con textura más gruesa que los de profundidad. Sin embargo, a escasos 100 m de la plantación sobre la misma superficie cumbral se presentan los horizontes arenosos o arcillo-arenosos, lo que sugiere que la ausencia de éstos en la plantación se deba a la pérdida por erosión, o bien la mezcla del epipedón con la parte alta del endopedión por arado, pues este sitio antes de ser reforestado tenía uso agrícola.

Esto indica que en el área de estudio los perfiles de los diferentes sitios, corresponden a variantes locales de un mismo suelo, con diferencias debidas

entre otras cosas, a la cobertura vegetal, el uso del suelo actual, así como la historia de uso de cada sitio.

En este trabajo se exploró la variación de la Kfs como variable clave en el proceso de infiltración, desde una perspectiva de paisaje local con estratificación de acuerdo al uso del suelo y la cubierta vegetal. Hipotetizamos la existencia de una relación entre el tipo de vegetación y cobertura del suelo y la infiltración, cuantificada a partir de la conductividad hidráulica saturada de campo como propiedad clave en este proceso, hipotetizamos también que esta relación es más o menos directa, en donde a mayor cobertura mayor infiltración.

Los resultados indican que más que una relación entre cobertura y Kfs, existe una relación entre el tipo de cobertura vegetal, las características del suelo y la Kfs, donde confluyen diversas variables de control que interactúan entre si y tienen ciclos de retroalimentación.

El suelo superficial (Cambisol) con horizontes A_{11} , A_{12} y AB mostró un mayor contenido de arenas que el suelo sepultado con elevado contenido de arcillas ($2B_t$ y $2BC$). Las observaciones de campo durante el muestreo de infiltración, los análisis de estas muestras y las descripciones, observaciones y análisis de los diferentes perfiles nos permitieron establecer que la cobertura vegetal, como se definió en este trabajo está estrechamente relacionada con la historia de uso del sitio y con la presencia de ciertos horizontes.

De forma que la variación de la Kfs para cada sitio depende en gran medida no de la cobertura vegetal, sino del afloramiento de horizontes específicos, así como de los procesos de bioturbación y de formación de canales de flujo preferencial en la superficie del suelo que se encuentran asociadas a la cobertura vegetal.

En el sitio con bosque de pino-encino (BQP) se presentaron dos suelos, uno maduro (Lixisol) y otro joven (Cambisol) con secuencia de horizontes A_{11} , A_{12} , AB, $2AB$, $2B_{t1}$, $2B_{t2}$, y $2BC$ (Figura 3.8). Las muestras superficiales procesadas para este sitio indican predominancia de texturas franco-arcillosas, francas y algunas muestras arcillosas.

En el sitio con agostadero (AG) se encontraron horizontes A_p , B_t , BC y $2C_w$, (que serian equivalentes a AB, $2B_t$, 2BC y $2C_w$ del sitio BPQ, Figura 3.8) y las texturas superficiales indican texturas franca y franco-arcillo-limosas, con menor proporción de franco-limosas, arcillo-limosas ó arcillosas.

El perfil de la parcela abandonada (PA) presento horizontes A_p , A_{p2} , AB, B_{t1} , B_{t2} (equivalentes a AB, $2B_t$, 2BC y $2C_w$ del sitio BPQ, Figura 3.8) y mostró niveles importantes de compactación en el horizonte A_{p2} , densidad aparente de $1.03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ siendo que el promedio para esta propiedad obtenido del muestreo de infiltración fue el mas bajo de todos los sitios con $0.72 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Tabla 3.4). Las texturas para este sitio fueron franco-arcillosas y francas.

Para el caso de la cárcava (C), el análisis de las muestras obtenidas durante los ensayos de infiltración indicó que la textura predominate en el sitio es arcillosa, con contenidos de arcilla por encima del 50%, siendo este sitio diferente estadísticamente a todos los demás (Tabla 3.11) con un contenido de arcilla promedio de 57.49%. En este sitio se presentaron texturas franco-arcillo-limosas, arcillo-limosas y franco-arcillosas. La fisonomía del sitio, junto con las características texturales y las observaciones indicaron que la mayor parte de los puntos de infiltración muestreados en este sitio se ubicaron sobre el equivalente a los horizontes $2B_t$ ú horizontes 2BC del perfil BPQ, (Figura 3.8).

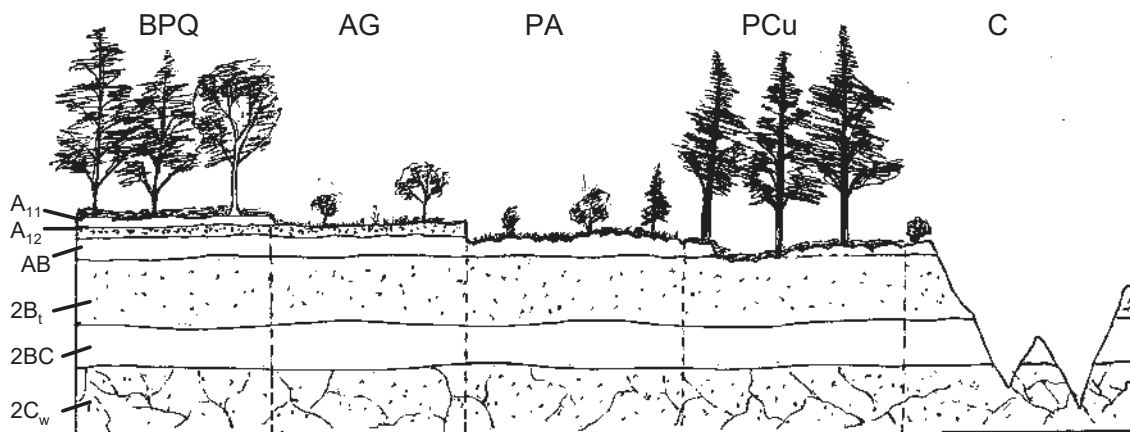


Figura 3.8. Clases de cubierta vegetal y uso del suelo y los horizontes presentes en cada sitio analizado. Agostadero (AG), bosque de pino-encino (BPQ), cárcava (C), parcela abandonada (PA), plantación de *Cupresus* (PCu).

Respecto a la plantación de *Cupressus* (PCu), el suelo superficial fue predominantemente arcilloso ó seguido franco-arcilloso. En el perfil del sitio se describió un horizonte Ap de piso de arado en la parte superficial, pero como se menciona previamente puede corresponder a la mezcla de los horizontes A₁₁, A₁₂ ó AB con los horizontes B_t. La diferencia en las texturas entre las muestras de infiltración y las de los horizontes superficiales del perfil puede deberse a tres cosas. La primera que la superficie del sitio es irregular, fue una parcela agrícola laboreada y está de alguna forma erosionada, la segunda es que el muestreo de infiltración tiene una mayor cobertura espacial que el perfil excavado y la tercera que, aún a distancias cortas (3m) que es la distancia entre los puntos de infiltración se presentan diferencias. Por lo tanto se deduce que en el sitio aflora tanto el horizonte Ap como el horizonte arcilloso B_t (equivalentes a los horizontes AB y 2B_t del perfil en BPQ) y que los muestreos de infiltración superficial abarcaron la expresión superficial de ambos, predominó el B_t. La Figura 3.8, esquematiza el modelo conceptual descrito.

CAPITULO 4. INTEGRACIÓN DE LOS RESULTADOS Y DISCUSION GENERAL

En este trabajo se abordó el proceso de infiltración del agua en el suelo desde una perspectiva de los servicios ambientales, con un enfoque hidropedológico. Se diseñó y probó un equipo para cuantificar la infiltración. Se excavaron, describieron y analizaron perfiles de suelos para distintas coberturas de vegetación y uso del suelo. También se realizaron ensayos de infiltración utilizando los equipos diseñados y se calculó la conductividad hidráulica saturada bajo distintas cubiertas vegetales y uso del suelo. Después se exploró la variación espacial de la conductividad hidráulica saturada y sus funciones de distribución probabilística. También se estudió la relación entre la conductividad hidráulica saturada de campo y diez propiedades fisicoquímicas del suelo empleando datos de cada uno de los puntos de muestreo de infiltración. En este capítulo se presenta la integración de los resultados y su discusión.

Diseño, prueba y funcionamiento del infiltrómetro utilizado

En el capítulo 2 se mostró la construcción de un dispositivo de bajo costo, fabricación sencilla y con un consumo de agua reducido (entre 0.3 y 12.5 l), capaz de una resolución estadísticamente igual a aquella de un equipo comercial y que capte en forma eficiente los cambios de Kfs asociada a la variación textural, la porosidad y la presencia de bioturbación. La prueba de tres distintos métodos para el cálculo de la Kfs indicó que la opción más apropiada es el método de Wu2, puesto que permitió trabajar con la mitad del volumen del agua requerida por el método de Dos Cargas para Anillo Sencillo (DCAS) y no requirió el valor de diferencia de humedad inicial-final ($\Delta\theta$). No obstante, una desventaja importante del dispositivo presentado es que solamente funciona a nivel superficial, no pudiendo obtener datos de Kfs a profundidad como algunos dispositivos comerciales por ejemplo el Permeámetro Guelph o el Permeámetro Compacto de Carga Constante de Amoozegar (1992; 2002). Sin embargo, el

dispositivo construido en el presente trabajo, permitió obtener datos de campo (más de 400 ensayos para este y otros trabajos) que permitieron calcular la Kfs a un costo muy por debajo de algunos de los equipos comúnmente utilizados para este fin.

Algunos autores (Cerdà, 1996; Cerdà et al., 1997) mencionan que este tipo de dispositivos no permite realizar ensayos repetidos en el mismo sitio y que parte de la variación obtenida se debe al pequeño soporte espacial (tamaño del anillo). Autores como Bear (1972) y Hubbert (1956 *in* (Mallants et al., 1997) explican la existencia de una relación entre la conductividad hidráulica saturada y el volumen elemental representativo del suelo (VER). Este VER es un dominio cuasi homogéneo donde la variable de interés es invariante respecto al tamaño de muestra (Bear, 1972; Ryan et al., 2000); Hubbert, 1956 *in* (Mallants et al., 1997). En otras palabras, es el volumen mínimo necesario que minimiza la varianza y la heterogeneidad local y que puede ser utilizado para muestrear un suelo o sitio (Ryan et al., 2000). Otros autores como Ryan y colaboradores (2000) discuten que el volumen representativo es diferente para cada propiedad o variable edáfica estudiada, además de que dependiendo de la escala o el ambiente estudiados, los VER pueden ser mayores o menores llegando a ser difíciles de definir. Bouma (1985) menciona que el VER puede estimarse en aproximadamente 20 unidades estructurales o peds. Resultados experimentales indican que para volúmenes de suelo examinados utilizando columnas pequeñas (5 cm diámetro x 5.1 cm de altura (Mallants et al., 1997) o anillos de diámetros pequeños 7.0 cm (Cerdà, 1996) y anillos de diferentes tamaños (Lai y Ren, 2007) la variación obtenida en la infiltración acumulada, tasa de infiltración básica o la conductividad hidráulica saturada es mas alta que para anillos de mayor diámetro (Lai y Ren, 2007). Esto se debe en parte a que capturan la variación asociada a la microheterogeneidad (Mallants et al., 1997), mientras que diámetros mayores proporcionan valores integrados con menor dependencia de la micro heterogeneidad. Lai y Ren (2007) recomiendan que en condiciones donde se sospeche elevada heterogeneidad deberán emplearse infiltrómetros con diámetro interno >80 cm. Esta recomendación se deriva del

hecho que los infiltrómetros de anillo funcionan por inundación (poned infiltration) y en estas condiciones los macroporos son determinantes. Sin embargo, es importante hacer un análisis entre tiempo, recursos, volumen de agua necesario y cantidad de repeticiones requeridas para obtener resultados representativos. No se encontraron trabajos publicados sobre conductividad hidráulica ó infiltración que hubieran realizado algún análisis sobre el tamaño de muestra, considerando la superficie de muestreo de cada dispositivo y el número de repeticiones necesarias para tener información representativa, por lo que este tópico seguirá siendo discutido hasta que no se establezcan los lineamientos específicos al respecto. En este trabajo, el empleo de diámetros pequeños y tamaños de muestra elevados (>40) para áreas pequeñas ($\pm 400 \text{ m}^2$) nos permitió explorar la variación de la conductividad hidráulica en forma detallada considerando hasta cierto punto la micro heterogeneidad. Esto se discute a mayor profundidad más adelante.

Por otro lado, el diseño del infiltrómetro de carga constante y anillo sencillo que se presenta puede fácilmente ajustarse para funcionar con anillos metálicos de otros diámetros en caso de que se requiera.

Funcionalidad y aplicación del infiltrómetro automatizado

Aún cuando la unidad de automatización USB fue capaz de medir una columna de agua entre 0.0 y 85.0 cm con un error de ± 2 mm, no se presentaron diferencias significativas en la Kfs entre los métodos de obtención de datos (manual y automatizado) y permitió obtener datos con una supervisión mínima que facilita el muestreo de infiltración. La unidad de automatización permitió incrementar la cantidad de registros durante los ensayos de infiltración de prueba, facilitando una mejor estimación de la Kfs a partir de datos de la fase saturada. Además de simplificar el manejo de los datos, y reducir errores de registro y captura.

El principal problema de la unidad fue la autonomía ya que requirió en condiciones de campo de una computadora personal para poder ser programada. Y aunque la adquisición de datos puede programarse para una

hora definida, las condiciones en el trabajo de campo requieren simplemente de mayor autonomía, por lo que esta unidad tuvo que ser rediseñada para cumplir con los requerimientos de funcionalidad. Como se mencionó en el capítulo 2, actualmente se cuenta con un segundo prototipo, el cual está en la fase de pruebas de campo. Por cuestiones de tiempo, los resultados de este segundo prototipo no fueron incluidos en este trabajo, sin embargo se ha generado una línea de trabajo robusta en el área de instrumentación para medición de variables ambientales.

Por otro lado, la unidad de automatización generada en este proyecto puede ser aplicada no solo a la automatización de infiltrómetros o permeámetros, sino a diversas aplicaciones donde se requiera la cuantificación de la altura de una columna de agua en el tiempo, como las utilizadas en la instrumentación de micro cuencas.

Interpretación de la dinámica de cambio de uso del suelo a nivel local

A continuación y empleando información obtenida localmente se comentan los procesos de cambio con una perspectiva histórica.

En el área de estudio ubicada en la Loma del Puerto del Tigre una parte del área fue aprovechada con fines forestales hace 45-50 años, por lo que las unidades de bosque presentes en la actualidad son de tipo secundario, aquí se incluyen los bosques de pino-encino y los de encino (74.45% del área).

Ciertas áreas volvieron a ser aprovechadas y desmontadas hace aproximadamente 25-30 años con fines de uso agrícola y permanecieron en esa condición durante aproximadamente 20 años. Posteriormente, fueron abandonadas permitiendo la revegetación los últimos 5 a 6 años, actualmente conforman las parcelas abandonadas abarcando el 4.4% del área. Existen además áreas que fueron desmontadas y que en la actualidad continúan siendo cultivadas y constituyen las zonas agrícolas (2.71%) en el mapa generado.

La dinámica de los agostaderos es más compleja, ya que de acuerdo con las fuentes locales (González, com. Pers. y Guzman, com Pers.) existen partes que

fueron deforestadas hace 80-100 años o incluso más, pero no se cuenta con información precisa y se han mantenido bajo ese uso, algunas otras eran bosques de encino y fueron utilizados para la producción de carbón (45-50 años), y después del desmonte pasaron a ser agostaderos. En otros casos las áreas agrícolas dejaron de ser utilizadas con este fin y se convirtieron en agostaderos, con baja cobertura de arbustos y herbáceas, esto concuerda con otros estudios con perspectiva de cuenca como el de López y colaboradores (2006).

En el caso de las cárcavas, existe en el área una, denominada localmente como “*La barraquilla*” que tiene más de 60 años de haberse formado, presenta características lineales, y de acuerdo con la información local fue un paso de ganado y camino para “*bajar madera*”, en áreas similares del sur de Cuitzeo, otras cárcavas son de reciente formación o expansión 15-30 años, contrario a lo reportado por Sevenay y Prat (2003).

Sin embargo, durante el trabajo de campo se encontraron áreas con morfología de cárcava bajo doseles arbóreos bien desarrollados (Bosque cerrado).

Acerca de la plantación de *Cupresus*, se puede decir que fue establecida en un área agrícola abandonada hace aproximadamente 30-35 años bajo iniciativas gubernamentales, dentro de programas subsidiados.

Variación espacial de la Kfs en relación con la cobertura vegetal y uso del suelo

La variación espacial de la conductividad hidráulica ha sido descrita como el resultado de varios procesos independientes operando a diferentes escalas espaciales y temporales, con jerarquías anidadas (Sobieraj et al., 2004). Esta sobreposición de procesos, actuando de manera simultánea en diferentes escalas (Burrough, 1983a, b), puede generar distribuciones caóticas no lineales de la conductividad hidráulica, como las mencionadas por Phillips (1993).

Desde hace varias décadas, estos patrones previamente descritos como caóticos han sido estudiados con nuevos marcos conceptuales, como la

geometría fractal (Burrough, 1983a, b; Duhour et al., 2004). De acuerdo a Anderson y colaboradores (Anderson et al., 1998), el suelo es un sistema geométrico complejo que puede ser concebido como un objeto fractal. Esto significa que conserva un patron similar de forma a través de varias escalas de tamaño formando patrones de autosemejanza (Duhour et al., 2004). Las funciones de distribución probabilística encontradas para esta propiedad son un reflejo de la dimensión fractal del suelo como ente geométrico.

Varios autores han empleado geometría y análisis fractal para describir y caracterizar el espacio poroso del suelo p. ej. (Rieu y Sposito, 1991; 1996; Zeleke y Si, 2005; Pachepsky et al., 2006a) que es en definitiva el control específico de la capacidad de infiltración y la conductividad hidráulica. Crawford (1994) encontró que las conductividades hidráulica saturada e insaturada son dependientes en forma potencial de la longitud de la porosidad efectiva, además la conductividad hidráulica saturada es dependiente de la conductividad máxima de los mayores poros efectivos en la estructura. Este autor indica que la relación entre los parámetros de la ley potencial y la estructura del suelo dependen de una estructura fractal de tipo Hausdorff (Crawford, 1994)

Es importante señalar que si bien se exploró la relación existente entre la conductividad hidráulica y algunas variables fisicoquímicas, existen ciertos puntos importantes. Uno de ellos es que en varias coberturas no se detectó como se esperaba una relación importante entre la conductividad hidráulica y la densidad aparente, salvo en el bosque de pino-encino. Una posible explicación, es que la muestra utilizada para calcular la densidad aparente no se tomó exactamente donde se realizó el ensayo de infiltración, pero cerca (± 10 cm) de éste. También es posible que la muestra de densidad aparente no refleje las condiciones de porosidad puntuales en la superficie del ensayo.

Para el caso del agostadero, aún tras haber transformado las variables para ajustarlas a distribuciones normales, el análisis de correlación indicó una relación entre la conductividad hidráulica saturada de campo (como $\ln K_{fs}$) y el contenido de carbono orgánico en volumen (ajustado por la densidad) ($r=0.3152$,

$p=0.045$). Para la regresión entre estas dos variables, el resultado fue un modelo lineal con muy baja capacidad de predicción ($r^2=0.0991$) marginalmente significativo ($p=0.0424$). Lo anterior indica una dependencia muy baja de la conductividad hidráulica de esta variable. Por lo que en esta cobertura y uso del suelo la variación de la K_{fs} está determinada por otras variables de control.

En el sitio con cobertura vegetal de bosque de pino encino (BPQ) hubo tres variables relacionadas con el $\ln K_{fs}$, los agregados estables de 2.0 a 4.0 mm, el % limo y la densidad aparente. Aún cuando se tuvieron r^2 bajas para los modelos lineales individuales, ó para el modelo de regresión lineal múltiple con estas variables, éstos fueron significativos. Estos resultados sugieren que en este ambiente con gran cantidad de macroporos y canales de flujo preferencial, hay pequeñas modificaciones en el espacio poroso que determinan la conductividad hidráulica. Entre menor sea la densidad aparente, mayor es el espacio poroso del suelo. Este sitio es completamente distinto a los demás en cuanto a la conductividad hidráulica (analizada como $\ln K_{fs}$) ya que estadísticamente se constataron las diferencias para la estabilidad de agregados de 2.0 a 4.0 mm entre este sitio y el resto (excepto el agostadero). Estas diferencias estadísticas son el reflejo de los procesos de bioturbación que incrementan el espacio poroso del suelo favoreciendo el flujo preferencial y disminuyendo la densidad aparente. Estos procesos de bioturbación fueron claramente identificados en la descripción del perfil para este sitio. Éste perfil fue el único de los estudiados donde se pudieron diferenciar claramente dos subhorizontes con estructura biogénica dentro del horizonte superficial y con un elevado contenido de arenas.

En el sitio de cárcava se esperaba encontrar una fuerte relación entre el contenido de arcillas o arenas y la K_{fs} , pero no fue así. Esta cobertura fue en la que se observaron los menores valores de K_{fs} . Al parecer, la pérdida de los horizontes superficiales y el afloramiento de los horizontes $2B_t$ reducen significativamente las tasas de infiltración del suelo superficial. Las diferencias en la conductividad hidráulica en este caso se atribuyen a la presencia de

macroporos cuyo patrón de distribución parece ser una función independiente de variables como la densidad aparente o la textura.

En el caso de la parcela abandonada, no se obtuvieron correlaciones significativas con ninguna variable y el modelo lineal divariado explorado tiene una limitada capacidad explicativa. Parece ser, que en esta cobertura y uso del suelo, la variación de la K_{fs} atribuible a los macroporos no es dependiente de las variables exploradas.

Para el sitio con plantación de *Cupresus*, aún cuando los valores de r^2 , tanto para los modelos divariados como para el multivarido fueron bajos, si se encontraron correlaciones significativas de las variables analizadas con la conductividad hidráulica saturada, indicando que éstas pueden estar formando parte del control de la K_{fs} . En el caso del limo, este está relacionado con la clase textural, la distribución y tamaño de los poros (Fuentes et al., 2004). El contenido final de humedad está relacionado igualmente con el espacio poroso, mientras que el contenido de carbono orgánico esta relacionado con la estabilidad de agregados (Cerdà et al., 1995; Cabria et al., 2002; Shaver et al., 2002; Li y Shao, 2006), aunque se sabe que hay otros factores relacionados como el contenido de hierro y otros minerales (Zhang y Horn, 2001).

Relación de la K_{fs} con la textura y bioturbación

Un aspecto interesante es que en la literatura especializada comúnmente se refiere a la vegetación como un promotor de la infiltración por su efecto en las propiedades del suelo (Pilgrim et al., 1988; Wit, 2001; Cichota et al., 2003; Mills y Fey, 2004; Li y Shao, 2006).

En este estudio, encontramos, que aún con coberturas arbóreas elevadas, como en la plantación de *Cupresus* pueden darse valores relativamente bajos de conductividad hidráulica, en forma que el sitio, no tenga diferencia estadística con un área de cultivo abandonada (parcela abandonada) o una cárcava. Lo que indica que una cobertura vegetal densa no favorece necesariamente una capacidad de infiltración ó conductividad hidráulica saturada elevada.

El perfil ubicado en la plantación de *Cupresus* no mostró evidencias de bioturbación como las que presentó el bosque de pino-encino. Si bien los contenidos de materia orgánica son similares (5.26 y 5.1 %) para los horizontes superficiales, la plantación no mostró los horizontes franco-arcillosos o incluso franco-arenosos que se encontraron en los sitios de bosque y agostadero. Sin embargo, en conjunto y desde la perspectiva del sitio, por encima del perfil descrito, los datos provenientes de las muestras obtenidas durante los ensayos de infiltración indican que la proporción de arena no fue estadísticamente distinta entre el bosque y la plantación, pero si hubo diferencia estadística para % de arcilla. Sin embargo, las diferencias en las proporciones de material determinante de la textura (% arena y % limo) entre algunos de los sitios y sus diferencias en la conductividad hidráulica saturada indican un posible control de la textura, aún cuando no existan correlaciones significativas para varios sitios (cárcava, agostadero ó parcela abandonada) entre los porcentajes de material fino y la K_{fs} . Esta relación ha sido reconocida desde hace varias décadas (Soil-Survey-Staff, 1951) y es parte fundamental de diversos modelos de pedotransferencia (Tietje y Hennings, 1996; Lin et al., 1999; Elsenbeer, 2001; Pachepsky y Rawls, 2003; Ferrer et al., 2004; Romano, 2004; Chirico et al., 2007).

Por encima de la escala del sitio, incluyendo los datos de todos los sitios en el análisis, los porcentajes de arena, limo y arcilla correlacionan significativamente con el $\ln K_{fs}$, $r^2=0.2017$, $p= 0.006$ para % arena, $r^2= -0.2276$, $p=0.002$ para el % arcilla (Tabla 3.10). Indicando un incremento en el $\ln K_{fs}$ con el aumento de las arenas, y un decremento del $\ln K_{fs}$ con el incremento de las arcillas, como se reportó en los capítulos 2 y 3 (Tabla 2.6; Figura 2.6A, B: Figura 3.7).

Los datos de conductividad hidráulica y las descripciones de los perfiles indican que la bioturbación es un proceso clave en la modificación de las rutas preferenciales de flujo hidráulico en los suelos del área de estudio. Las diferencias en estructura encontradas entre los sitios son similares a las reportadas por otros autores (Frouz et al., 2007b). La bioturbación no solo se relaciona con la composición vegetal y el uso del suelo por las características del

mantillo (Shakir y Dindal, 1997), sino también con la historia de uso (Raty y Huhta, 2004; Callaham et al., 2006). Este es un aspecto relevante en virtud de que las comunidades de macro invertebrados pueden modificar las propiedades fisicoquímicas del suelo favoreciendo la formación de humus, generando canales y bioporos, incorporando materia orgánica en la matriz del suelo e incrementando la estabilidad de los agregados (Frouz et al., 2007b; Mboukou-Kimbatsa et al., 2007). Sin embargo su efecto va más allá de los horizontes superficiales, ya que pueden alterar la estratificación de los horizontes del suelo, por la translocación material entre los horizontes (Eisenhauer et al., 2007), y favorecer la conectividad hidráulica entre la superficie y horizontes profundos vía macro y mesoporos (Pitkanen y Nuutinen, 1998).

Sin embargo, la bioturbación no solo comprende las actividades de los macroinvertebrados del suelo, sino también abarca la mesofauna edáfica (Wang et al., 1996; Sobieraj, 2003; Tsukamoto y Sabang, 2005; Eisenhauer et al., 2007; Frouz et al., 2007a), los vertebrados (Sobieraj, 2003; Zaitlin et al., 2007) desde pequeños roedores y tuzas (Matula, 2003; Zaitlin et al., 2007) hasta armadillos (Sobieraj, 2003), así como también la bioturbación por las raíces (Chisci et al., 2001; Dasgupta, 2005; Gregory, 2006; Watteau et al., 2006).

Aún cuando el flujo laminar del agua en un medio poroso saturado está definido por la ley de Darcy, en un medio insaturado, la ecuación de Richard es una aproximación más realista (Špongrová, 2006). Sin embargo, varios autores han documentado que la infiltración en la zona vadosa ocurre principalmente por flujo preferencial (Mohanty et al., 1988; Shouse y Mohanty, 1988; Logsdon y Jaynes, 1996; Mohanty et al., 1997) y no dentro de la matriz del suelo. El flujo preferencial permite el movimiento rápido del agua a través del suelo, que por lo general evita el paso por la matriz del suelo, facilitando por un lado la recarga local y favoreciendo la contaminación de los acuíferos (Ranade y Gupta, 1987; DiCarlo et al., 1999; Dasgupta et al., 2006). El flujo preferencial ocurre generalmente a través de macroporos, cuyos tres orígenes principales son: a) actividad biológica (macro y mesoinvertebrados y túneles generados por la pudrición de las raíces), b) actividades culturales y de manejo del suelo y c)

fenómenos naturales como el fracturamiento de las rocas y erosión en tubos. Por lo tanto el proceso de infiltración se encuentra determinado en gran parte por las condiciones ambientales naturales (Dasgupta, 2005).

Variación anidada de variables edáficas

Aunque en este trabajo no se detectaron patrones de variación espacial anidados para la Kfs , si se detectaron estos patrones para otras variables como los porcentajes de arcilla o arena, que pueden funcionar como control de la Kfs en la escala de conjunto de sitios (Figura 3.5). En la Figura 4.1 se ejemplifican los patrones anidados para dos variables, % de arena y carbono orgánico a partir de sus variogramas experimentales.

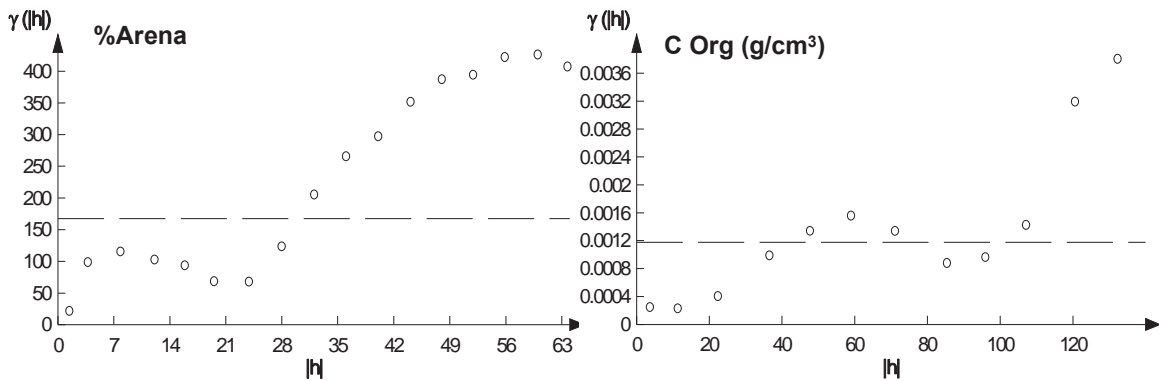


Figura 4.1. Variogramas experimentales omnidireccionales para % Arena y contenido de Carbono orgánico.

La ocurrencia de estos patrones anidados se debe a que las variables tienen al menos dos escalas de variación. A partir de los variogramas (Figura 4.1) se deduce que por ejemplo el % de arena tiene un primer nivel en distancias entre los 0 y los 21 metros, alcanzando la primera meseta alrededor de los 7 metros. El segundo nivel ocurre a distancias entre 23 y 63 metros, alcanzando la segunda meseta cerca de los 56 metros. El primer nivel corresponde a la escala de sitio en este trabajo, definida por el uso del suelo y cobertura vegetal, el segundo nivel abarca la variación entre sitios. Para el caso del carbono orgánico, la situación es similar, el primer nivel va de los 0 a los 80 m, alcanzando la

meseta cerca de los 60 m, el segundo nivel va aproximadamente de los 80 a más de 140 m, ya que en este nivel no se visualiza la segunda meseta.

El primer nivel corresponde a la escala de variación interna de los sitios (coberturas y usos del suelo), mientras que el segundo nivel corresponde a la variación existente entre los sitios.

Patrones de variación y relaciones en la escala local

Las características de los perfiles estudiados, los cortes de carretera y los afloramientos en los fondos de cárcavas y barrancos, indican que el suelo se formó *in situ* a partir de cenizas volcánicas por intemperismo, y se diferencian al menos dos etapas de formación. Una primera que conformó los horizontes subsuperficiales 2B_{t1} y 2B_{t2} que corresponden al Lixisol húmico, en esta etapa la ceniza cayó sobre materiales ignimbríticos que conforman el horizonte C_w.

En la segunda etapa nuevas cenizas se depositaron sobre el suelo previamente formado ocurriendo procesos pedogenéticos que han llevado estos materiales hasta un Cambisol.

Las descripciones de los perfiles indican que en el área de estudio los perfiles excavados en los distintos sitios, corresponden a variantes locales de un mismo suelo. Con diferencias debidas entre otras cosas a la cobertura vegetal, el uso del suelo actual, así como la historia de uso de cada sitio.

Se exploró la variación de la K_{fs} como variable clave en el proceso de infiltración, desde una perspectiva de paisaje local con estratificación de acuerdo al uso del suelo y cubierta vegetal. Se hipotetizó la existencia de una relación entre el tipo de vegetación y cobertura del suelo y la infiltración, cuantificada a partir de la conductividad hidráulica saturada de campo como propiedad clave en este proceso. Hipotetizamos también que esta relación es más o menos directa, en donde a mayor cobertura mayor infiltración.

Los resultados indican que existe relación entre el tipo de cobertura vegetal, las características del suelo y la K_{fs}, donde confluyen diversas variables de control que interactúan entre si y tienen ciclos de retroalimentación.

Los horizontes superficiales (A_{11} , A_{12} y AB) mostraron mayor contenido de arenas que los subsuperficiales los cuales tienen elevado contenido de arcillas (B_t y BC). La información resultante de este estudio permitió establecer que la cobertura vegetal, como se definió en este trabajo está estrechamente relacionada con la historia de uso del sitio y con la presencia de ciertos horizontes.

De esta forma, la variación de la K_{fs} para cada sitio depende en gran medida no solo de la cobertura vegetal y el tipo de suelo, el cual comúnmente se define a partir de la cartografía existente, sino del afloramiento de horizontes específicos y de los procesos de bioturbación ocurrientes y de formación de canales de flujo preferencial (Figura 3.8).

Conforme al objetivo principal de este trabajo doctoral, y para generar una explicación de la ocurrencia de patrones previamente reportados en la literatura y procesos encontrados en este trabajo se plantea un modelo conceptual en donde explica la variación espacial de la K_{fs} en corto rango incorporando controles mencionados previamente por Cerdà (Cerdà, 1995, 1997b; 1997a, 1999), Buttle y House (1997), Chisci y colaboradores (2001), Sobieraj (2003) y Lai y Ren (2007), además de los encontrados en este trabajo.

Este modelo conceptual (Figura 4.2) corresponde a una línea de tiempo hipotética, A, B, C, en donde:

A) Etapa inicial que presenta cubierta de matorrales, con “islas” de fertilidad características de ambientes con poca cobertura típicos de sitios semiáridos o mediterráneos (Cerdà, 1997a, 1998a) o en etapas sucesionales tempranas (Lai y Ren, 2007). La K_{fs} en los espacios entre vegetación (1) está controlada por el espacio poroso como función de la textura. En las islas de fertilidad (2), la K_{fs} está controlada por macroporos y canales de flujo preferenciales, a) mantillo en la isla de fertilidad, b) actividad biológica de invertebrados asociados a la descomposición del mantillo, que favorece la formación de un horizonte biogénico.

B) Etapa intermedia, ocurre la muerte de la vegetación de la etapa A, y se da el arribo de nuevos propágulos, c) la biomasa vegetal se convierte en necromasa y continúa favoreciendo la diferenciación del horizonte biogénico (d), las raíces se pudren generando canales preferenciales de mayor tamaño en el área de la antigua isla de fertilidad (3). En ésta la K_{fs} está controlada por los canales preferenciales formados por las raíces muertas y otros macroporos biogénicos, en el área entre islas (4) se mantiene el control de la textura.

C) Etapa tardía, ocurre la revegetación con organismos arbóreos y desarrollo de dos estratos. La K_{fs} en la antigua área entre islas al no recibir hojarasca (5) continúa siendo controlada principalmente por la textura. En la antigua área de "isla" (6) la K_{fs} está controlada por los canales preferenciales formados por la actividad biológica precedente y la actual, los canales de las nuevas raíces y las vías preferenciales formadas por los bioporos dejados por las raíces al descomponerse. Los árboles en esta etapa, tienen mayor cobertura, modificando los pulsos evapotranspirativos locales y modificando el microclima además el aporte de grandes volúmenes de hojarasca incrementa la actividad biológica bajo su copa (7). El límite superior del horizonte biogénico se difumina con la capa de fermentación y se engruesa (f), las antiguas raíces descompuestas se comienzan a rellenar de material modificando estas rutas preferenciales (g).

Las gráficas de la derecha (Figura 4) esquematizan el valor de la K_{fs} para cada punto de medición (cuadros pequeños). Los diferentes controles generan que aún a distancias cortas los valores sean muy distintos.

En condiciones de campo, la macroporosidad superficial asociada a la bioturbación es relativamente sencilla de observar, excavando perfiles poco profundos, sin embargo la existencia de canales preferenciales generados por la pudrición de las raíces es difícil de observar y es imperceptible *a priori*.

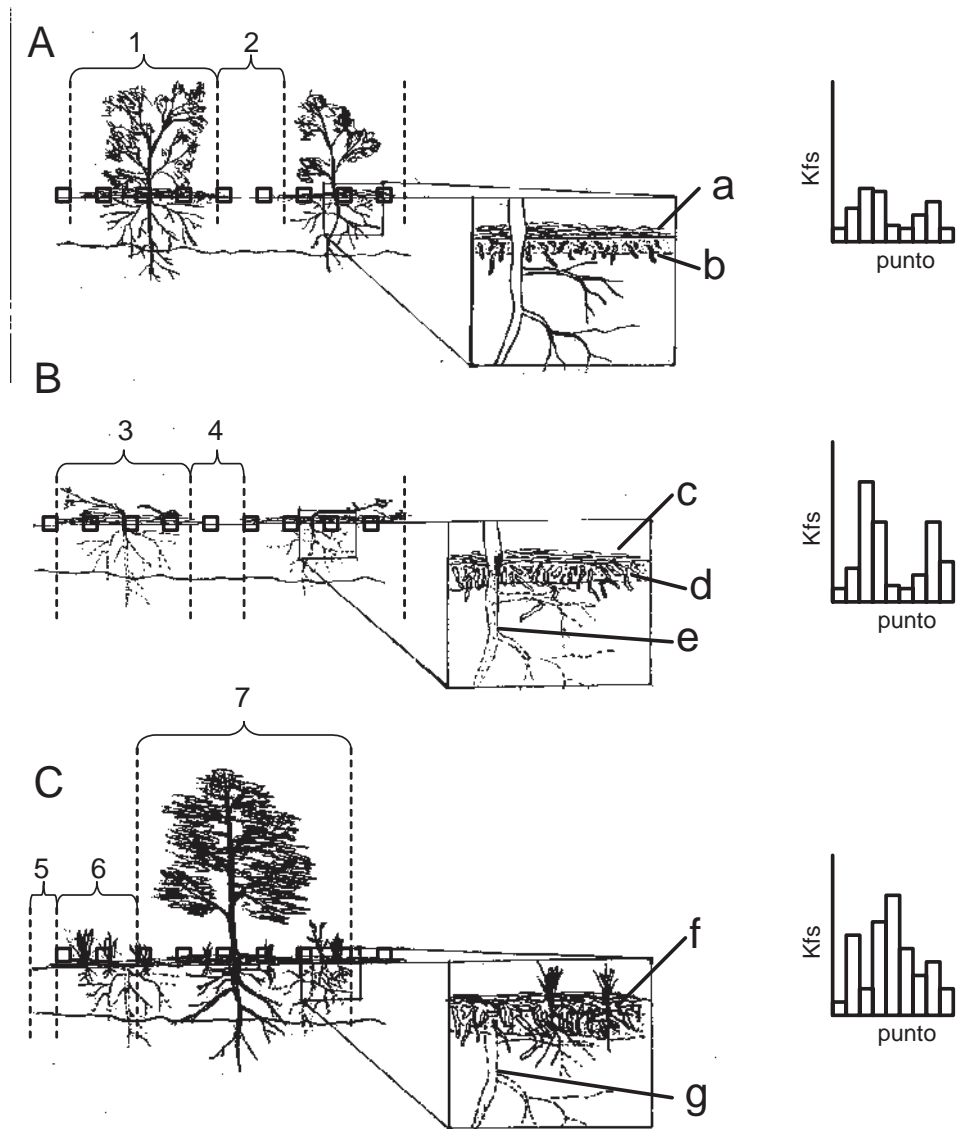


Figura 4.2. Modelo conceptual de una posible secuencia de modificación de la K_{fs} y formación de distribuciones caóticas. Los cuadrados pequeños son puntos de medición de K_{fs} con anillo sencillo, a la derecha se muestra la gráfica de K_{fs} para los puntos del transecto hipotético. Explicación en el texto.

Este modelo conceptual incluye diferentes controles de la K_{fs} además de la influencia histórica, que se considera es responsable en gran medida de la micro heterogeneidad capturada por infiltrómetros con superficies pequeñas, sean estos de anillo o de disco (Wang et al., 1998; Lai y Ren, 2007).

Aún cuando el modelo conceptual anterior es una simplificación del conjunto de procesos que controlan la variación de la K_{fs} y no se consideran factores como la heterogeneidad horizontal del material o la formación de vías preferenciales por expansión y contracción del suelo que son responsables del flujo de grandes volúmenes de agua (Vervoort y Cattle, 2003; Dasgupta, 2005; Dasgupta et al., 2006), se considera es un aporte sustancial en el entendimiento de la variación espacial de la capacidad de infiltración y la K_{fs} .

CONCLUSIONES GENERALES

La hipótesis planteada explica solo parcialmente la variación espacial de la Kfs como variable subordinada de las propiedades edáficas y la cobertura vegetal. Se tiene que en ciertos casos de mayor cobertura vegetal si se presenta mayor Kfs, pero en otros la Kfs es reducida. Esta variación se explica por el afloramiento diferencial de horizontes relacionado con la historia de uso del suelo bajo las diferentes coberturas.

Respecto al aporte general del trabajo se concluye que:

- La capacidad de infiltración estudiada en este trabajo utilizando la conductividad hidráulica saturada no es una función de dependencia exclusiva de la cobertura vegetal aún para un mismo tipo de suelo definido a partir de las bases cartográficas oficiales (INEGI, 1979a).
- La infiltración y la conductividad hidráulica saturada que se cuantifica en un sitio o punto específico no es el resultado exclusivo de los procesos actuales, sino que están fuertemente influidas por la historia de manejo y la sucesión natural.

Desde el punto de vista general, metodológico y conceptual:

- El suelo correspondiente a la unidad taxonómica definida en la cartografía oficial en el área de estudio como Acrisol órtico (INEGI, 1979a) fue clasificada como un Lixisol húmico sepultado por un Cambisol de acuerdo a la WRB, 1999 (FAO, 1999) y presenta variantes locales.
- Bajo la cobertura vegetal densa de plantación de *Cupresus* (PCu) la conductividad hidráulica saturada fue estadísticamente igual a la presente en la parcela abandonada (PA) o la cárcava (C), mientras que en el bosque de pino-encino (BPQ) fue superior en un orden de magnitud a la de PCu.
- Las diferencias en conductividad hidráulica saturada se debieron al afloramiento de ciertos horizontes en los distintos sitios y a la formación

de canales de flujo preferencial producidos principalmente por bioturbación bajo ciertas coberturas.

- La ocurrencia superficial de un horizonte determinado se debe a: 1) la variación vertical y secuencia de horizontes natural del sitio, 2) la historia de uso del suelo, y el manejo puntual.

En cuanto a la aportación tecnológica y cumpliendo con el objetivo 1.

- Se construyó y probó un infiltrómetro de carga constante de bajo costo y fabricación sencilla, capaz de una resolución estadísticamente igual a aquella de un equipo comercial, que captó eficientemente la variación de la conductividad hidráulica saturada de campo asociada a la textura, porosidad y bioturbación presentes en cuatro suelos volcánicos con texturas contrastantes del sur de la cuenca de Cuitzeo.
- El método más adecuado para calcular la conductividad hidráulica saturada de campo utilizando el infiltrómetro diseñado y construido es del Wu2 (Wu et al., 1999).
- Además se diseñó, construyó y probó un dispositivo de automatización de registro de altura de una columna de agua que permite automatizar el infiltrómetro diseñado y construido, cuya desviación estándar fue de 2.0 mm, para un rango de medición de 0.0 a 85.0 cm bajo condiciones de burbujeo.
- La conductividad hidráulica saturada de campo calculada a partir de datos obtenidos manualmente y de datos obtenidos automáticamente no mostró diferencias significativa ($\alpha < 0.05$) para cuatro suelos volcánicos del sur de la cuenca de Cuitzeo, aunque se presentó una tendencia del método automatizado a reducir la desviación estándar para cada suelo.

Respecto a la variación de la K_{fs} y su relación con otras propiedades edáficas (Objetivos 2 y 3).

- Las mayores conductividades se registraron bajo cobertura de bosque $1578.57 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ en promedio con desviación estándar (DS) de 1576.78,

- seguido por el agostadero con un promedio de $378.94 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ y $DS=456.97$, la plantación de *Cupresus* con promedio de $264.30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ y $DS=393.47$, luego la cárcava con promedio de $160.76 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ y $DS=246.41$, mientras que la parcela abandonada tuvo la conductividad promedio mas baja $99.72 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ $DS=92.02$.
- La variación de la conductividad hidráulica saturada de campo mostró funciones de distribución probabilística del tipo Log-normal en las cinco coberturas de vegetación y uso del suelo corroborando lo mencionado previamente en la literatura especializada.
 - Las retículas del esquema de muestreo no lograron capturar la variación máxima de la conductividad hidráulica saturada de campo, evidenciado en los variogramas experimentales por no alcanzar la fase de meseta. Los patrones espaciales encontrados son complejos presentándose un elevado componente pepita (variabilidad aleatoria).
 - Se encontraron en la escala de paisaje correlaciones positivas significativas para el $\ln K_{fs}$ y % de agregados estables en el intervalo 2.0 a 4.0 mm y de 0.25 a 2.0 mm, el % de arena, % de limo y el carbono orgánico edáfico. Y correlaciones negativas significativas con la densidad aparente y el contenido de humedad inicial.
 - El análisis por sitio mostró que en bajo diferente cobertura vegetal y uso del suelo las correlaciones entre la conductividad hidráulica saturada de campo y las variables fisicoquímicas es distinta sugiriendo que la K_{fs} está controlada por variables diferenciadas en los diferentes ambientes analizados, que no dependen directamente de la cobertura vegetal presente en el momento de la cuantificación.
 - Se construyó un modelo conceptual explicativo en el cual ciertos sitios (cárcava, plantación y parcela abandonada) es determinante el tipo de horizonte y que se presente en superficie como resultado de la historia de uso y manejo. Mientras que para otros sitios se sugiere que la presencia o

ausencia de cobertura vegetal arbórea densa está controlando a la conductividad hidráulica saturada vía mantillo y la bioturbación del suelo superficial relacionada a éste.

Los resultados de este trabajo no soporta el marco conceptual en el que se basan la política nacional y los lineamientos de los programas de pagos por servicios ambientales de la Comisión Nacional Forestal, los cuales asumen una relación directa entre la cobertura vegetal y el aumento de capacidad de infiltración.

Se considera que el seguimiento con ésta línea de trabajo aportaría elementos para definir, validar o modificar los lineamientos a seguir para evaluar las condiciones medioambientales y establecer su relación con el incremento o decremento de la infiltración a fin de diseñar estrategias de manejo que favorecieran un incremento efectivo en la infiltración.

REFERENCIAS

- Aguilar-Santelices, A., J. D. Etchevers, y J. Z. Castellanos. 1987. Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo., Chapingo, México.
- Amézketa Lizarraga, E., R. Aragüés Lafarga, y R. Gazol Lostao. 2002. Desarrollo de un infiltrómetro automático y su aplicación en campo. *Investigación agraria. Producción y protección vegetales* **17**:131-142.
- Amoozegar, A. 1992. Compact Constant Head Permeameter: A Convenient Device for Measuring Hydraulic Conductivity. *in* G. C. Topp, W. D. Reynolds, and R. E. Green, editors. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. Soil Science Society of America, Inc.
- Amoozegar, A. 2002. Models for field determination of saturated hydraulic conductivity. Pages 45-53 *in* C. E. Stokes, editor. *XLV Annual Meeting*, Raleigh, North Carolina, USA.
- Anderson, A. N., A. B. McBratney, y J. W. Crawford. 1998. Application of fractals to soil studies. *Advances in Agronomy* **63**:77.
- Angulo-Jaramillo, R., J.-P. Vandervaere, S. Roulier, J.-L. Thony, J.-P. Gaudet, y M. Vauclin. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: A review and recent developments. *Soil and Tillage Research* **55**:1-29.
- Ankeny, M. D. 1992. Methods and Theory for Unconfined Infiltration Measurements. Pages 123-141 *in* G. C. Topp, W. D. Reynolds, and R. E. Green, editors. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. Soil Science Society of America, Inc.
- Ankeny, M. D., T. C. Kaspar, y R. Horton. 1988. DESIGN FOR AN AUTOMATED TENSION INFILTRMETER. *Soil Sci Soc Am J* **52**:893-896.
- Atkinson, P. M., y C. D. Lloyd. 2007. Non-stationary variogram models for geostatistical sampling optimisation: An empirical investigation using elevation data. *Computers & Geosciences* **33**:1285-1300.
- Bagarello, V., M. Iovino, y D. Elrick. 2004. A Simplified Falling-Head Technique for Rapid Determination of Field-Saturated Hydraulic Conductivity. *Soil Sci Soc Am J* **68**:66-73.
- Bakr, A. A., L. W. Gelhar, A. L. Gutjahr, y H. R. MacMillan. 1978. Stochastic analysis of spatial variability in subsurface flow. I. Comparison of one and three dimensional flows. *Water Resources Research* **14**:263-272.
- Ball, B. C., D. J. Campbell, J. T. Douglas, J. K. Henshall, y M. F. O'Sullivan. 1997. Soil structural quality, compaction and land management. *European Journal of Soil Science* **48**:593-601.
- Bear, J. 1972. *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier, New York, USA.
- Berger, T. W., y H. Hager. 2000. Physical top soil properties in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria. *Forest Ecology and Management* **136**:159-172.
- Bergkamp, G., A. Cerda, y A. C. Imeson. 1999. Magnitude-frequency analysis of water redistribution along a climate gradient in Spain. *CATENA* **37**:129-146.
- Biggar, J. W., y D. R. Nielsen. 1976. Spatial variability of the leaching characteristics of a field soil. *Water Resources Research* **13**:78-84.
- Bigioggero, B., P. Corona-Chávez, V. H. Garduño Monroy, E. Carrara, y L. Lanza. 2004. La "Piedra de Cantera" de Morelia desarrollo entre la tradición y la cultura: un acercamiento geológico y una alternativa. *in* V. H. Garduño Monroy, editor. *Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental de la Región de Morelia*. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich. México.
- Bishop, T. F. A., y R. M. Lark. 2006. The geostatistical analysis of experiments at the landscape-scale. *Geoderma* **133**:87-106.
- Bouma, J. 1985. Soil spatial variability and soil survey. Pages 130-149 *in* J. Bouma and D. R. Nielsen, editors. *Soil Spatial Variability*. International Soil Science Society & Soil Science Society of America, 30 Nov.-1 Dec. Las Vegas, Nevada, EUA.

- Brejda, J., T. B. Moorman, J. L. Smith, D. L. Karlen, D. L. Allan, y T. H. Dao. 2000. Distribution and variability of soil surface properties at a regional scale. *Soil Sci Soc Am J* **64**:974-982.
- Buczko, U., O. Bens, y R. F. Huttl. 2006. Tillage Effects on Hydraulic Properties and Macroporosity in Silty and Sandy Soils; 10.2136/sssaj2006.0046. *Soil Sci Soc Am J* **70**:1998-2007.
- Burrough, P. A. 1983a. Multiscale sources of spatial variability in soil. I. The implication of fractal concepts to nested levels of soil variation. *Journal of Soil Science* **34**:577-597.
- Burrough, P. A. 1983b. Multiscale sources of spatial variability in soil. II. A non-Brownian fractal model and its application in soil survey,. *Journal of Soil Science* **34**:599-620.
- Buttle, J. M., y D. A. House. 1997. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin. *Journal of Hydrology* **203**:127-142.
- Cabria, F., M. Calandroni, y G. Monterubbianesi. 2002. Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. *Ciencia del Suelo* **20**:69-80.
- Callahan, J., M.A., J. Richter, D.D., D. C. Coleman, y M. Hofmockel. 2006. Long-term land-use effects on soil invertebrate communities in Southern Piedmont soils, USA. *European Journal of Soil Biology* **42**:S150-S156.
- Campos-Aranda, D. F. 1987. *Procesos del Ciclo Hidrológico*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.
- Carlón-Allende, T. 2006. Regionalización hidrológica en la cuenca del lago de Cuitzeo. Tesis de Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Casey, F. X. M., y N. E. Derby. 2002. Improved design for an automated tension infiltrometer. *Soil Sci Soc Am J* **66**:64-67.
- Cerdà, A. 1995. Soil moisture regime under simulated rainfall in a three years abandoned field in southeast Spain. *Physics and Chemistry of The Earth* **20**:271-279.
- Cerdà, A. 1996. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain. *Geoderma* **69**:217-232.
- Cerdà, A. 1997a. The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* L. on runoff and erosion. *Journal of Arid Environments* **36**:37-51.
- Cerdà, A. 1997b. Seasonal changes of the infiltration rates in a Mediterranean scrubland on limestone. *Journal of Hydrology* **198**:209-225.
- Cerdà, A. 1998a. 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. 1998b. Relationships between climate and soil hydrological and erosional characteristics along climatic gradients in Mediterranean limestone areas. *Geomorphology* **25**:123-134.
- Cerdà, A. 1999. Seasonal and spatial variations in infiltration rates in badland surfaces under Mediterranean climatic conditions. *Water Resour. Res.* **35**:319-328.
- Cerdà, A. 2002. The effect of season and parent material on water erosion on highly eroded soils in eastern Spain. *Journal of Arid Environments* **52**:319-337.
- Cerdà, A., S. Ibanez, y A. Calvo. 1997. Design and operation of a small and portable rainfall simulator for rugged terrain. *Soil Technology* **11**:163-170.
- Cerdà, A., A. C. Imeson, y A. Calvo. 1995. Fire and aspect induced differences on the erodibility and hydrology of soils at La Costera, Valencia, southeast Spain. *CATENA* **24**:289-304.
- CETENAL. 1973a. Carta Edafológica F14C82, Moroleón. *in*. CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional), México, D.F.
- CETENAL. 1973b. Carta Edafológica F14C84, Acámbaro. *in*. CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional), México, D.F.
- CETENAL. 1973c. Carta Geológica E14C83, Moroleón. *in*. CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional), México, D.F.
- CETENAL. 1973d. Carta Geológica F14C84, Acámbaro. *in*. CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional), México, D.F.
- CETENAL. 1974a. Carta Edafológica F14C83, Puruándiro. *in*. CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional), México, D.F.

- CETENAL. 1974b. Carta Geológica E14C82, Puruándiro. *in*. CETENAL (Comisión de Estudios del Territorio Nacional), México, D.F.
- Chiesura, A., y R. de Groot. 2003. Critical natural capital: a socio-cultural perspective. *Ecological Economics* **44**:219-231.
- Chirico, G. B., H. Medina, y N. Romano. 2007. Uncertainty in predicting soil hydraulic properties at the hillslope scale with indirect methods. *Journal of Hydrology* **334**:405-422.
- Chisci, G. C., P. Bazzoffi, M. Pagliai, R. Papini, S. Pellegrini, y N. Vignozzi. 2001. Association of sulla and atriplex shrub for the physical improvement of clay soils and environmental protection in central Italy. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **84**:45-53.
- Cichota, R., Q. de Jong van Lier, y R. C. A. Leguizamón. 2003. Variabilidade espacial da taxa de infiltração em Argissolo Vermelho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* **23**:789-798.
- CONAFOR. 2007. Términos de referencia del programa de mejores prácticas de manejo para la provisión de servicios ambientales hidrológicos, de conformidad al acuerdo por el que se expide las reglas de operación del programa Pro-Arbol de la Comisión Nacional Forestal. Términos de Referencia Comisión Nacional Forestal, Zapopa, Jalisco.
- Constanz, J., y F. Murphy. 1987. An automated technique for flow measurement from Mariotte reservoirs. *Soil Sci Soc Am J* **51**:252-254.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, y M. van den Belt. 1998a. The value of ecosystem services: putting the issues in perspective. *Ecological Economics* **25**:67-72.
- Costanza, R., R. d'Arge, R. de Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin, P. Sutton, y M. van den Belt. 1998b. The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Ecological Economics* **25**:3-15.
- Cotler, H., y P. Balvanera. 2006. Evaluación de los servicios ecosistémicos en México: obstáculos y oportunidades. Pages 181 *in* Congreso Internacional Servicios Ecosistémicos en los Neotrópicos. Bosque, 13-19 Nov. Valdivia, Chile.
- Crawford, J. W. 1994. The relationship between structure and the hydraulic conductivity of soil. *European Journal of Soil Science* **45**:493-502.
- Cuevas-Flores, L., D. Tejeda-Sartorius, J. A. García-Carreón, J. C. González-Olarte, H. Hernández-Méndes, M. d. L. Lira-Quintero, J. L. Nieves-Frausto, C. M. Vázquez-Martínez, y R. Cardoza-Vázquez. 2007. Protección, restauración y conservación de suelos forestales; Manual de obras y prácticas. Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco.
- Dafonte, J. D., M. Valcárcel-Armesto, X. X. Neira-Seijo, y A. Paz-González. 1999. Análisis de los métodos de cálculo de la conductividad hidráulica saturada de campo medida con permeámetro Guelph. Pages 5-10 *in* R. Muñoz-Carpena, A. Ritter Rodríguez, and C. Tascón Rodríguez, editors. Estudios de la zona No Saturada del Suelo. ICIA, Tenerife.
- Dasgupta, S. 2005. Infiltration under two contrasting hydrologic scenarios in Texas. Master in Sciences. Texas A&M University.
- Dasgupta, S., B. P. Mohanty, y J. M. Kohne. 2006. Soil Hydraulic Conductivities and their Spatial and Temporal Variations in a Vertisol. *Soil Sci Soc Am J* **70**:1872-1881.
- Davidoff, B., y H. M. Selim. 1986. Goodness of Fit for Eight Water Infiltration Models. *Soil Sci Soc Am J* **50**:759-764.
- de Groot, R., J. Van der Perk, A. Chiesura, y A. van Vliet. 2003. Importance and threat as determining factors for criticality of natural capital. *Ecological Economics* **44**:187-204.
- de Groot, R. S. 1990. Economic valuation techniques for the environment: A case study workbook : John A. Dixon and Maynard M. Hufschmidt (Editors). The Johns Hopkins University Press, Baltimore, MD, U.S.A, 1986. 203 pp. ISBN 0-8018-3308-6. *Ecological Economics* **2**:353-356.
- de Groot, R. S., M. A. Wilson, y R. M. J. Boumans. 2002. A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics* **41**:393-408.
- DETENAL. 1976. Carta Geológica E14A12, Coeneo de la Libertad. *in*. DETENAL (Dirección de Estudios del Territorio Nacional, México, D.F.
- DETENAL. 1978. Carta Geológica E14A13, Cuitzeo. *in*. DETENAL (Dirección Nacional de Estudios del Territorio Nacional), México, D.F.

- DETENAL. 1979a. Carta Edafológica E14A13, Cuitzeo. *in*. DETENAL (Dirección de Estudios del Territorio Nacional), Dirección Nacional de Geografía, México, D.F.
- DETENAL. 1979b. Carta Edafológica E14A14, Zinapécuaro. *in*. DETENAL (Dirección de Estudios del Territorio Nacional), Dirección Nacional de Geografía, México, D.F.
- DETENAL. 1979c. Carta Edafológica E14A22, Pátzcuaro. *in*. DETENAL (Dirección de Estudios del Territorio Nacional), Dirección Nacional de Geografía, México, D.F.
- DETENAL. 1979d. Carta Edafológica E14A24, Tzitzio. *in*. DETENAL (Dirección de Estudios del Territorio Nacional), Dirección Nacional de Geografía, México, D.F.
- DETENAL. 1979e. Carta Edafológica E14A32, Villa Escalante. *in*. DETENAL (Dirección de Estudios del Territorio Nacional), Dirección Nacional de Geografía, México, D.F.
- DETENAL. 1983. Carta Edafológica E14A15, Maraatio. *in*. DETENAL (Dirección de Estudios del Territorio Nacional), Dirección Nacional de Geografía, México, D.F.
- DiCarlo, D. A., T. W. J. Bauters, C. J. G. Darnault, T. S. Steenhuis, y J. Y. Parlange. 1999. Lateral expansion of preferential flow paths in sands. *Water Resources Research* **35**:427-434.
- DOF. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000, Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Pages 1-75 *in* Diario Oficial de la Federación.
- Duchaufour, P. 1975. Manual de Edafología. Toray-Masson, Barcelona, España.
- Duhour, A., C. Costa, F. Momo, y L. Falco. 2004. Estructura fractal de suelo bajo distintos sistemas de manejo. *CI. SUELO (ARGENTINA)* **22**:36-39.
- Eisenhauer, N., S. Partsch, D. Parkinson, y S. Scheu. 2007. Invasion of a deciduous forest by earthworms: Changes in soil chemistry, microflora, microarthropods and vegetation. *Soil Biology and Biochemistry* **39**:1099-1110.
- Elrick, D. E., y W. D. Reynolds. 1992. Infiltration from Constant-Head Well Permeameters and Infiltrimeters. Pages 1-24 *in* G. C. Topp, W. D. Reynolds, and R. E. Green, editors. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*. Soil Science Society of America, Inc.
- Elsenbeer, H. 2001. Pedotransfer functions in hydrology. *Journal of Hydrology* **251**:121-122.
- EPA. 1988a. Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Application of Selected Mathematical Models.
- EPA. 1988b. Estimation of Infiltration Rate in the Vadose Zone: Compilation of Simple Mathematical Models. EPA.
- Esteves, M., L. Descroix, N. Mathys, y J. Marc Lapetite. 2005. Soil hydraulic properties in a marly gully catchment (Draix, France). *CATENA* **63**:282-298.
- FAO. 1999. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia.
- Ferrer, J. M., T. Estrela Monreal, A. Sanchez del Corral Jimenez, y E. Garcia Melendez. 2004. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma* **123**:257-277.
- Fortin, S. 2003. Permeability Testing in Unconsolidated Materials. Robertson GeoConsultants. Inc.
- Frouz, J., D. Elhottova, V. Pizl, K. Tajovsky, M. Sourkova, T. Picek, y S. Maly. 2007a. The effect of litter quality and soil faunal composition on organic matter dynamics in post-mining soil: A laboratory study. *Applied Soil Ecology* **37**:72-80.
- Frouz, J., V. Pizl, y K. Tajovsky. 2007b. The effect of earthworms and other saprophagous macrofauna on soil microstructure in reclaimed and un-reclaimed post-mining sites in Central Europe. *European Journal of Soil Biology* **43**:S184-S189.
- Fuentes, J. P., M. Flury, y D. F. Bezdicek. 2004. Hydraulic Properties in a Silt Loam Soil under Natural Prairie, Conventional Till, and No-Till. *Soil Sci Soc Am J* **68**:1679-1688.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, 5 edition. Insitito de Geografía UNAM, México, D.F.
- Garduño Monroy, V. H. 1999a. El vulcanismo del mioceno-pliocuaternario de Michoacán. Pages 27-44 *in* Carta geológica de Michoacán, escala 1:250,000. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.

- Garduño Monroy, V. H. 1999b. Marco tectónico del estado de Michoacan. Pages 1-9 *in* P. Corona-Chávez and I. Israde Alcántara, editors. Carta Geológica del Estado de Michoacán, escala, 1:250,000. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Gregory, P. J. 2006. Roots, rhizosphere and soil: the route to a better understanding of soil science? *European Journal of Soil Science* **57**:2-12.
- Harden, C. P., y P. D. Scruggs. 2003. Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology* **55**:5-24.
- INEGI. 1978a. Carta Geológica E14A14, Zinapécuaro. *in*. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. 1978b. Carta Geológica E14A15, Maravatío. *in*. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. 1978c. Carta Geológica E14A22, Pátzcuaro. *in*. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. 1978d. Carta Geológica E14A23, Morelia. *in*. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. 1978e. Carta Geológica E14A24, Tzitzio. *in*. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. 1978f. Carta Geológica E14A32, Villa Escalante. *in*. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. 1979a. Carta Edafológica E14A23, Morelia. *in*. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. 1979b. Carta Geológica E14A33, Villa Madero. *in*. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. 1982a. Carta Edafológica E14A12, Coeneo de la Libertad. *in*. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags., México.
- INEGI. 1982b. Carta Edafológica E14A33, Villa Madero. *in*. INEGI, Dirección General de Geografía, Aguascalientes, Ags. México.
- Israde Alcántara, I., V. H. Garduño Monroy, y R. Ortega-Murillo. 2002. Paleoambiente lacustre del Cuaternario tardío en el centro del lago de Cuitzeo. *Hidrobiológica* **12**:61-78.
- Israde-Alcántara, I., y V. H. Garduño Monroy. 2004. La geología de la región de Morelia. Pages 1-13 *in* V. H. Garduño Monroy, editor. Contribuciones a la geología e impacto ambiental de Morelia. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Johnson, D. O., F. J. Arriaga, y B. Lowery. 2005. Automation of a falling head permeameter for rapid determination of hydraulic conductivity of multiple samples. *Soil Sci Soc Am J* **69**:828-833.
- Johnson-Maynard, J. L., R. C. Graham, L. Wu, y P. J. Shouse. 2002. Modification of soil structural and hydraulic properties after 50 years of imposed chaparral and pine vegetation. *Geoderma* **110**:227-240.
- Lai, J., y L. Ren. 2007. Assessing the Size Dependency of Measured Hydraulic Conductivity Using Double-Ring Infiltrimeters and Numerical Simulation;. *Soil Sci Soc Am J* **71**:1667-1675.
- Lara, A., y C. Echeverría. 2006. Conclusiones del Congreso Internacional de los Servicios Ecosistémicos en los Neotrópicos: Estado del arte y desafíos futuros. *Bosque* **28**:10-12.
- LASCAR-Inc. 2007. EI-USB-3, Datasheet. Pages 3 *in*. LASCAR Electronics, Inc.
- Lassen, L., y H. Lull. 1951. Infiltration and the use of the infiltrometer. Pages 310-315 *in* Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Assemblée générale de Bruxelles. Association Internationale d'Hydrologie Scientifique, Bruxelles.
- Li, Y. Y., y M. A. Shao. 2006. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *Journal of Arid Environments* **64**:77-96.
- Lin, H. 2004. Hydrogeology: A sister discipline of hydrogeology. Pages 103 *in* Geological Society of America. Geological Society of America, 7-10 November, Denver, Colorado, USA.

- Lin, H., J. Bouma, Y. Pachepsky, A. W. Western, J. Thompson, M. T. van Genuchten, H.-J. Vogel, y A. Lilly. 2004. *Hydropedology: Sinergistic Integration of Pedology an Hydrology*. Pages 63 *in*.
- Lin, H. S., K. J. McInnes, L. P. Wilding, y C. T. Hallmark. 1999. Effects of Soil Morphology on Hydraulic Properties: II. Hydraulic Pedotransfer Functions. *Soil Sci Soc Am J* **63**:955-961.
- Logsdon, S. D., y D. B. Jaynes. 1996. Spatial variability of hydraulic conductivity in a cultivated field at different times. *Soil Sci Soc Am J* **60**:703-709.
- Lopez, E., G. Bocco, M. Mendoza, A. Velazquez, y J. Rogelio Aguirre-Rivera. 2006. Peasant emigration and land-use change at the watershed level: A GIS-based approach in Central Mexico. *Agricultural Systems* **90**:62-78.
- Lyford, F. P. Q., H.K. 1969. Infiltration rates as affected by desert vegetation. *Water Resources Research* **5**:1373-1376.
- Maderey, L. E., y R. Jiménez. 2005. *Principios de hidrogeografía, estudio del ciclo hidrológico*, 1 edition. Instituto de Geografía, UNAM, México, D.F.
- Mallants, D., B. P. Mohanty, A. Vervoort, y J. Feyen. 1997. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technology* **10**:115-131.
- Matula, S. 2003. The influence of tillage treatments on water infiltration into soil profile. *Plant Soil and Environment* **49**:298-306.
- Mboukou-Kimbatsa, I., F. Bernhard-Reversat, J.-J. Loumeto, J. Ngao, y P. Lavelle. 2007. Understory vegetation, soil structure and soil invertebrates in Congolese eucalypt plantations, with special reference to the invasive plant *Chromolaena odorata* and earthworm populations. *European Journal of Soil Biology* **43**:48-56.
- McIntyre, D. S., y C. B. Tanner. 1959. Anormally distributed soil physical measurements and nonparametric statistics. *Soil Science* **88**:133-137.
- McKenzie, N. J., H. P. Cresswell, H. Rath, y D. Jacquier. 2001. Measurement of unsaturated hydraulic conductivity using tension and drip infiltrometers. *Australian Journal of Soil Research* **39**:823-836.
- Mendoza, M. E. 2002. Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la cuenca del lago d Cuitzeo. Doctor en Ciencias de la Tierra (Geología Ambiental). Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Mendoza, M. E., G. Bocco, E. López, y M. Bravo. 2002. Implicaciones hidrológicas del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo: una propuesta de análisis espacial a nivel regional en la cuenca cerrada del Lago de Cuitzeo, Michoacán. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía* **49**:98-117.
- Mertens, J., D. Jacques, J. Vanderborght, y J. Feyen. 2002. Characterization of the field-saturated hydraulic conductivity on a hillslope: in situ single ring pressure infiltrometer measurements. *Journal of Hydrology* **263**:217-229.
- Miller, R. W., y R. L. Donahue. 1990. *Soils, An introduction to Soils and Plant Growth*, 6 edition. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.
- Mills, A. J., y M. V. Fey. 2004. Effects of vegetation cover on the tendency of soil to crust in South Africa. *Soil Use and Management* **20**:308-317.
- Mohanty, B. P., R. S. Bowman, J. M. H. Hendrickx, y M. T. v. Genuchten. 1997. New piecewise-continuous hydraulic functions for modeling preferential flow in an intermittent flood-irrigated field. *Water Resourources Research* **33**:2049-2063.
- Mohanty, B. P., T. H. Skaggs, y M. T. v. Genuchten. 1988. Impact of saturated hydraulic conductivity on the prediction of tile flow. *Soil Sci Soc Am J* **62**.
- Motorola, I. 2002. MPX2010, MPXV2010G Series. Pages 12 *in*. Motorola, Inc., Motorola Freescale Semiconductor, Inc., Semiconductor Technical Data.
- Mwendera, E. J., y M. A. M. Saleem. 1997. Infiltration rates, surface runoff, and soil loss as influenced by grazing pressure in the Ethiopian highlands. *Soil Use and Management* **13**:29-35.
- Naranjo, J., y E. Murgueitio. 2006. Propuesta de PSA hídrico en el municipio de Marinilla, Antioquía. *in* Congreso Internacional Servicios Ecosistémicos en los Neotrópicos. Bosque, 13-19 Nov. Valdivia, Chile.

- Nearing, M. A., B. Y. Liu, L. M. Risse, y X. Zhang. 1996. Curve numbers and Green-Ampt effective hydraulic conductivities. *Journal of the American Water Resources Association* **32**:125-136.
- Osuna-Ceja, E. S., y J. S. Padilla-Ramírez. 1998. Estimación de la sorbilidad e infiltración usando datos de simulación de lluvia para tres tipos de suelos de la zona semiárida de México. *Terra Latinoamericana* **16**:293-302.
- Oyarzun, C. E., L. Nahuelhual, y D. Nuñez. 2005. Los servicios ecosistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Revista de Ambiente y Desarrollo de CIMPA* **XX**:88-95.
- Pachepsky, Y., E. Perfect, y M. A. Martin. 2006a. Fractal geometry applied to soil and related hierarchical systems. *Geoderma* **134**:237-239.
- Pachepsky, Y., y W. J. Rawls. 2003. Soil structure and pedotransfer functions. *European Journal of Soil Science* **54**:443-451.
- Pachepsky, Y., W. J. Rawls, y H. S. Lin. 2006b. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma* **131**:308-316.
- Pachepsky, Y., V. Yakovchenko, M. C. Rabenhorst, C. Pooley, y L. J. Sikora. 1996. Fractal parameters of pore surfaces as derived from micromorphological data: effect of long-term management practices. *Geoderma* **74**:305-319.
- Pannatier, Y. 1996. VARIOWIN: Software for Spatial Data Analysis in 2D. Springer-Verlag, New York, USA.
- Pasquaré, G., L. Ferrari, V. H. Garduño, A. Bibaldi, y L. Vezzoli. 1991. Geologic map of central sector of Mexican Volcanic Belt, State of Guanajuato and Michoacan, México. *in* Geological Society of America.
- Paz-González, A., A. I. Thonon, F. C. Bertolani, M. M. Taboada-Castro, E. Vidal-Vázquez, y J. D. Dafonte. 2001. Variabilidad espacial de la infiltración en una ladera determinada con permeámetro de Guelph e infiltrómetro de tensión. *in* R. J. J. López and S. M. Quemada, editors. *Temas de Investigación en la Zona no Saturada*. Universidad Pública de Navarra, Pamplona, España.
- Perevochtchikova, M., J. J. Carrillo-Rivera, C. Muños-Piña, y L. A. Peñuela-Arévalo. 2005. Servicios Ambientales Hidrológicos en México 2003/2004: Visión Geográfica. *in* Encuentro por una nueva cultura del agua en América Latina, Fortaleza, Ceará, Brasil.
- Phillips, J. D. 1993. Stability implications of the state factor model of soils as a nonlinear dynamical system. *Geoderma* **58**:1-15.
- Pilgrim, D. H., T. G. Chapman, y D. G. Doran. 1988. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques* **33**:379-400.
- Pitkanen, J., y V. Nuutinen. 1998. Earthworm contribution to infiltration and surface runoff after 15 years of different soil management. *Applied Soil Ecology* **9**:411-415.
- Špongrová, K. 2006. Design of an automated tension infiltrometer for unsaturated hydraulic conductivity measurement. M.Sc. by Research. Cranfield University.
- Porta, J., M. López-Acevedo, y C. Roquero. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*, 2 edition. Mundi-Prensa, Bilbao, España.
- Poulenard, J., P. Podwojewski, J.-L. Janeau, y J. Collinet. 2001. Runoff and soil erosion under rainfall simulation of Andisols from the Ecuadorian Paramo: effect of tillage and burning. *CATENA* **45**:185-207.
- Priksat, M. A., M. D. Ankeny, y T. C. Kaspar. 1992. Design for an automated, selfregulating, single-ring infiltrometer. *Soil Sci Soc Am J* **56**:1409-1411.
- Ragab, R., y J. D. Cooper. 1993. Variability of unsaturated zone water transport parameters: implications for hydrological modelling. 2. Predicted vs. in situ measurements and evaluation of methods. *Journal of Hydrology* **148**:133-147.
- Ranade, D. H., y R. K. Gupta. 1987. Salt effect on hydraulic conductivity of a vertisol. *CATENA* **14**:45-53.
- Raty, M., y V. Huhta. 2004. Earthworm communities in birch stands with different origin in central Finland. *Pedobiologia* **48**:283-291.

- Rawls, W. J., L. R. Ahuja, D. Brakensiek, y A. Shirmohammadi. 1993. Infiltration and soil movement. Pages 5.1-5.51 *in* D. R. Maidment, editor. Handbook of hydrology. McGraw Hill.
- Reynolds, W. D., B. T. Bowman, R. R. Brunke, C. F. Drury, y C. S. Tan. 2000. Comparison of Tension Infiltrometer, Pressure Infiltrometer, and Soil Core Estimates of Saturated Hydraulic Conductivity. *Soil Sci Soc Am J* **64**:478-484.
- Reynolds, W. D., y D. Elrick. 1991. Determination of Hydraulic Conductivity Using a Tension Infiltrometer. *Soil Sci Soc Am J* **55**:633-639.
- Rieu, M., y G. Sposito. 1991. Fractal fragmentation, soil porosity, and soil water properties: I. Theory. *Soil Sci Soc Am J* **55**:1231-1238.
- Rogowski, A. S. 1972. Water physics: Soil variability criteria. *Water Resources Research* **8**:1015-1023.
- Romano, N. 2004. Spatial structure of PTF estimates Developments in Soil Science. Pages 295-319 *in* a. W. J. R. Y. Pachepsky, editor. Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology. Elsevier.
- Russo, D., y E. Bresler. 1981. Soil hydraulic properties as stochastic processes: I. An analysis of field spatial variability. *Soil Sci Soc Am J* **45**:682-687.
- Ryan, P. J., N. J. McKenzie, D. O'Connell, A. N. Loughhead, P. M. Leppert, D. Jacquier, y L. Ashton. 2000. Integrating forest soils information across scales: spatial prediction of soil properties under Australian forests. *Forest Ecology and Management* **138**:139-157.
- Salako, F. K., y G. Kirchhof. 2003. Field hydraulic properties of an Alfisol under various fallow systems in southwestern Nigeria. *Soil Use and Management* **19**:340-346.
- Sánchez-Andrés, R., S. Sánchez-Carrillo, A. Sánchez-López, M. Benítez-Gilbert, y L. C. A. 2002. Efectos del manejo del suelo en la infiltración en una aforestación con *Quercus ilex* L. en un área semiárida de agricultura de temporal. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* **1**:3-19.
- Saxton, K. E., W. Rawls, J. S. Romberger, y R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci Soc Am J* **50**:1031-1036.
- Sedov, S., E. Solleiro-Rebolledo, P. Morales-Puente, A. Arias-Herreira, E. Vallejo-Gomez, y C. Jasso-Castaneda. 2003a. Mineral and organic components of the buried paleosols of the Nevado de Toluca, Central Mexico as indicators of paleoenvironments and soil evolution. *Quaternary International; Paleopedology: V International Symposium and Field workshop, Suzdal, Russia* **106-107**:169-184.
- Sedov, S. N., E. Solleiro-Rebolledo, y J. E. Gama-Castro. 2003b. Andosol to Luvisol evolution in Central Mexico: timing, mechanisms and environmental setting. *CATENA; Achievements in Micromorphology* **54**:495-513.
- SERINE, S. C. 2006. Programa de Manejo del Área Natural Protegida Reserva Patrimonial "Volcán el Jorullo" La Huacana Michoacán. SUMA-H. Ayuntamiento de La Huacana, Morelia, Michoacán.
- Servenay, A., y C. Prat. 2003. Erosion extension of indurated volcanic soils of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis. *Geoderma; Volcanic soils: properties and processes as a function of soil genesis and land use* **117**:367-375.
- Seybold, C. A., y J. E. Herrick. 2001. Aggregate stability kit for soil quality assessments. *CATENA* **44**:37-45.
- Shainberg, I., y G. J. Levy. 1992. Physico-Chemical effects of salts upon infiltration and water movement in soil. Pages 37-94 *in* R. J. Wagenet, P. Baveye, and B. A. Stewart, editors. *Interacting Processes in Soil Science*. Lewis Publishers.
- Shakir, S. H., y D. L. Dindal. 1997. Density and biomass of earthworms in forest and herbaceous microecosystems in central New York, North America. *Soil Biology and Biochemistry* **29**:275-285.
- Shaver, T. M., G. A. Peterson, L. R. Ahuja, D. G. Westfall, L. A. Sherrod, y G. Dunn. 2002. Surface Soil Physical Properties After Twelve Years of Dryland No-Till Management. *Soil Sci Soc Am J* **66**:1296-1303.
- Shouse, P. J., y B. P. Mohanty. 1988. Scaling of near-saturated hydraulic conductivity measured using disc infiltrimeters. *Water Resources Research* **34**:1195-1205.

- Siebe, C., R. Janh, y K. Stahr. 1996. Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Chapingo, México.
- Silva-Mora, L. 1995. Carta Geológica de México, Hoja Morelia 14Q-g(2). *in*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, México, D.F.
- Singleton, P. L., M. Boyes, y B. Addison. 2000. Effect of treading by dairy cattle on topsoil physical conditions for six contrasting soil types in Waikato and Northland, New Zealand, with implications for monitoring. *New Zealand Journal of Agricultural Research* **43**:559-567.
- Sobieraj, J. A. 2003. Spatial patterns of saturated hydraulic conductivity and its controlling factors for forested soilscapes. Doctor of Philosophy, Environmental Science. University of Cincinnati.
- Sobieraj, J. A., H. Elsenbeer, y G. Cameron. 2004. Scale dependency in spatial patterns of saturated hydraulic conductivity. *CATENA* **55**:49-77.
- Sobieraj, J. A., H. Elsenbeer, y R. A. Vertessy. 2001. Pedotransfer functions for estimating saturated hydraulic conductivity: implications for modeling storm flow generation. *Journal of Hydrology* **251**:202-220.
- Soil Conservation Service, S. 1954. Hydrology Guide for use in watershed planning. USDA.
- Soil-Moisture-Equipment-Corp. 1991. 2800KI Guelph Permeameter, operating instructions. Soil Moisture Equipment Corp.
- Soil-Survey-Staff. 1951. Soil Survey Manual. United States Department of Agriculture, Washington, D.C., USA.
- StatSoft, I. 1988. STATISTICA for Windows [Computer program manual]. *in*. StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA.
- StatSoft_Inc. 1998. STATISTICA for Windows [Computer program manual]. *in*. StatSoft, Inc., Tulsa, OK, USA.
- Tietje, O., y V. Hennings. 1996. Accuracy of the saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma* **69**:71-84.
- Tricker, A. S. 1978. The infiltration cylinder: Some comments on its use. *Journal of Hydrology* **36**:383-391.
- Tsukamoto, J., y J. Sabang. 2005. Soil macro-fauna in an Acacia mangium plantation in comparison to that in a primary mixed dipterocarp forest in the lowlands of Sarawak, Malaysia. *Pedobiologia* **49**:69-80.
- Vervoort, R. W., y S. R. Cattle. 2003. Linking hydraulic conductivity and tortuosity parameters to pore space geometry and pore-size distribution. *Journal of Hydrology* **272**:36-49.
- Walker, G. R., y L. Zhang. 2002. *Studies in Catchment Hydrology: The Basics of Recharge and Discharge*. CSIRO Publishing.
- Wang, D., B. Lowery, J. M. Norman, y K. McSweeney. 1996. Ant burrow effects on water flow and soil hydraulic properties of Sparta sand. *Soil and Tillage Research* **37**:83-93.
- Wang, D., S. R. Yates, B. Lowery, y M. T. van Genuchten. 1998. Estimating soil hydraulic properties using tension infiltrometers with varying disk diameters. *Soil Science* **163**.
- Watteau, F., G. Villemin, G. Burtin, y L. Jocteur-Monrozier. 2006. Root impact on the stability and types of microaggregates in silty soil under maize. *European Journal of Soil Science* **57**:247-257.
- Webster, R. 2000. Is soil variation random? *Geoderma* **97**:149-163.
- Webster, R., y M. A. Oliver. 2001. *Geostatistics for Environmental Scientists*. John Wiley & Sons, Ltd., Chichester, England.
- Wit, A. M. W. 2001. Runoff controlling factors in various sized catchments in a semi-arid Mediterranean environment in Spain. Ph. D. Thesis. Universiteit Utrecht, Utrecht, The Netherlands.
- Wu, L., y L. Pan. 1997. A Generalized Solution to Infiltration from Single-Ring Infiltrimeters by Scaling. *Soil Sci Soc Am J* **61**:1318-1322.
- Wu, L., L. Pan, J. Mitchell, y B. Sanden. 1999. Measuring Saturated Hydraulic Conductivity using a Generalized Solution for Single-Ring Infiltrimeters. *Soil Sci Soc Am J* **63**:788-792.
- Wu, L., L. Pan, M. Robertson, y P. Shouse. 1997. Numerical evaluation of ring infiltrimeters under various soil conditions. *Soil Science* **162**:771-777.

- Zaitlin, B., M. Hayashi, y J. Clapperton. 2007. Distribution of northern pocket gopher burrows, and effects on earthworms and infiltration in a prairie landscape in Alberta, Canada. *Applied Soil Ecology* **37**:88-94.
- Zelege, T. B., y B. C. Si. 2005. Scaling Relationships between Saturated Hydraulic Conductivity and Soil Physical Properties. *Soil Sci Soc Am J* **69**:1691-1702.
- Zhang, B., y R. Horn. 2001. Mechanisms of aggregate stabilization in Ultisols from subtropical China. *Geoderma* **99**:123-145.
- Ziegler, A. D., J. N. Negishi, R. C. Sidle, S. Noguchi, y A. R. Nik. 2006. Impacts of logging disturbance on hillslope saturated hydraulic conductivity in a tropical forest in Peninsular Malaysia. *CATENA* **67**:89-104.

ANEXO 1. ELABORACIÓN DE CARTOGRAFÍA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN A PARTIR DE ORTOFOTOMOSAICOS DIGITALES DE ESCALA DETALLADA.

Alberto Gómez-Tagle Ch.¹.

¹Lab. Suelos, Dpto. Ciencias de la Tierra, INIRENA, UMSNH-SERINE S.C.,

alberto.gomeztagle@gmail.com

Tel:+52 (443) 3-27-2350, Fax:+52 (443)3-27-2351.

RESUMEN

Se elaboró un mapa de uso del suelo y vegetación en escala detallada (1:5,500) para un área de 2.8 km² del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán en el centro de México. Se utilizaron aerofotografías digitales de pequeño formato ortocorregidas y un mosaico de las ortofotografías con resolución de 0.4 m, para definir la expresión espacial de 13 categorías. Los polígonos definidos abarcaron superficies entre 4.15 y 979,502 m². El uso del suelo con mayor extensión fue el bosque cerrado (cobertura >70%) con 184.13 ha (65.18%), seguido de los agostaderos con 32.17 ha (11.38%) y el bosque abierto con 19.24 ha (6.814%). La agricultura abarcó solamente 7.66 ha (2.71%) del área mientras que las cárcavas abarcaron 2.78 ha (0.98%). El procesamiento digital de las imágenes utilizando filtros permitió definir los límites de las copas de los árboles y los arbustos y con ello estimar el tamaño promedio de las copas y la densidad del arbolado. Concluimos que estos insumos y herramientas en extremo útiles para generar cartografía de uso del suelo y vegetación en escala detallada, pero pueden aplicarse a diferentes áreas como la ecología de poblaciones, comunidades o dasonomía y programas forestales.

Palabras Clave: Cobertura del suelo, Cuenca de Cuitzeo, centro de México, dasonomía.

INTRODUCCION

La información sobre la cubierta del suelo y los usos de este es fundamental para las disciplinas científicas que estudian el paisaje o alguno de sus elementos (Ramírez, 2001). Esta información suele representarse empleando medios cartográficos.

En este contexto, un mapa de vegetación y uso del suelo es un documento cartográfico que representa la cubierta de la superficie de la tierra (superficie topográfica) y su uso aparente. Estos materiales son insumos base para distintas aplicaciones en recursos naturales y medio ambiente, ya que se muestra la distribución espacial de la vegetación natural e inducida, así como la localización de las áreas dedicadas a las actividades económicas del sector primario (agrícola, pecuario y forestal). Y en ocasiones pude incluir información puntual sobre especies botánicas representativas de la cubierta

vegetal. Sabaté (1986) menciona que las fuentes con mejores resultados para este tipo de cartas “temáticas” son las fotografías aéreas, aunque el desarrollo de tecnologías satelitales y nuevos sensores han permitido un uso eficiente de las imágenes de satélite, por ejemplo (López-Blanco et al., 1996; Mas et al., 2002; López-García, 2007).

Diversos autores hacen referencia a la relación existente entre la cobertura vegetal y la infiltración, se sabe que en ambientes emiáridos las tasas de infiltración incrementan bajo áreas con vegetación en relación a áreas desprovistas plantas. Esto se atribuye a la diferencia en materia orgánica, la microtopografía, la densidad aparente y la estabilidad de agregados, así como la resistencia a la penetración debajo de de las plantas (Bochet, 1996 en (Wit, 2001). Varios autores han realizado estudios con este enfoque.

Pilgrim et al. (1988) mencionan que la cobertura vegetal es muy importante para la infiltración, especialmente en ambientes áridos y semiáridos. Cerdà (1997b; 1997a) trabajando en matorrales semiáridos del sureste de España, encontró un efecto diferencial entre la áreas desnudas y las áreas vegetadas en escalas finas (1-3 m), además de un efecto estacional en la infiltración. Lyford y Qashu (1969) obtuvieron tasas de infiltración tres veces mayores en sitios con vegetación que en sitios entre los manchones de vegetación, otras investigaciones indican una relación entre la cantidad de manitllo y un incremento local en producción de biomasa y mayores tasas de infiltración en escalas pequeñas (Cerdà, 1997a; Bergkamp et al., 1999; Cerdà, 1999).

El contar con información detallada y fidedigna sobre el uso del suelo y la vegetación es importante para entender los patrones de variación de la infiltración y las propiedades que la controlan. El objetivo de este tabajo fue generar una capa temática de vegetación y uso del suelo para un área pequeña de aproximadamente 2.80 km² en la porción sur de la Cuenca de Cuitzeo, con el fin de dirigir los esfuerzos de muestreo de infiltración, para posteriormente poder escalar la información y base, de punto a polígono.

En este trabajo se presenta la construcción y descripción del mapa de uso del suelo y vegetación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Legros (2006), menciona sobre los mapas edáficos, que son documetos cartográficos presentado en papel o algún otro medio que proporciona una imagen reducida y simplificada de la organización espacial de la variación de los suelos en un ambiente natural. Este enfoque es también valido para la cartografía de uso del suelo y vegetación, como un componente temático de la cartografía.

Para la generación del mapa temático de uso del suelo y vegetación se utilizó una aproximación cloreplética, en donde se definen límites espaciales abruptos mediante líneas que dividen las clases o categorías representadas por polígonos.

La estructuración de las unidades desde el punto de vista conceptual se baso en el enfoque jerárquico desarrollado por (Palacio-Prieto et al., 2000) para el Inventario Forestal Nacional 2000, y se partió de la leyenda jerárquica propuesta para ese trabajo utilizandose el nivel jerárquico mas bajo *Comunidad y Otras Coberturas* como base, así como elementos de la leyenda propuesta por López-García (2007).

Se emplearon fotografías aéreas con escala aproximada 1:5,500 de la zona Atécuaro-Santiago Undameo, obtenidas mediante vuelo aerofotográfico con cámara digital el 17 de junio de 2005. Se trabajaron 5 imágenes con cobertura aproximada de 1.1 km² cada una. La Tabla 1 muestra la relación de las imágenes así como las posiciones de los centros de adquisición de estas definidas por aerotriangulación.

Tabla 1. Relación de las imágenes utilizadas y coordenadas de adquisición de las mismas obtenidas por aerotriangulación.

| Imagen (archivo) | X UTM | Y UTM | Z msnm |
|------------------------|------------|------------|----------|
| Fto2005-06-17 14.15.28 | 264611.118 | 2162286.21 | 3442.029 |
| Fto2005-06-17 14.15.22 | 264934.987 | 2162538.49 | 3457.275 |
| Fto2005-06-17 14.15.11 | 265152.777 | 2162638.11 | 3464.004 |
| Fto2005-06-17 14.15.06 | 265404.983 | 2162835.47 | 3464.892 |
| Fto2005-06-17 14.15.01 | 265709.745 | 2163001.78 | 3455.567 |

Las imágenes fueron impresas en papel de alto contraste en tamaño 21 x 28 cm (tamaño carta). La delimitación de las unidades se efectuó utilizando las impresiones de alto contraste y un estereoscopio de espejos F-71 (Alan Gordon Enterprises, Inc.) Se utilizaron los criterios de color, tono, textura homogeneidad y contexto propuestos por Moncayo et al. (1970) y Ávila (1982).

Utilizando materiales transparentes sobrepuestos a las fotografías (acetatos) se trazaron los límites de las unidades, y se generó una leyenda provisional. Posteriormente los límites fueron transferidos a formato digital utilizando el programa Cartalinx V 1.2, utilizando como imágenes de fondo las ortofotografías individuales o el ortofotomosaico empleando en la transferencia el apoyo de estereoscopia y las impresiones de alto contraste.

La verificación de campo se realizó en dos etapas, la primera tuvo lugar antes de la corrección del material aerofotográfico, durante la adquisición de los puntos de control de campo empleando GPS. La segunda etapa fue para corroborar los límites entre unidades y las clases asignadas. Debido al tamaño del área cubierta por las imágenes (aproximadamente 2.8 km²), se verificó el 100% de los polígonos mayores a 200 m² (98 polígonos) y cerca del 20% de los menores a 200 m². En las dos etapas se emplearon los materiales impresos y se realizaron observaciones directas además de registrarse las especies más conspicuas para cada estrato.

Ajuste de imágenes y conteo

Dentro de la estructura jerárquica del sistema conceptual que emplearon (Palacio-Prieto et al., 2000) en el Inventario Forestal Nacional 2000, se incluye en su nivel más detallado a los rodales. Estos son áreas donde la densidad, altura y cobertura del arbolado presentan cierta homogeneidad (Gómez-Tagle, 2004).

Para calcular las densidades en las diferentes unidades, así como estimar el porcentaje de cobertura se realizó un análisis que consiste en dos pasos. El primero es descomponer en tres bandas las ortofotografías y el ortofotomosaico y someterlos a un conjunto de filtros que permitan definir los límites entre las copas de los árboles. El segundo consiste en

realizar un muestreo en las imágenes, contando el número de individuos presentes en una superficie determinada, se utilizaron cuadrados de 25x25 m, 50x50 m ó 100x100m dependiendo de las dimensiones del polígono a tratarse y así realizar una estimación de densidad tamaño de los árboles y cobertura. Se asume que un individuo arbóreo o arbustivo tiene solamente una copa mas o menos definida y que los límites generados por el filtrado permiten individualizarla.

Las ortofotografías y ortofotomosaico fueron importados al SIG Idrisi V.14, donde las imágenes fueron descompuestas en tres bandas correspondientes a los elementos de la imagen rojo, verde y azul ó imagen RGB por sus siglas en inglés.

Se realizaron sobreposiciones, transparentaciones y composiciones cromáticas con el fin de facilitar la visualización de los límites de las copas de los árboles y facilitar su conteo y medición.

La información de los conteos y densidades se asignó a los polígonos de las unidades y se calculó la superficie para cada uno de ellos

AREA DE ESTUDIO

El área comprendida en este trabajo se encuentra situada al sur de Morelia, Michoacán, dentro de la cuenca del Lago de Cuitzeo, subcuenca Cointzio. Las coordenadas centrales del área son; 101°14'24" W, 19°33'00" N

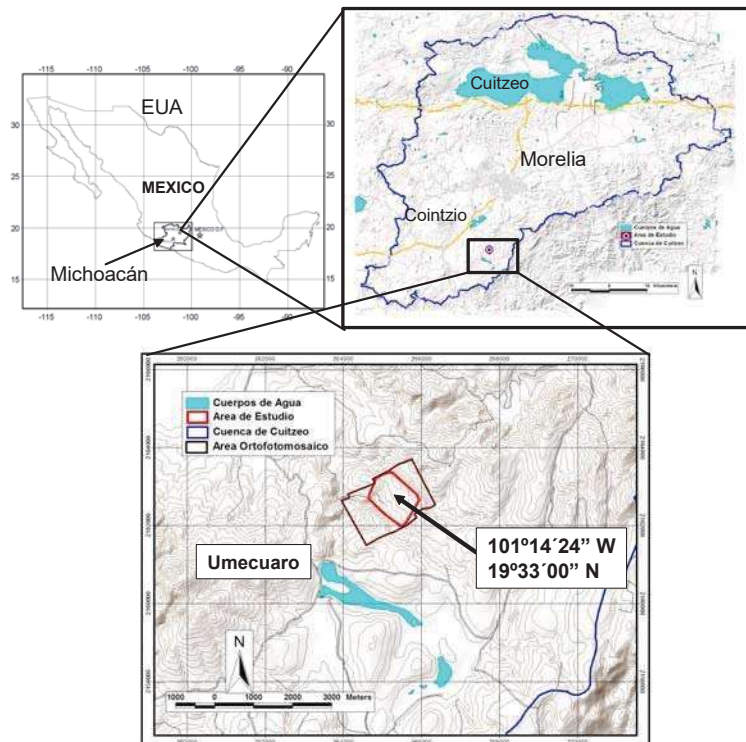


Figura 1. Ubicación del área de la zona de trabajo, con la poligonal del área cubierta por el ortofotomosaico digital.

En cuanto al clima es de tipo templado subhúmedo con lluvias en verano (García, 2004) con temperatura promedio anual de 16.7° C y precipitación promedio anual es de 849.3 mm.

Se trabajó con toda la superficie del ortofotomosaico con una superficie de 2.82 km² (282 ha).

El área se escogió debido a que es representativa de la cuenca, un ambiente de relieve volcánico con suelos derivados de cenizas volcánicas, y con cobertura vegetal diversa, además de la disposición de los propietarios de los terrenos para permitir realizar actividades de investigación.

RESULTADOS

Se fotointerpretaron y procesaron cinco imágenes. El procesamiento de imágenes para evidenciar límites mas eficiente consistió en aplicar un filtro Sobel de detección de límites a la banda azul de la imagen RGB original descompuesta en tres bandas separadas (*Sobel edge detector*, de Idrisi V14 (Kilimanjaro) (Clark-Labs, 2003) y reescalarlo con formato byte (0-255). El archivo resultante se empleó como banda roja en un nuevo compuesto RGB, donde las bandas verde y azul son las bandas originales correspondientes. El resultado es una imagen de falso color, donde los límites de las copas de los árboles se presentan en colores rojizos (Figura 2). En esta figura puede apreciarse el ortofotomosaico original en formato RGB (Figura 2A), la banda azul descompuesta y sometida a filtrado Sobel (Figura 2B), una visualización de fusión entre el ortofotomosaico original y una transparentación (50%) de la banda azul filtrada (Figura 2C) y el compuesto RGB en falso color con los límites extraídos de la banda azul ahora de color rojo delimitando las copas de los árboles. Si bien la visualización de fusión permite una mejor visualización de los límites y ubicación de las copas de los árboles, al ser transferido para su procesamiento (conteo de individuos y medición de copas), se hace necesario ajustar continuamente los controles de contraste de imagen. Esto se evita empleando el compuesto de falso color con límites de las copas en color rojo (Figura 2D), donde se facilita el conteo de copas (individuos) así como la medición de los diámetros de estas.

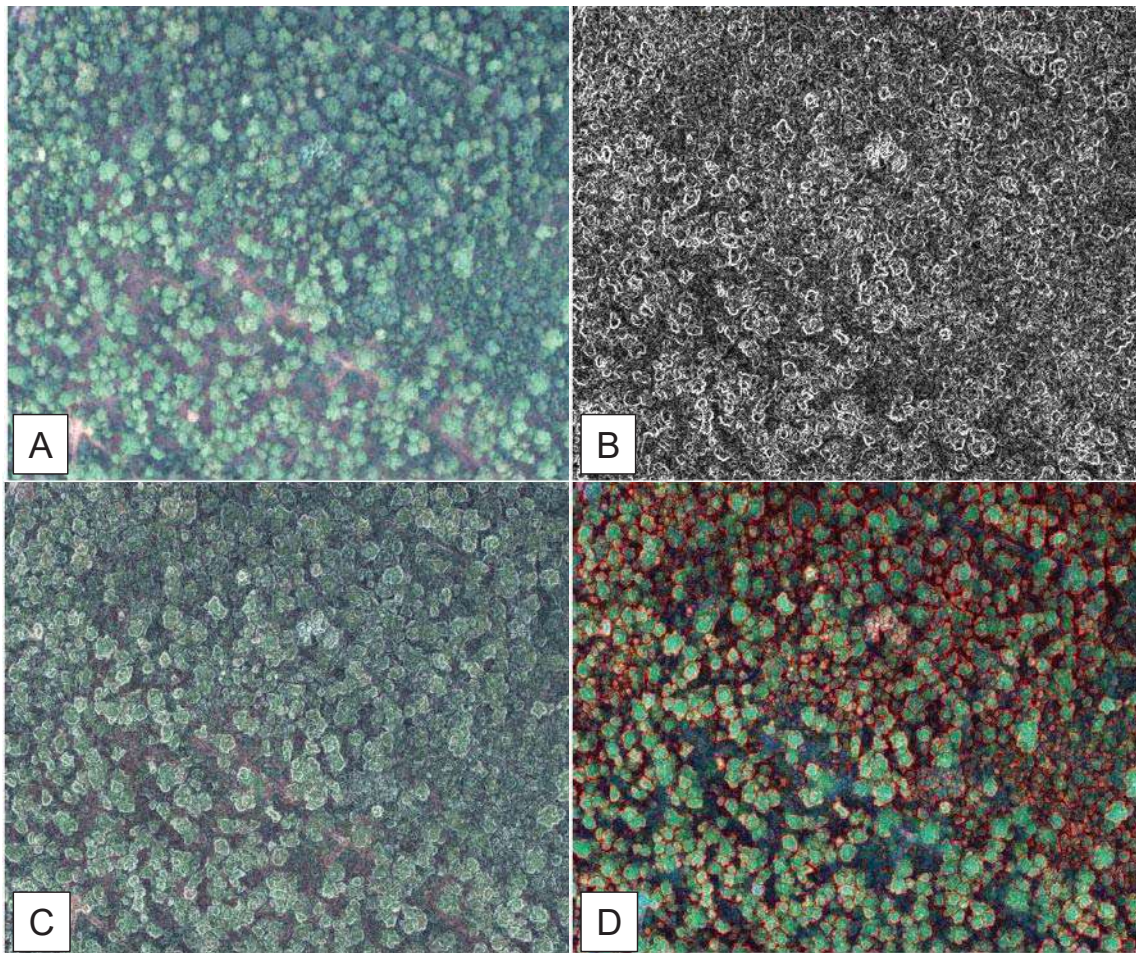


Figura 2. Mejora y procesamiento de ortofotomosaico para mejorar la definición del límite de copa; A) ortofotomosaico sin procesamiento, B) banda azul tras pasar por un filtro Sobel de detección de límites, C) Sobreposición transparentada (50%) con el ortofotomosaico original y D) compuesto RGB banda roja filtrada para evidenciar los límites entre las copas.

La leyenda empleada para definir y asignar las unidades se presenta en la Tabla 3, donde se especifican las densidades promedio, cobertura promedio y diámetro promedio de los individuos para cada clase. Las coberturas diámetros y densidades están calculados para el estrato con mayor visibilidad en las fotografías y ortofotografías; arbustivo para el agostadero, matorral y parcela abandonada, arbóreo para la plantación y todos las clases de bosque.

Tabla 2. Estructura y características de las unidades definidas en la leyenda.

| Clave | Leyenda | Diámetro promedio (m) | Densidad Promedio (Ind/ha) | Cobertura % Intervalo y (promedio) | Estratos | Composición |
|-------|----------------|-----------------------|----------------------------|------------------------------------|------------------------------|--|
| 1 | Agostadero | 2.3 | 168 | 5-15 (7.2) | Herbáceo | <i>Cynodon dactylon</i> |
| | | | | | Arbustivo | <i>Bacharis heterophylla</i> <i>Bacharis conferta</i> <i>Bacharis microphylla</i> <i>Calliandra sp.</i> <i>Crataegus pubescens</i> |
| 2 | Agricultura | | | ? | Plantas cultivadas (anuales) | <i>Zea mais</i> <i>Phaseolus vulgaris</i> <i>Bidens odorata</i> <i>Bidens serrulata</i> <i>Melampodium mucronatum</i> <i>Tagetes lunulata</i> |
| | | | | | Herbáceo | <i>Cynodon dactylon</i> <i>Salvia mexicana</i> <i>Ranunculus dicotomus</i> |
| 3 | Bosque abierto | 3.8 | 96.0 | 5-30 (10.9) | Arbustivo | <i>Rubus sp.</i> <i>Bacharis heterophylla</i> <i>Bacharis conferta</i> <i>Crataegus pubescens</i> |
| | | | | | Arbóreo | <i>Pinus devoniana</i> <i>Pinus leiophylla</i> <i>Quercus obtusata</i> <i>Quercus castanea</i> |
| 4 | Bosque medio | 9.8 | 48.0 | 30-50 (35.9) | Herbáceo | <i>Cynodon dactylon</i> <i>Salvia mexicana</i> <i>Ranunculus dicotomus</i> |
| | | | | | Arbustivo | <i>Rubus sp.</i> <i>Bacharis heterophylla</i> <i>Bacharis conferta</i> <i>Crataegus pubescens</i> |
| | | | | | Arbóreo | <i>Pinus devoniana</i> |

| | | | | | | |
|---|---------------------|------|-------|-----------------|-----------|--|
| | | | | | | <i>Pinus leiophylla</i> <i>Quercus obtusata</i> <i>Quercus castanea</i> |
| | | | | | Herbáceo | <i>Poa sp.</i> <i>Salvia mexicana</i> <i>Ranunculus dicotomus</i> |
| | | | | | Arbustivo | <i>Rubus sp.</i> <i>Rhus aromatica</i> <i>Rhus trifoliata</i> <i>Bacharis heterophylla</i> <i>Bacharis conferta</i> |
| 5 | Bosque cerrado | 11.0 | 97.6 | >70 (92.8) | | <i>Crataegus pubescens</i> <i>Pinus devoniana</i> <i>Pinus leiophylla</i> <i>Quercus obtusata</i> <i>Quercus castanea</i> <i>Fraxinus udehi</i> |
| | | | | | Herbáceo | <i>Cynodon dactylon</i> <i>Poa sp.</i> |
| | | | | | Arbustivo | <i>Rubus sp.</i> <i>Bacharis heterophylla</i> <i>Bacharis microphylla</i> <i>Crataegus pubescens</i> |
| 6 | Bosque regeneracion | 4.2 | 352.0 | NA (47.6) | Arbóreo | <i>Pinus devoniana</i> <i>Pinus leiophylla</i> |
| | | | | | Herbáceo | <i>Salvia mexicana</i> |
| | | | | | Arbustivo | <i>Rubus sp.</i> <i>Rhus aromatica</i> <i>Bacharis heterophylla</i> <i>Bacharis conferta</i> |
| 7 | Bosque-encino medio | 4.6 | 224.0 | 30-50 (37.1) | Arbóreo | <i>Crataegus pubescens</i> <i>Quercus obtusata</i> <i>Quercus castanea</i> |

Tabla 2. Continuación

| | | | | | | |
|----|-----------------------------|-----|-------|-------------|-------------------------------|---|
| 8 | Cárcava | NA | NA | NA | Herbáceo | <i>Cynodon dactylon</i> <i>Poa sp.</i> |
| | | | | | Arbustivo | <i>Calliandra sp.</i> <i>Crataegus pubescens</i> |
| 9 | Cuerpo de agua | NA | NA | NA | Vegetación Acuática y Riparia | <i>Cyperus sp.</i> <i>Crataegus pubescens</i> |
| 10 | Edificacion infraestructura | NA | NA | NA | NA | NA |
| 11 | Matorral | 3.3 | 160.0 | 5-15 (13.7) | Herbáceo | <i>Cynodon dactylon</i> <i>Bacharis heterophylla</i> |
| | | | | | Arbustivo | <i>Bacharis conferta</i> <i>Calliandra sp.</i> |
| 12 | Parcela abandonada | 1.8 | 224.0 | NA (5.4) | Arbustivo | <i>Crataegus pubescens</i> <i>Pinus devoniana</i> |
| | | | | | Herbáceo | <i>Cynodon dactylon</i> <i>Poa sp.</i> <i>Zeugites sp.</i> |
| 13 | Plantacion <i>Cupresus</i> | 7.0 | 216.0 | 83.7 | Arbustivo | <i>Bacharis heterophylla</i> <i>Bacharis microphylla</i> <i>Crataegus pubescens</i> <i>Pinus devoniana</i> |
| | | | | | Rasante | <i>Pteridofitas</i> |
| | | | | | Arbóreo | <i>Cupresus lindleyi</i> |

Tabla 2. Continuación

En todos los casos de cubierta con bosque, excepto la regeneración, se presenta un uso de extracción forestal no maderable, con extracción intensa de resina. La mayoría de los árboles con diámetros >20 cm presentan marcas de resineo. Además, durante las verificaciones de campo y demás recorridos en la zona se constató la corta ilegal o tala clandestina, principalmente para la zona noreste. López-García (2007) utiliza diferentes clases para la cobertura forestal, en donde incluye seis categorías con intervalos de cobertura; cerrada (>80%), semicerrada (55-80%), semiabierta (31-54%), abierta (5-30%), muy abierta (<5%) y deforestado (0%).

En el presente trabajo definimos las coberturas con estrato arbóreo <5% a partir de la cobertura presente en el resto de la superficie, por lo que las clases de matorral, agostadero, cárcava y agricultura pueden presentar individuos arbóreos aislados en muchos casos relictos de la cobertura existente previa a la deforestación. Todas las categorías de bosque corresponden a bosque de pino-encino, con dominancia fisonómica del género *Pinus*, ya que solamente se encontraron dos unidades con dominancia del

género *Quercus* en el área de estudio, ambas con cobertura media no se reportan otras coberturas para este tipo de bosque.

Los agostaderos se encuentran compuestos principalmente por vegetación herbácea y arbustiva, con elementos arbóreos reminiscentes, donde los arbustos presentan densidades bajas (5-15%).

Los terrenos agrícolas son de temporal y tienen un sistema de año y vez, en donde un año se cultiva y el siguiente se deja descansar. Quemadas agropecuarias son frecuentes y se practican usualmente el año de cultivo, como parte de las labores agrícolas, como primera labor, con el fin de evitar el crecimiento de la vegetación no deseada y reducir la incidencia de plagas (Guzmán, Com. Pers). El porcentaje de cobertura no aplica en esta clase.

Para el caso de los matorrales, se presenta vegetación herbácea y arbustiva, con algunos organismos arbóreos reminiscentes. Las diferencias entre esta clase y la de agostadero es la cobertura de los elementos arbustivos, siendo mayor en el matorral, además estos elementos son de mayores dimensiones.

Respecto a la clase *Parcela abandonada*, corresponde a superficies donde anteriormente se practicaba la agricultura de temporal y que por distintas razones han dejado de cultivarse, favoreciéndose el crecimiento de vegetación secundaria. Esta clase contiene elementos herbáceos y arbustivos, aunque también presenta elementos arbóreos juveniles (< 5m) en la mayoría de los casos. En todas las áreas identificadas con este uso se encontraron evidencias claras de manejo agrícola previo como es un microrrelieve en surcos. Todas las unidades consideradas en esta clase no han sido cultivadas por al menos un periodo de 7 años de acuerdo con las fuentes locales (Guzmán, com. Pers. y González, com. Pers.).

Para el caso de la clase *Cárcava* se consideraron aquellas áreas con procesos de erosión en cárcava o laminar desprovistas de cubierta vegetal y donde afloran horizontes arcillosos altamente erodables como los mencionados por (Servenay y Prat, 2003). Durante la verificaciones de campo se detectaron áreas con morfología y características típicas de cárcava como las mencionadas por (Zepeda-Castro et al., Submitted), pero bajo cubierta forestal de distintas clases. La representación espacial y estudio de estas unidades se encuentra mas allá del presente trabajo.

La plantación de *Cupresus* fue establecida dentro de programas gubernamentales de reforestación. Se encuentra en un área previamente agrícola con evidencias de laboreo, aún cuando la plantación tiene una edad aproximada de 30 años, es apreciable la presencia de surcos en el microrrelieve del sitio. En este sitio solamente se presentan dos estratos, el rasante compuesto por musgos y el arbóreo.

La clase *edificación e infraestructura* incluye construcciones de diversos tipos presentes en la zona de estudio como casas, graneros, almacenes, cobertizos y estanques piscícolas.

De acuerdo con los informantes locales, la porción norte y noreste del área con cobertura de bosque corresponde a bosques de segundo o tercer crecimiento que fueron intervenidos y cortados a matarrasa hace 45-50 años, la porción sur y sureste corresponde con bosques intervenidos con fines de extracción comercial a baja escala donde se

presentan tratamientos silvícolas como *árboles padre* y corta selectiva. Se desconoce sobre los ciclos de corta y edades de los rodales.

Previamente se mencionó que en las unidades con presencia de arbolado del género *Pinus* se da la extracción de resina. Por su parte los rodales existentes con elementos arbóreos del género *Quercus* tienen un aprovechamiento no maderable, en el que como práctica común se extráe el mantillo del suelo, localmente llamado *Tierra de Hoja* o simplemente *Basura de encino* para ser usado como mejorador de suelo de plantas de ornato y en ocasiones esta extracción tiene fines comerciales.

Si bien la mayoría de las unidades de bosque son de pino-encino, la abundancia relativa de los encinos es visiblemente menor. Esto se debe a la historia extractiva local en la que desde hace por lo menos 80 años los propietarios cortan los encinos para producir carbón con fines comerciales (González, com. Pers.)

Tabla 3. Descripción de las superficies para las distintas clases de la leyenda en el área abarcada por el ortofotomosaico.

| Clase | Area ha | Proporción % | No Poligonos | Area Min ha | Area Max ha | Area Prom ha |
|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|
| Agostadero | 32.17 | 11.38 | 28 | 0.0007 | 10.0031 | 1.1489 |
| Agricultura | 7.66 | 2.71 | 2 | 0.6821 | 6.9800 | 3.8311 |
| Bosque abierto | 19.24 | 6.81 | 14 | 0.0723 | 6.9678 | 1.3746 |
| Bosque cerrado | 184.13 | 65.16 | 10 | 0.3612 | 97.9503 | 18.4110 |
| Bosque m abierto | 5.30 | 1.87 | 3 | 0.9942 | 2.9133 | 1.7660 |
| Bosque regeneracion | 4.41 | 1.56 | 2 | 1.6691 | 2.7384 | 2.2038 |
| Bosque-encino | 1.74 | 0.61 | 2 | 0.7917 | 0.9447 | 0.8682 |
| Carcava | 2.78 | 0.98 | 71 | 0.0004 | 0.4245 | 0.0397 |
| Cuerpo de agua | 0.19 | 0.07 | 2 | 0.0360 | 0.1555 | 0.0354 |
| Edificacion infraestructura | 2.04 | 0.72 | 6 | 0.0360 | 0.0423 | 0.0369 |
| Matorral | 5.62 | 1.99 | 8 | 0.1124 | 2.1120 | 0.7028 |
| Parcela abandonada | 12.55 | 4.44 | 4 | 0.2131 | 9.8881 | 3.1365 |
| Plantacion cupresus | 4.76 | 1.68 | 2 | 1.5914 | 3.1636 | 2.3775 |
| Total general | 282.58 | 100 | 154 | | | |

En cuanto a las superficies para las distintas clases, éstas se presentan en la Tabla 3. La clase con mayor superficie es el bosque cerrado, con cerca del 65% de la superficie y 14 polígonos, la segunda clase por superficie fue el agostadero con cerca del 11% y 28. La tercera clase por su superficie fue el bosque abierto, con cerca de 7% y 14 polígonos. Mientras que el cuarto lugar lo obtuvo la clase de parcela abandonada con aproximadamente 4.5% y 4 polígonos. El resto de las clases presentaron superficies menores a 10.0 ha.

En número de polígonos y la superficie nos indica los tamaños de los polígonos y por lo tanto sobre la conectividad de las clases. Para el caso del bosque cerrado tenemos tanto la mayor superficie de polígono como la mayor superficie promedio de los polígonos. En el caso de los menores polígonos, estos pertenecen a la clase de cárcava con 4 m². Esta clase tiene la mayor cantidad de polígonos con 71 y una superficie promedio de 397 m².

El mapa final de uso del suelo se configuró y editó para ser presentado en una escala 1:12,000 (ver Mapa 1), aunque el documento digital está generado con escala 1:5,000.

DISCUSION

Métodos, aplicación y potencial

Se generó un mapa de uso del suelo y vegetación a partir de fotografías aéreas de pequeño formato ortocorregidas y un ortofotomosaico digital con escala 1:5,500. Las imágenes poseen una excelente resolución espacial (aproximadamente 40.0 cm) en tres bandas RGB y formato digital lo que permitió su análisis utilizando diferentes algoritmos de contraste con lo que se logró dar mas definición a las copas de los árboles y arbustos. La aplicación de imágenes de alta resolución con fines dasonómicos ha sido utilizada desde hace varias décadas (Booth y Saunders, 1985; Hall y Fent, 1991). En la actualidad la disponibilidad de imágenes satelitales o aéreas digitales de alta resolución ha permitido evaluar fenómenos en escalas detalladas y muy detalladas como el daño en los árboles asociado a metales pesados (Levesque y King, 1999), o el desarrollo de políticas de desarrollo y manejo forestal (Carver et al., 2006).

En este trabajo exploramos la utilidad de imágenes aerofotográficas y su uso en la delimitación de unidades cartográficas de uso del suelo y vegetación, obteniendo excelentes resultados. Sin embargo considero que la información extraída en un mapa de uso del suelo y vegetación es limitada comparada con el potencial de información a extraer. Aplicando el procesamiento adecuado permitió medir copas individuales de los árboles y diferenciar los individuos por género a partir de la morfología de copa.

Las aplicaciones de estos métodos de alta resolución son prometedores en el caso de la dasonomía y áreas afine, pues las relaciones alométricas (copa-altura) permiten estimar los volúmenes de biomasa epígea, volúmenes maderables, reservorio de carbono entre otras cosas (Santa Regina, 2000; Keller et al., 2001; Sunanda y Jayaraman, 2006). Más aún, el acoplamiento de estas tecnologías con otras como el LIDAR han permitido generar información detallada de volúmenes específicos por especie en bosques seminaturales (Koukoulas y Blackburn, 2005). Y Aunque actualmente la tecnología LIDAR es de acceso restringido a muchos grupos de investigación. La fotografía aérea de pequeño formato es una herramienta relativamente accesible.

Considero que aún cuando otros autores hayan empleado materiales similares para la generación de cartografía detallada de uso del suelo y vegetación por ejemplo (López-García, 2007), pueden a partir de imágenes con estas características estudiarse dinámicas en la escala de comunidad (Frank y Tweddale, 2006; McGlynn y Okin, 2006) o población para géneros o especies definidas.

CONCLUSIONES

Se generó un mapa de uso del suelo y vegetación en escala detallada 1:5,500 para un área de aproximadamente 2.8 km².

La resolución espacial de las imágenes y el procesamiento digital aplicando filtros de contraste permitió generar compuestos de falso color que facilitaron la interpretación y definición de clases, así como cuantificar ciertas características intrínsecas de éstas, como la densidad y cobertura.

La clase con mayor superficie en el área fue el bosque cerrado, con una superficie de 184.13 ha (65.16%), y la de menor superficie los cuerpos de agua 0.19 ha (0.07%). Las edificaciones en el área abarcaron una superficie total de 2.04 ha (0.72%). Por su parte las cárcavas abarcaron una superficie de 2.78 ha (0.98%).

En cuanto a las dinámicas e historia de los usos del suelo y vegetación, estas son complejas y obedecen primariamente a las necesidades económicas de los dueños de los terrenos.

Las imágenes y herramientas analíticas empleadas pueden ser aplicadas exitosamente en la generación de cartografía detallada de uso del suelo y vegetación con una perspectiva clásica.

Existe gran potencial de que las imágenes y técnicas de análisis puedan ser utilizados en estudios detallados de otro tipo como dasonomía, estructuras de comunidades vegetales o dinámicas poblacionales.

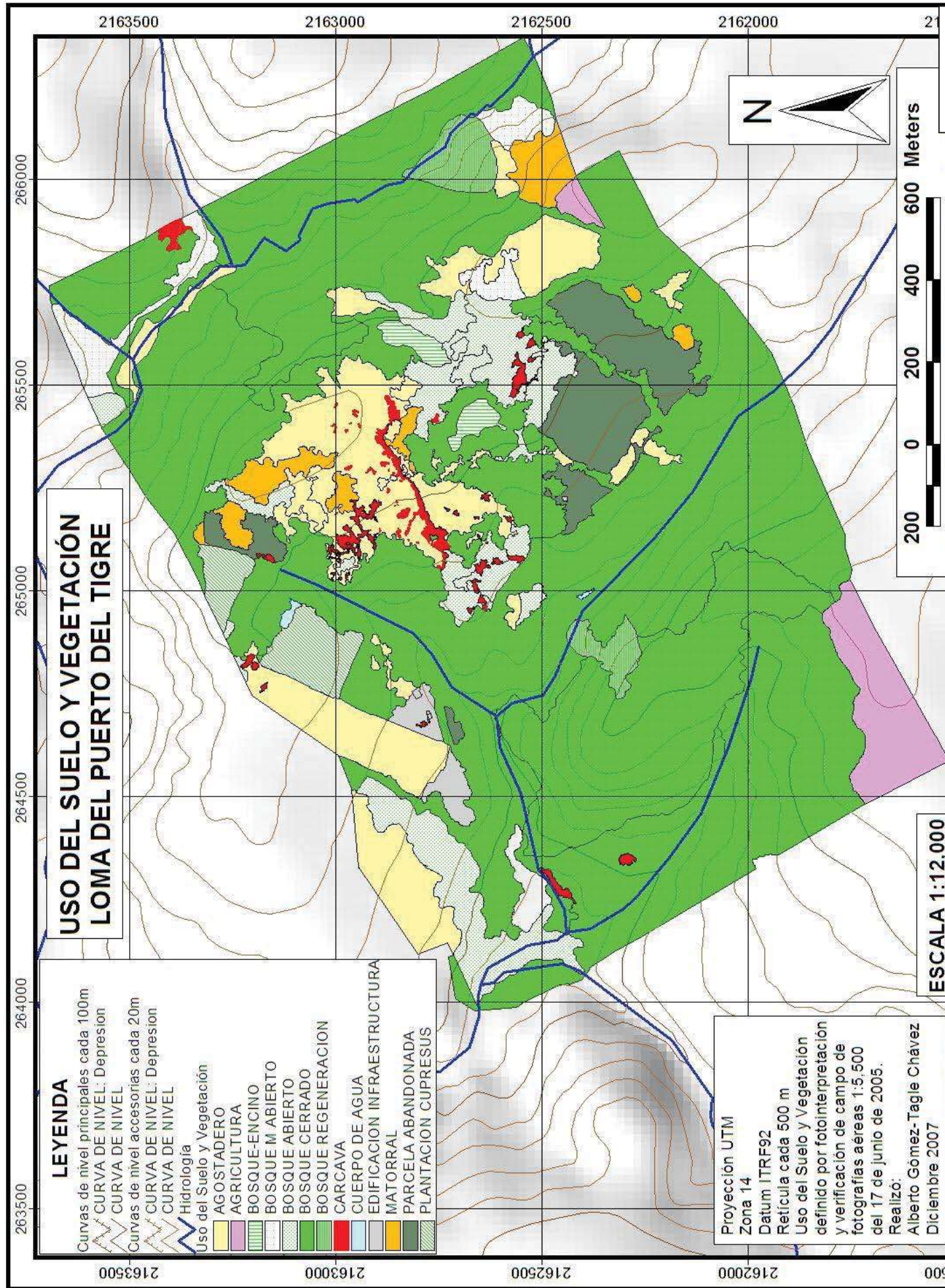
Agradecimientos

Deseo agradecer primeramente a la M. en C. Selene Maldonado López por el apoyo incondicional durante las verificaciones y trabajo de campo, también al personal del laboratorio de suelo del INIRENA, UMSNH por el apoyo y comentarios en la elaboración del trabajo. El financiamiento para la elaboración de este trabajo fue proporcionado por el proyecto: CONACYT-SEMARNAT (SEMARNAT-2002-C01-00012) “Diagnóstico integrado y priorización de alternativas de rehabilitación para la sustentabilidad de la cuenca de Morelia (Cuitzeo)”.

REFERENCIAS ANEXO I

- Avila, R.R., 1982. Notas sobre Fotogrametría y Fointerpretación. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, México, D.F., 50 pp.
- Bergkamp, G., Cerda, A. and Imeson, A.C., 1999. Magnitude-frequency analysis of water redistribution along a climate gradient in Spain. *Catena*, 37(1-2): 129-146.
- Booth, T.H. and Saunders, J.C., 1985. Applying the FAO Guidelines on land evaluation for forestry. *Forest Ecology and Management*, 12(2): 129-142.
- Carver, A.D., Thurau, R.G., White, E.M. and Lazdinis, M., 2006. Applying spatial analysis to forest policy evaluation: case study of the Illinois Forestry Development Act. *Environmental Science & Policy*, 9(3): 253-260.
- Cerdà, A., 1997a. The effect of patchy distribution of *Stipa tenacissima* L. on runoff and erosion. *Journal of Arid Environments*, 36(1): 37-51.
- Cerdà, A., 1997b. Seasonal changes of the infiltration rates in a Mediterranean scrubland on limestone. *Journal of Hydrology*, 198(1-4): 209-225.
- Cerdà, A., 1999. Seasonal and spatial variations in infiltration rates in badland surfaces under Mediterranean climatic conditions. *Water Resour. Res.*, 35(1): 319-328.
- Clark-Labs, 2003. Idrisi Kilimanjaro. Clark Labs, Clark University, Worcester, MA, USA.
- Frank, T.D. and Tweddale, S.A., 2006. The effect of spatial resolution on measurement of vegetation cover in three Mojave Desert shrub communities. *Journal of Arid Environments* Special Issue: Deserts of the World Part I: The changing Mojave Desert Guest Editors: K.H. Berry, R. Murphy, 67(Supplement 1): 88-99.
- García, E., 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Insitito de Geografía UNAM, México, D.F., 90 pp.
- Gómez-Tagle, C.A., 2004. Relaciones entre relieve y ptopiedades edáficas y su efecto en la productividad maderable en un bosque templado del centro de México (Sur de Morelia, Michoacán), Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, Michoacán.
- Hall, R.J. and Fent, L., 1991. Relating forestry interpreter preference to sensitometric parameters of black and white and normal color aerial films. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 46(6): 328-345.

- Keller, M., Palace, M. and Hurtt, G., 2001. Biomass estimation in the Tapajos National Forest, Brazil: Examination of sampling and allometric uncertainties. *Forest Ecology and Management*, 154(3): 371-382.
- Koukoulas, S. and Blackburn, G.A., 2005. Mapping individual tree location, height and species in broadleaved deciduous forest using airborne LIDAR and multi-spectral remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(3): 431 - 455.
- Legros, J.-P., 2006. *Mapping of the Soil*. Science Publishers, 411 pp.
- Levesque, J. and King, D.J., 1999. Airborne Digital Camera Image Semivariance for Evaluation of Forest Structural Damage at an Acid Mine Site. *Remote Sensing of Environment*, 68(2): 112-124.
- López-Blanco, J., M., I.V. and R., J.U., 1996. Corrección fotogramétrica de segmentos digitizados de fotografías aéreas aplicando un SIG, para la determinación del uso del suelo en la Sierra de Quetzaltepec, México. *Investigaciones Geográficas Boletín del Instituto de Geografía*, 33.
- López-García, J., 2007. Análisis de cambio de la cobertura forestal en la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca (2006 – 2007), Fondo para la Conservación de la Mariposa Monarca (WWF y FMCN), México, D.F.
- Lyford, F.P.Q., H.K., 1969. Infiltration rates as affected by desert vegetation. *Water Resources Research*, 5: 1373-1376.
- Mas, J.F. et al., 2002. Assessing forest resources in Mexico: wall-to-wall land use/cover mapping. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*: 966-968.
- McGlynn, I.O. and Okin, G.S., 2006. Characterization of shrub distribution using high spatial resolution remote sensing: Ecosystem implications for a former Chihuahuan Desert grassland. *Remote Sensing of Environment*, 101(4): 554-566.
- Moncayo, R.F., Estrada, F.E. and Pérez, R.C., 1970. *Manual para uso de fotografías aéreas en dasometría*. Dirección Gral. Inventario Nacional Forestal, México, D.F., 120 pp.
- Palacio-Prieto, J.L. et al., 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 43: 183-203.
- Pilgrim, D.H., Chapman, T.G. and Doran, D.G., 1988. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. *Hydrological Sciences - Journal - des Sciences Hydrologiques*, 33(4): 379-400.
- Ramírez, I., 2001. Cambios en las cubiertas del suelo en la Sierra de Angangueo, Michoacán y Estado de México, 1971-1994-2000. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 45: 39-55.
- Sabaté, A.M., 1986. Fotointerpretación y tendencias recientes en Geografía humana. In: A. García Ballesteros (Editor), *Teoría y Práctica de la Geografía*. Ed. Alhambra, Madrid, España, pp. 123-141.
- Santa Regina, I., 2000. Biomass estimation and nutrient pools in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata Mountains, Salamanca, Spain. *Forest Ecology and Management*, 132(2-3): 127-141.
- Servenay, A. and Prat, C., 2003. Erosion extension of indurated volcanic soils of Mexico by aerial photographs and remote sensing analysis. *Geoderma; Volcanic soils: properties and processes as a function of soil genesis and land use*, 117(3-4): 367-375.
- Sunanda, C. and Jayaraman, K., 2006. Prediction of stand attributes of even-aged teak stands using multilevel models. *Forest Ecology and Management*, 236(1): 1-11.
- Wit, A.M.W., 2001. Runoff controlling factors in various sized catchments in a semi-arid Mediterranean environment in Spain. Ph. D. Thesis, Universiteit Utrecht, Utrecht, The Netherlands, 229 pp.
- Zepeda-Castro, H., Gómez-Tagle, A.R., Batlle-Sales, J., Gómez-Tagle, A.C. and Felipe-Cisneros, O., Submitted. Simulador de lluvia de diseño simple y portátil para ensayos de erosión en terrenos accidentados.



ANEXO 2. CARTA DE ACEPTACION

TERRA
Difusión Científica de la Sociedad Mexicana
de la Ciencia del Suelo A.C.

Latinoamericana

06 de agosto de 2007
Reg.: 1538

DR. ALBERTO GÓMEZ-TAGLE CH.
Nicolás Zapata 214,
J. de Torremolinos
58179 Morelia, Michoacán.

Le comunico que su trabajo:

**“APROXIMACIÓN DE CAMPO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA
SATURADA DEL SUELO EMPLEANDO UN INFILTRÓMETRO
PORTÁTIL DE CARGA CONSTANTE Y ANILLO SENCILLO”**

*Alberto Gómez-Tagle Ch., Alberto F. Gómez-Tagle R., Jorge Batlle-Sales, Hugo Zepeda
Castro, Mario A. Guevara Santamaría, S. Maldonado L., J. Emmanuel Pintor A.*

Ha sido aceptado para su publicación. Posteriormente le comunicaremos el volumen y el número en que aparecerá.

ATENTAMENTE


M. C. JORGE ALVARADO LÓPEZ
EDITOR



<LA REVISTA TERRA LATINOAMERICANA SE ENCUENTRA EN EL INDICE DE REVISTAS DEL
CONACYT>Tel. y Fax: + (595) 952-1721, e-mail: terra.latin@gmail.com

Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Suelos Km. 38.5 Carr. México-Texcoco, 56230 Chapingo, Estado de México
Tel. y Fax 01 (595) 95 2-17-21 y 95 2-15-00 Ext. 5237, e-mail: terra@correo.chapingo.mx y smcs@correo.chapingo.mx
(Correo ordinario: Apartado Postal 45, 56230 Chapingo, Estado de México)

ANEXO 3. CLIMOGRAMA

De acuerdo con los datos de la caseta 16-089 SANTIAGO UNDAMEO del Servicio Meteorológico Nacional en García (García, 2004), ubicada con coordenadas 101° 17'W, 19°35'N, a 2004 msnm, a una distancia de 7 Km al NW del sitio de estudio, el clima es de tipo Cb(w₂)(w)(i')g, templado subhúmedo con lluvias en verano, precipitación invernal < 5%, oscilación térmica intermedia y marcha tipo Ganges, en la cual la temperatura promedio del mes mas caliente ocurre antes del solsticio de verano, usualmente mayo. El climograma se presenta en la Figura A3.1, mientras que la marcha anual de balance hídrico calculado por el método de Thornwhite se muestra en la Figura A3.2. Éste método indica una evapotranspiración potencial de 694.41 mm y una precipitación total anual de 881.3 mm, por lo que el balance anual es positivo, con 186.89 mm.

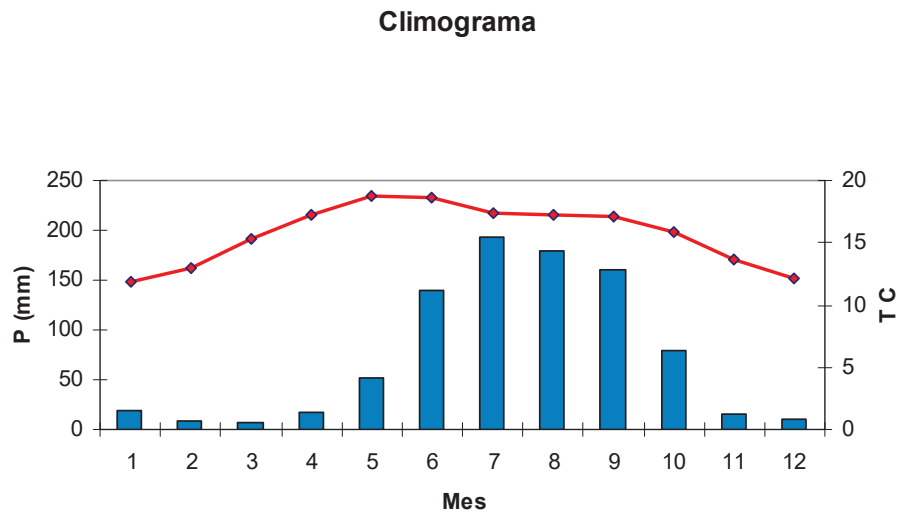


Figura A3.1. Climograma para la estación Santiago Undameo

En la Figura A3.2 puede apreciarse que el balance es positivo para los meses de junio a octubre (5 meses) siendo negativo para el resto, lo que indica una condición

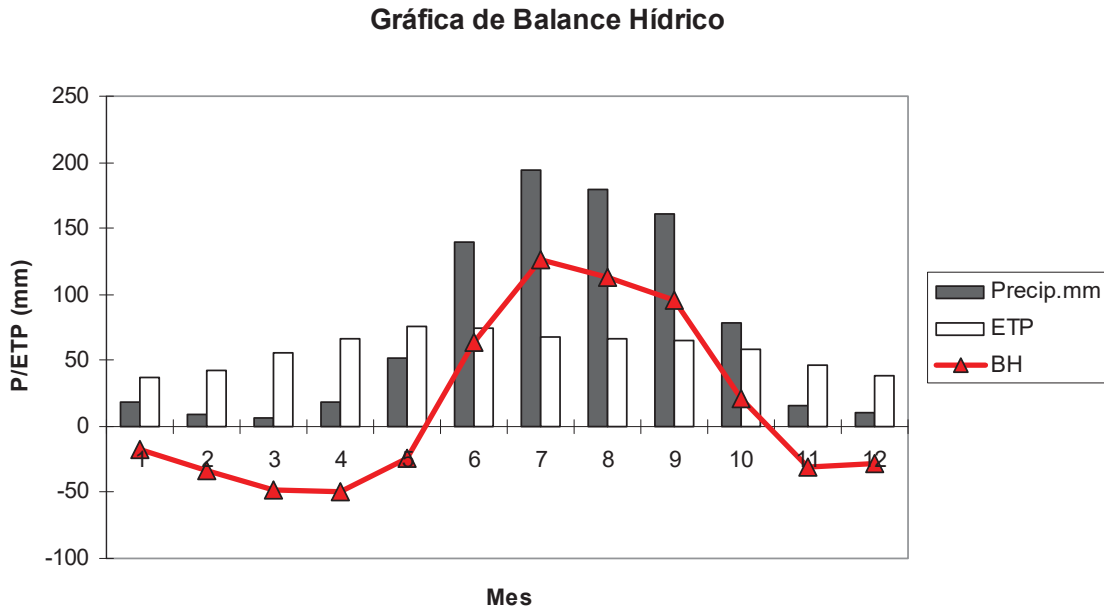


Figura A3.2. Gráfica de balance hídrico anual calculado por el método de Thornwhite. Estación Santiago Undameo (16-089). Evapotranspiración potencial (ETP) y balance hídrico (BH).

Para el caso de la estación 16-002 Acuitzio del canje con coordenadas 101°20'W, 19°23'N, a una altitud de 2089, ubicada a 11 Km al W del área de estudio, García (2004) reporta un clima de tipo Cb(w₂)(w)(i')g, con temperatura promedio anual de 14 °C y precipitación promedio anual de 967.7 mm. La Figura A3.3 muestra el climograma para esta estación, y la Figura A3.4. muestra la marcha de balance hídrico anual calculada por el método de Thornwhite.

Climograma

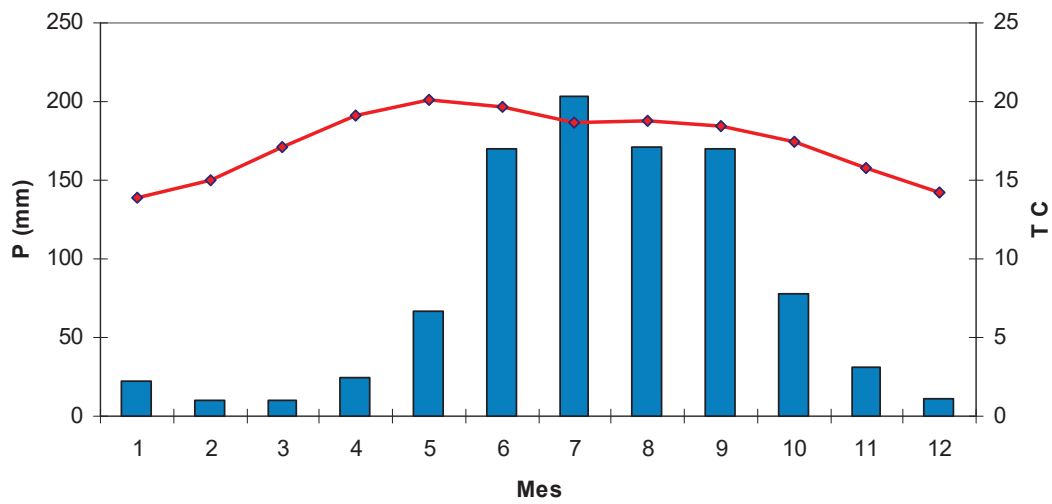


Figura A3.3. Climograma de la estación Acuitzio del Canje (16-002).

Gráfica de Balance Hídrico

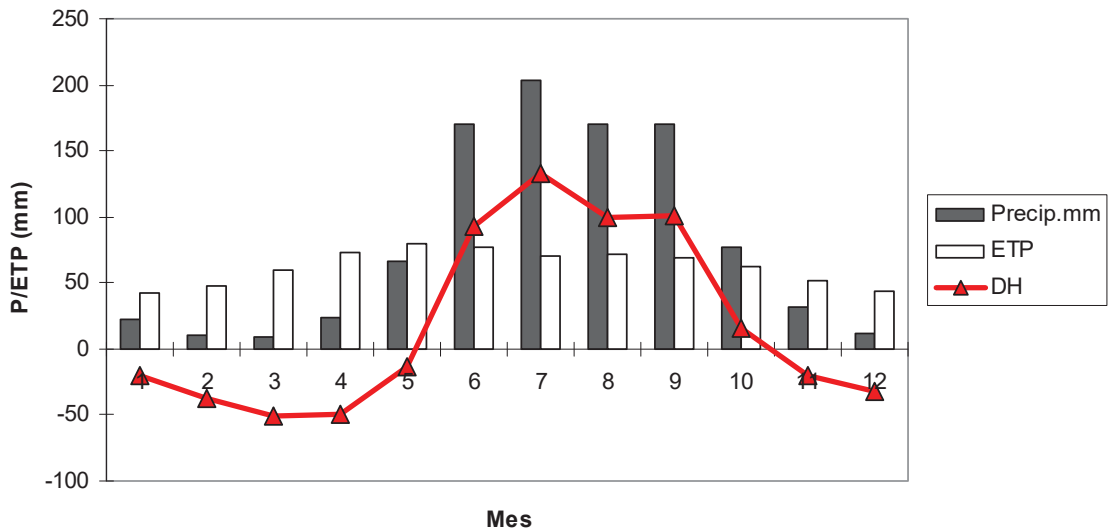


Figura A3.4. Gráfica de balance hídrico anual calculado por el método de Thornwhite. Estación Acuitzio del Canje (16-002). Evapotranspiración potencial (ETP) y balance hídrico (BH).

Para la estación de Acuitzio, el balance hídrico anual resulta positivo, con un superávit de 784.53 mm.

Referencias Anexo 3

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen, 5 edition. Insitito de Geografía UNAM, México, D.F.

ANEXO 4; ANÁLISIS DE LABORATORIO PARA LOS PERFILES

Tabla A4.1. Propiedades físicas para cinco perfiles; Agostadero (AG), bosque de pino-encino (BPQ), cárcava (C), parcela abandonada (PA), plantación de *Cupressus* (PCu). Densidad real (DR), densidad aparente (DA), % agregados estables en agua 2.0 a 4.0 mm (%AEA 2-4), % agregados estables en agua 0.25 a 2.0 mm (%AEA 0.25-2).

| Perfil | Prof. (cm) | DR (g·cm ⁻³) | DA (g·cm ⁻³) | % Arena | %Arcilla | % Limo | %AEA 2-4 mm | %AEA 0.25-2mm | Textura | Color Seco | Color Humedo |
|--------|------------|--------------------------|--------------------------|---------|----------|--------|-------------|---------------|-----------------------|------------|--------------|
| | 0-12 | 2.3 | 0.8 | 23.6 | 26.4 | 50.0 | 92.1 | 92.0 | Franco-Arcilloso | 10 R 4/3 | 10 R 3/2 |
| | 12-27 | 2.3 | 1.0 | 22.4 | 62.4 | 15.3 | 81.5 | 90.3 | Franco-Arcilloso | 10YR5/6 | 10YR3/6 |
| | 27-43 | 2.0 | 1.0 | 4.9 | 77.1 | 18.0 | 63.0 | 80.7 | Arcillo-Limoso | 7,5YR5/6 | 7,5YR |
| AG | 43-67 | 2.5 | 0.9 | 4.9 | 64.4 | 30.7 | 29.7 | 89.2 | Franco-Arcillo-Limoso | 10 YR 7/6 | 10 YR 6/8 |
| | 67- | 2.1 | 0.9 | 4.4 | 77.6 | 18.0 | 2.5 | 91.3 | Arcillo-Limoso | 10 YR 7/6 | 10YR 5/6 |
| | 0-21 | 2.0 | 1.0 | 28.4 | 49.6 | 22.0 | 77.3 | 92.0 | Arcilloso | 10 R 4/2 | 10 R 3/2 |
| C | 21-43 | 2.6 | 0.9 | 10.4 | 74.9 | 14.7 | 8.2 | 90.6 | Arcillo-Limoso | 10 R 5/6 | 10 R 3/6 |
| | 43-72 | 2.5 | 1.1 | 6.4 | 77.6 | 16.0 | 1.1 | 90.8 | Arcillo-Limoso | 10 R 5/6 | 10 R 3/6 |
| | 72- | 2.7 | 1.2 | 5.1 | 74.9 | 20.0 | 0.5 | 88.9 | Arcillo-Limoso | 10 R 5/6 | 10 R 3/6 |
| PA | 0-18 | 1.8 | 1.0 | 51.6 | 16.4 | 32.0 | 81.8 | 87.2 | Franco-Arenoso | 10 R 4/4 | 10 R 3/4 |
| | 18-42 | 2.1 | 1.0 | 51.6 | 16.4 | 32.0 | 45.3 | 88.2 | Franco | 7,5 YR 5/4 | 7,5 5/6 |
| | 42-59 | 2.5 | 0.9 | 12.4 | 73.6 | 14.0 | 1.4 | 91.5 | Arcilloso | 10 R 4/4 | 10 R 3/4 |
| 70- | 59-70 | 2.1 | 0.9 | 18.4 | 67.6 | 14.0 | 0.3 | 91.7 | Arcilloso | 10 R 4/6 | 10 R 3/4 |
| | 70- | 2.5 | 1.0 | 6.9 | 80.4 | 12.7 | 0.3 | 92.1 | Franco-Limoso | 10 R 4/6 | 10 R 3/4 |

| Perfil | Prof. (cm) | DR (g·cm ⁻³) | DA (g·cm ⁻³) | % Arena | %Arcilla | % Limo | %AEA 2-4 mm | %AEA 0.25-2mm | Textura | Color Seco | Color Humedo |
|--------|------------|--------------------------|--------------------------|---------|----------|--------|-------------|---------------|------------------|------------|--------------|
| BPQ | 0-5 | 1.7 | 1.0 | 60.4 | 21.6 | 18.0 | 90.4 | 90.2 | Franco-Arcilloso | 10 R 3/2 | 10 R 5/2 |
| | 12-32 | 2.1 | 0.9 | 30.2 | 48.4 | 21.4 | 82.2 | 91.7 | Arenoso | 10 R 4/4 | 10 R 3/2 |
| | 32-38 | 2.0 | 0.9 | 26.4 | 52.9 | 20.7 | 44.8 | 92.0 | Arcilloso | 10 R 4/4 | 10 R 3/4 |
| | 5-12 | 2.5 | 0.9 | 46.4 | 29.6 | 24.0 | 91.3 | 90.4 | Franco-Arcilloso | 10 R 4/4 | 10 R 4/3 |
| | 38-52 | 2.3 | 0.9 | 13.6 | 80.4 | 6.0 | 23.4 | 91.4 | Arenoso | 10 R 5/4 | 10 R 3/4 |
| | 52-76 | 2.8 | 1.0 | 4.4 | 83.6 | 12.0 | 28.3 | 92.9 | Franco-Limoso | 7,5 YR 5/2 | 7,5 YR 4/4 |
| | 76- | 1.9 | 1.1 | 5.6 | 74.4 | 20.0 | 11.5 | 88.9 | Limoso | 7,5 YR 6/6 | 7,5 YR 5/6 |
| | 0-19 | 2.5 | 0.9 | 16.0 | 45.4 | 38.6 | 79.5 | 89.6 | Arcilloso | 10YR 3/6 | 5 YR 3/2 |
| | 19-36 | 2.0 | 1.1 | 8.0 | 65.3 | 26.7 | 50.9 | 87.1 | Arcillo-Limoso | 5YR 5/6 | 2.5 YR 2.5/4 |
| | 36-76 | 2.2 | 1.0 | 5.0 | 75.3 | 19.7 | 35.6 | 85.7 | Limoso | 5YR 5/8 | 2.5YR 4/4 |
| PCu | 76-99 | 2.2 | 1.0 | 4.5 | 80.3 | 15.3 | 0.4 | 90.5 | Limoso | 5YR 4/6 | 2.5 YR 4/6 |
| | 99-146 | 2.0 | 1.1 | 4.5 | 75.3 | 20.2 | 6.0 | 89.7 | Arcillo-Limoso | 2.5 YR 4/8 | 2.5YR 3/6 |
| | 146-178 | 2.2 | 1.0 | 8.0 | 75.3 | 16.7 | 5.2 | 83.4 | Arcillo-Limoso | 5 YR 5/8 | 2.5YR 3/6 |
| | 178- | 2.1 | 1.0 | 12.0 | 65.3 | 22.7 | 8.9 | 83.1 | Limoso | 5YR 4/6 | 2.5YR 3/6 |
| | | | | | | | | | Arcillo-Limoso | | |
| | | | | | | | | | Limoso | | |

Tabla A4.1. Continuación

Tabla A4.2. Propiedades químicas para cinco perfiles; Agostadero (AG), bosque de pino-encino (BPQ), cárcava (C), parcela abandonada (PA), plantación de *Cupressus* (PCu). Conductividad eléctrica (CE), Fósforo (P_2O_5), Potasio (K^+), Nitrógeno (NH_4^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Cloruros (Cl^-), Hierro (Fe^{2+}), Azufre (SO_4^{2-}), % materia orgánica (%MO), % carbonatos ($CaCO_3$)

| Perfil | Prof. (cm) | pH (agua) | pH ($CaCl_2$) | CE ($dS \cdot m^{-1}$) | P_2O_5 ($cmol \cdot kg^{-1}$) | K^+ ($cmol \cdot kg^{-1}$) | NH_4^+ ($cmol \cdot kg^{-1}$) | Ca^{2+} ($cmol \cdot kg^{-1}$) | Mg^{2+} ($cmol \cdot kg^{-1}$) |
|--------|------------|-----------|-----------------|--------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| AG | 0-12 | 5.44 | 4.79 | 0.14 | 0.024 | 0.15 | 1.17 | 0.93 | 0.20 |
| | 12-27 | 5.33 | 4.71 | 0.03 | 0.024 | 0.15 | 0.23 | 0.51 | 0.10 |
| | 27-43 | 5.80 | 4.94 | 0.03 | 0.024 | 0.15 | 0.59 | 0.57 | 0.15 |
| | 43-67 | 5.66 | 4.69 | 0.01 | 0.023 | 0.15 | 0.18 | 0.62 | 0.71 |
| | 67- | 5.85 | 4.92 | 0.01 | 0.023 | 0.15 | 0.18 | 0.41 | 0.25 |
| C | 0-21 | 5.03 | 4.22 | 0.01 | 0.024 | 0.14 | 1.17 | 0.93 | 0.20 |
| | 21-43 | 6.47 | 5.53 | 0.01 | 0.023 | 0.14 | 0.12 | 0.98 | 12.38 |
| | 43-72 | 6.45 | 5.59 | 0.02 | 0.023 | 0.14 | 0.12 | 0.62 | 1.02 |
| | 72- | 6.30 | 5.70 | 0.12 | 0.024 | 0.14 | 0.12 | 0.51 | 0.92 |
| PA | 0-18 | 5.52 | 4.80 | 0.04 | 0.024 | 0.15 | 2.05 | 1.96 | 0.15 |
| | 18-42 | 5.64 | 5.10 | 0.03 | 0.024 | 0.15 | 0.23 | 1.60 | 0.41 |
| | 42-59 | 6.27 | 5.33 | 0.02 | 0.024 | 0.15 | 1.17 | 1.18 | 0.15 |
| | 59-70 | 6.30 | 5.40 | 0.03 | 0.024 | 0.15 | 0.18 | 1.18 | 0.81 |
| | 70- | 6.33 | 5.47 | 0.03 | 0.024 | 0.15 | 0.88 | 0.62 | 0.51 |
| BPQ | 0-5 | 5.41 | 4.55 | 0.02 | 0.023 | 0.13 | 0.88 | 2.47 | 2.09 |
| | 5-12 | 5.34 | 4.54 | 0.03 | 0.023 | 0.13 | 0.12 | 2.06 | 1.02 |
| | 12-32 | 6.20 | 5.66 | 0.10 | 0.025 | 0.15 | 0.15 | 0.98 | 0.46 |
| | 32-38 | 5.40 | 4.42 | 0.06 | 0.023 | 0.13 | 0.88 | 1.13 | 1.78 |
| | 38-52 | 5.56 | 4.35 | 0.05 | 0.023 | 0.13 | 1.46 | 0.93 | 0.15 |
| | 52-76 | 6.01 | 4.87 | 0.02 | 0.023 | 0.13 | 1.76 | 0.51 | 0.10 |
| | 76- | 5.72 | 5.32 | 0.02 | 0.023 | 0.13 | 0.23 | 0.98 | 0.25 |

| Perfil | Prof. (cm) | pH (agua) | pH (CaCl ₂) | CE (dS·m ⁻¹) | P ₂ O ₅ cmol·kg ⁻¹ | K ⁺ cmol·kg ⁻¹ | NH ₄ ⁺ cmol·kg ⁻¹ | Ca ²⁺ cmol·kg ⁻¹ | Mg ²⁺ cmol·kg ⁻¹ |
|--------|------------|-----------|-------------------------|--------------------------|---|--------------------------------------|--|--|--|
| | 0-19 | 5.35 | 4.49 | 0.03 | ND | 0.15 | ND | 1.25 | 0.43 |
| | 19-36 | 5.80 | 5.26 | 0.01 | ND | 0.10 | ND | 0.60 | 0.40 |
| | 36-76 | 6.10 | 5.12 | 0.01 | ND | 0.05 | ND | 0.55 | 0.45 |
| PCu | 76-99 | 5.35 | 4.14 | 0.01 | ND | 0.08 | ND | 0.49 | 0.60 |
| | 99-146 | 5.24 | 4.44 | 0.01 | ND | 0.08 | ND | 0.49 | 0.62 |
| | 146-178 | 5.80 | 4.66 | 0.01 | ND | 0.07 | ND | 0.34 | 0.64 |
| | 178- | 6.03 | 5.63 | 0.01 | ND | 0.04 | ND | 0.24 | 0.62 |

Tabla A4.2. Continuación

| Perfil | Prof. (cm) | Cl ⁻ cmol·kg ⁻¹ | Fe ²⁺ cmol·kg ⁻¹ | SO ₄ ²⁻ cmol·kg ⁻¹ | % MO | %CaCO ₃ ⁻ |
|--------|------------|---------------------------------------|--|---|------|---------------------------------|
| | 0-12 | 0.226 | 0.447 | 0.003 | 5.91 | 1.10 |
| | 12-27 | 0.169 | 2.680 | 0.109 | 2.63 | 1.14 |
| AG | 27-43 | 0.169 | 0.000 | 0.006 | 1.70 | 1.23 |
| | 43-67 | 0.141 | 0.447 | 0.062 | 0.49 | 1.39 |
| | 67- | 0.169 | 0.895 | 0.025 | 0.93 | 1.08 |
| | 0-21 | 0.226 | 0.000 | 0.109 | 4.93 | 1.32 |
| C | 21-43 | 0.169 | 0.447 | 0.003 | 0.66 | 1.46 |
| | 43-72 | 0.113 | 0.447 | 0.004 | 3.07 | 1.39 |
| | 72- | 0.169 | 0.447 | 0.062 | 2.74 | 1.42 |
| | 0-18 | 0.226 | 0.447 | 0.062 | 4.11 | 1.68 |
| | 18-42 | 0.085 | 0.895 | 0.003 | 3.61 | 0.87 |
| PA | 42-59 | 0.169 | 0.000 | 0.062 | 1.26 | 0.94 |
| | 59-70 | 0.141 | 0.895 | 0.109 | 0.99 | 0.92 |
| | 70- | 0.169 | 0.895 | 0.004 | 1.10 | 0.78 |

| Perfil | Prof. (cm) | Cl ⁻ cmol·kg ⁻¹ | Fe ²⁺ cmol·kg ⁻¹ | SO ₄ ²⁻ cmol·kg ⁻¹ | % MO | %CaCO ₃ ⁻ |
|--------|------------|--|---|--|------|---------------------------------|
| BPQ | 0-5 | 0.169 | 1.790 | 0.025 | 5.70 | 1.30 |
| | 5-12 | 0.226 | 0.895 | 0.025 | 5.59 | 1.42 |
| | 12-32 | 0.169 | 0.000 | 0.025 | 3.50 | 1.32 |
| | 32-38 | 0.226 | 0.447 | 0.109 | 3.34 | 0.98 |
| | 38-52 | 0.226 | 0.895 | 0.094 | 1.53 | 0.99 |
| | 52-76 | 0.141 | 0.895 | 0.000 | 1.04 | 0.96 |
| | 76- | 0.282 | 0.447 | 0.000 | 0.60 | 0.94 |
| PCu | 0-19 | ND | ND | ND | 5.10 | ND |
| | 19-36 | ND | ND | ND | 2.60 | ND |
| | 36-76 | ND | ND | ND | 2.20 | ND |
| | 76-99 | ND | ND | ND | 2.00 | ND |
| | 99-146 | ND | ND | ND | 1.30 | ND |
| | 146-178 | ND | ND | ND | 0.80 | ND |
| | 178- | ND | ND | ND | 2.00 | ND |

Tabla A4.2. Continuación

