



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

MAESTRÍA EN ECOLOGÍA INTEGRATIVA

Instituto de Investigaciones
sobre los Recursos Naturales

REGÍMENES DE INCENDIOS Y SUS
EFECTOS EN SUELOS FORESTALES DE LA
FRANJA AGUACATERA

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

PRESENTA

Luis Daniel Olivares Martínez

DIRECTOR DE TESIS: Dr. Alberto Gómez-Tagle Chávez

CO-DIRECTOR DE TESIS: Dr. Diego R. Pérez Salicrup

MORELIA, MICHOACÁN

AGOSTO, 2020

Agradecimientos

Hay mucha gente a la que me gustaría agradecer. Ha sido un proceso largo y ambicioso que no hubiera podido concretarse de no haber sido por todos ustedes.

Primeramente me gustaría agradecer a la tía Cony, que con su beca a mi CVU 588502 me fue posible financiar mis estudios e irme de estancia a tierras andaluzas e ilicitanas. A Beto, que fue mi papá académico en este proceso; me enseñó desde cosas de plomería y cómo usar la caladora hasta el arte zen de la infiltrometría. A Diego como mi otro papá académico, un tipo de papá distante, pero sí como papá académico a final de cuentas; me dio varios empujoncitos que me forzaron a mejorar este proyecto exponencialmente. Al Dr. Beto (papá Tagle) le agradezco mucho su orientación y adentramiento a los temas forestales y morfométricos riparios, me serán muy útiles para mi enfoque laboral.

A Gael, a Arturo, a Angeluki de Triana, a Diana (la estudiante), a Lorena y a Fuensanta, pero especialmente a Antonio Jordán y Jorge Mataix. Me abrieron las puertas no sólo a sus interesantes líneas de investigación, sino a sus hogares y hasta a sus familias y amigos. A mis nuevos amiguitos y futuros colegas Inês, Raouf, Mine, Gustavo; nuestro grupo de la ONU con su lema “this soil is on fire” al ritmo de Rihanna me lo llevo para largo.

A todos del laboratorio de Beto: “Palta 10.4 cambio”, gracias por tolerarme en cada seminario y por acompañarme casi todo este proceso. Gracias Mariela por todo, en verdad, por todo. Edgar y Alondra, les agradezco por permitirme cotutorarles junto a Beto, así como apoyarme en campo; aprendí mucho de todo el proceso de ayudarles con cosas de infiltrometría y suelos. A Altagracia y Ruben muchas gracias por compartirme sus experiencias y enseñarme cosas en campo mientras me acompañaban; ya no pude ser su chofi, lo siento. Igualmente gracias por su apoyo en campo a Alexis, Michelle, Octavio e Isis.

Clara Migoya, muchas gracias por abrirme tus puertas en Tepoz y en Tucsón; el escucharme cuando lo necesitaba y esas largas e intermitentes conversaciones me ayudaron más de lo que creo que te imaginas. Andrés Piña, gracias por abrirme las puertas de tu casa en un momento tan raro de mi vida (a pesar de tus discriminaciones irracionales de traer el Cobi conmigo). A mis 7 compañeritos postraumáticos, porque a pesar de ser relegados del posgrado nos hemos sabido apoyar cuando se ha ocupado.

Todas aquellas personas que de forma directa o indirecta coadyuvaron al desarrollo y término de este proceso: GRACIAS.

Índice de contenidos

Resumen.....	1
Summary.....	2
Introducción.....	3
Objetivos del trabajo.....	5
Los regímenes de incendios dentro de la franja aguacatera.....	7
Objetivos.....	7
Marco conceptual.....	7
Ecología de Disturbios.....	7
Regímenes de Incendios.....	8
Sitio de estudio.....	9
Materiales y métodos.....	10
Resultados.....	15
Relación con el fenómeno de la Oscilación del Sur-El Niño (ENSO).....	24
Discusión.....	26
Conclusiones.....	28
Reflexiones sobre la metodología.....	29
Características ecológicas de incendios de extensión reducida y baja reincidencia en la franja aguacatera.....	32
Objetivos.....	32
Marco conceptual.....	32
Tipos de Incendios.....	33
Sitios de estudio.....	35
Materiales y métodos.....	37
Dasometría de los sitios.....	37
Descripción del sitio y de sus perfiles de suelo.....	38
Infiltrómetros de tensión INDI.....	39
Ensayos de infiltración.....	40
Toma de muestras de suelo y análisis de laboratorio.....	41
Análisis estadísticos.....	42
Resultados.....	44
Remanentes forestales.....	44
Características edáficas.....	45
Infiltración e hidrofobicidad de los suelos.....	47
Interacciones ecológicas fuego-vegetación-suelo.....	50
Cluster 1 - color negro.....	52
Cluster 2 - color verde oscuro.....	52

Cluster 3 - color rojo.....	53
Cluster 4 - color azul marino.....	54
Cluster 5 - color rosa.....	54
Cluster 6 - color amarillo.....	55
Cluster 7 - color azul claro.....	56
Cluster 8 - color naranja.....	57
Cluster 9 - color café.....	58
Cluster 10 - color morado.....	58
Cluster 11 - verde claro.....	59
Discusión.....	60
Atributos destacables de los regímenes de fuego.....	60
Fuegos y erosión.....	65
Conclusiones.....	66
Efectos de la reincidencia de incendios en propiedades hidrofísicas de suelos forestales.....	68
Objetivos.....	68
Marco conceptual.....	68
Resiliencia, memoria edáfica y funciones del suelo.....	69
Principios físicos en la infiltración de suelos.....	72
Materiales y métodos.....	74
Comparaciones hidrofísicas en la superficie del suelo entre regímenes.....	74
Análisis de propiedades hidrofísicas en pisos verticales.....	76
Correcciones al ángulo de contacto.....	76
Análisis del espacio poroso.....	78
Resultados.....	80
Discusión.....	85
Efectos hidrológicos de los regímenes de incendios.....	87
Conclusiones.....	89
Discusión General.....	90
Conclusiones.....	93
Referencias.....	94
Anexos.....	106
Vegetación en Santa Rita.....	121
Vegetación en La Yácata.....	126
Vegetación en Pinera Miguel.....	130
Vegetación en Crucitas.....	134

Índice de figuras

Figura 1. Distribución de las huertas de aguacate en 22 municipios de la franja aguacatera (figura obtenida de Gutiérrez-Contreras <i>et al.</i> , 2010).....	9
Figura 2. Distintas posibilidades para considerar geográficamente el área y la ubicación de la coordenada registrada para cada incendio.....	12
Figura 3. Ejemplos de la intersección de incendios para este análisis geográfico.....	12
Figura 4. Estacionalidad de la cantidad y extensión promedio de incendios con sus respectivas barras de error estándar.....	17
Figura 5. Acumulado mensual de la extensión de incendios.....	18
Figura 6. Variación de las hectáreas incendiadas por temporada lluviosa y seca o de estiaje con sus promedios indicados con líneas.....	18
Figura 7. Distribución de los incendios y factores antrópicos.....	19
Figura 8. Concentrado anual de las causas de los incendios.....	20
Figura 9. Distribución de las temperaturas máximas y mínimas.....	22
Figura 10. Relación log-log entre la extensión y la duración de los incendios.....	22
Figura 11. Variación del número y extensión de incendios mensuales entre 2000 y 2017.....	24
Figura 12. Comparación entre la extensión mensual quemada según el ONI.....	25
Figura 13. Ubicación de los sitios de estudio.....	35
Figura 14. Diagrama del diseño de muestreo en campo.....	37
Figura 15. Diagrama del análisis de coberturas.....	38
Figura 16. Las partes principales de un INDI: reservorio (1), base (2) y tubo de Mariotte (3).....	40
Figura 17. Cambios post-incendio en la cobertura y la dominancia de los estratos vegetales arbóreo (verde), arbustivo (azul) y herbáceo (rojo). Los valores con líneas sólidas muestran una correlación con el tiempo post-incendio.....	45
Figura 18. Variación explicada por los componentes del PCA (<i>Scree plot</i>).....	50
Figura 19. Interacción entre variables ecológicas agrupadas por colores según análisis de k-means. Las flechas indican la similitud entre sitios: Santa Rita (SR), La Yácata (LY), Pina Miguel (PM) y Crucitas (CR).....	51
Figura 20. Sistema de galerías tras el incendio subterráneo de La Yácata.....	61
Figura 21. Relación de la altura de cicatrices con la conductividad eléctrica (triángulos), la materia orgánica (cuadros) y la densidad arbórea (círculos).....	64
Figura 22. Ejemplo de la aplicación del concepto de resiliencia al suelo.....	71
Figura 23. Modelo modelo <i>quasipoisson</i> (línea roja) para la calibración de los ángulos de contacto.....	77
Figura 24. Parámetros de infiltración entre tipo y reincidencia de incendios. Entre paréntesis se indica la cantidad de incendios en los últimos 20 años.....	80
Figura 25. Influencia del α de Gardner en la macroporosidad.....	82
Figura 26. Influencia del ángulo de contacto a la infiltración.....	84

Índice de tablas

Tabla 1. Conteo de incendios por año y municipio para el periodo 2000-2017.....	15
Tabla 2. Distribución de distancias de incendios a factores antrópicos.....	20
Tabla 3. Variables climáticas en la región y en los días con incendios.....	21
Tabla 4. Correlaciones de <i>Pearson</i> con la extensión anual de los incendios.....	23
Tabla 5. Comparación entre modelos de la frecuencia de los incendios.....	23
Tabla 6. Resumen de todos los meses de estudio en relación al ENSO.....	25
Tabla 7. Características principales de los 4 sitios de estudio.....	36
Tabla 8. Claves de variables edáficas, dasométricas y geográficas.....	42
Tabla 9. Resumen de análisis de laboratorio de los suelos estudiados.....	46
Tabla 10. Conductividad hidráulica y <i>alpha</i> de Gardner en los sitios de estudio.....	48
Tabla 11. Parámetros dinámicos de hidrofobicidad en los sitios de estudio.....	49
Tabla 12. Modelos de hidrofobicidad significativos.....	49
Tabla 13. Índices para determinar el mejor número de K-means.....	50
Tabla 14. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 1.....	52
Tabla 15. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 2.....	53
Tabla 16. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 3.....	53
Tabla 17. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 4.....	54
Tabla 18. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 5.....	55
Tabla 19. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 6.....	56
Tabla 20. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 7.....	56
Tabla 21. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 8.....	57
Tabla 22. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 9.....	58
Tabla 23. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 10.....	58
Tabla 24. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 11.....	59
Tabla 25. Energía liberada según tamaño de las cicatrices como altura de la llama.....	65
Tabla 26. Resumen de las características de los sitios comparados.....	75
Tabla 27. Rangos de tamaños de poros sugeridos por Luxmoore (1981).....	79
Tabla 28. Modelos de regresión linear múltiple entre regímenes de incendios.....	81
Tabla 29. Parámetros hidro-físicos entre los tres pisos de profundidad.....	82
Tabla 30. Modelos de regresión linear múltiple significativos.....	83

Índice de ecuaciones

Ecuación 1.	22
Ecuación 2. Ecuación de Gardner (1958).....	41
Ecuación 3. Ecuación de Wooding (1968). Base para el ajuste no lineal propuesto por Logsdon y Jaynes.....	41
Ecuación 4. Ajuste no lineal de Logsdon y Jaynes (1993). Donde $q_{\infty}/\pi r^2$ es el flujo lineal en estado estacionario. Las demás variables tienen la misma notación que las ecuaciones antes presentadas.	41
Ecuación 5. Ecuación de Darcy Donde Q es la descarga total, k es el coeficiente de permeabilidad, A es el área de la sección cruzada del medio poroso, L la longitud del medio, ΔP la caída de presión ($P_f - P_i$), μ la viscosidad del fluido.....	74
Ecuación 6. Donde θ es el ángulo de contacto calibrado ($^{\circ}$) y α_{MED} el ángulo de contacto obtenido por el método de molaridad del etanol ($^{\circ}$).....	78
Ecuación 7. Ecuación de Jurin (1718).....	78
Ecuación 8.	78
Ecuación 9. Ecuaciones de métricas de porosidad.....	79

Resumen

En el estado de Michoacán se maneja casi el 50% del comercio mundial de aguacate. El fuego ha sido un componente asociado con los procesos regionales de cambio de uso del suelo, incluida la transformación de bosques dominados por *Pinus-Quercus* a huertos de aguacate. En la primera parte de este estudio, se documentaron los atributos del régimen de incendios en fragmentos forestales de la franja aguacatera y se evaluó la influencia climática y humana sobre los incendios. En la segunda parte, se evaluaron los efectos dasométricos y edáficos del fuego superficial y la combustión latente en cuatro rodales *Pinus-Quercus* de la franja aguacatera. Se agregaron dos sitios adicionales de referencia en un tercer capítulo de la segunda parte para evaluar los efectos del fuego en las variables hidrofísicas del suelo.

Entre 2000 y 2017 hubo 5.511 incendios que cubrieron un área acumulada de 1.080.200 ha. Hubo una media de 276 incendios que quemaron un promedio de 3.287 ha de bosque por año. Más del 80% de la superficie quemada estaba cubierta por fragmentos de pino y bosque *Pinus-Quercus*. El intervalo de retorno de fuego tuvo una mediana de 2.5 años. La distancia a los asentamientos urbanos, a las carreteras, a la frontera agrícola y a las huertas de aguacate se relacionó inversamente con la ocurrencia de incendios. La distancia a los huertos de aguacate más las carreteras principales fueron los mejores predictores de recurrencia de incendios. Estos atributos del régimen de incendios estuvieron asociados con los incendios provocados, que podrían servir para expandir el área de cultivo de aguacate a expensas de los fragmentos de bosque.

Los suelos caracterizados de la parte dos fueron tres Andosols y un Alisol en fragmentos de bosque *Pinus-Quercus*. Se identificaron correlaciones ecológicas importantes como la longitud de la llama, la presencia de *Quercus* quemados, la conductividad eléctrica y la densidad arbórea; la profundidad de fragmentos de carbón y la hidrofobicidad del suelo; o la densidad de herbáceas y la conductividad hidráulica. La recurrencia del fuego afectó la porosidad del suelo, positivamente en incendios latentes y negativamente en incendios superficiales. La conductividad hidráulica fue resiliente en los Andosols estudiados.

Palabras clave: Reincidencia de incendios, regímenes de disturbio, bosques de pino encino, Andosol, combustión latente.

Summary

Michoacan, in Central Mexico, supplies nearly 50 % to global avocado trade. Fire has been a component associated with regional land-use change processes, including the transformation from *Pinus-Quercus* dominated forest to avocado orchards. In the first part of this document the fire regime attributes on forest fragments of the Avocado-growing strip are documented, and the partial role of climate and human infrastructure on fires upon them was evaluated. In the second part the dasometric and edaphic effects of superficial and smoldering fire were evaluated on four *Pinus-Quercus* stands of the Avocado-growing strip. Two reference stands were added in a third chapter of the second part of the document in order to evaluate the fire effects on soil hydrophysic variables.

Forest fire databases were obtained for the period 2000-2017 for 19 municipalities. Between 2000 and 2017 there were 5,511 fires which covered a cumulative area of 1,080,200 ha. There was a mean of 276 fires that burned an average of 3,287 ha of forest per year. Over 80% of the burned surface were covered by pine and *Pinus-Quercus* forest fragments. The fire return interval had a median of 2.5 years. Distance to urban settlements, roads, the agricultural frontier, and avocado orchards was inversely associated with fire occurrence. The distance to avocado orchards plus main roads were the best predictors of fire recurrence. These fire regime attributes were associated with local fire use to expand avocado orchards at the expense of forest fragments.

The soils characterized were *Andosols* and one *Alisol* on *Pinus-Quercus* forest fragments. Important ecologic correlations were identified like flame length, presence of *Quercus* burned, electric conductivity and tree density; depth of charcoal fragments and soil hydrophobicity; or herb density and hydraulic conductivity. The fire recurrence affected the soil porosity, positively on smoldering fires and negatively otherwise. The hydraulic conductivity was resilient on the *Andosols* studied.

Key words: Reburn fire, disturbance regimes, *Pinus Quercus* forests, *Andosol*, smoldering fire.

Introducción

El aguacate es un fruto cuyo consumo ha ido creciendo rápidamente en todo el mundo y México ha sido líder en sus exportaciones. Asimismo, aunque la producción de México representa un 45.95% de las exportaciones mundiales, es Michoacán donde realmente se ha producido más del 85% del aguacate nacional (Tapia Vargas *et al.*, 2014; SIAP, s.f.). Sus ganancias han ido creciendo rápidamente a más de \$2,700 millones de dólares por año (SIAP, 2020). Toda esta producción, la cual abastece buena parte de la demanda mundial, se concentra en un lugar conocido como la franja aguacatera michoacana o "Avocadoland" en la publicidad internacional (Gutiérrez-Contreras, 2010; APEAM, Olivares-Martínez *et al.*, en proceso).

A pesar de la derrama económica inmediata que trae consigo la producción de este fruto, el cambio de uso del suelo no planificado e indiscriminado sobre diferentes tipos de terrenos ha traído como consecuencia la irremediable degradación del recurso suelo (Ortíz Paniagua, 2017). De forma que resulta alarmante que el crecimiento de este cultivo se realice de forma no planificada, ya que en menos de diez años ha duplicado su superficie cultivada (Barsimantov, 2014; Tapia Vargas *et al.*, 2014).

Muchas de las huertas que ahora producen aguacates se han establecido mediante cambios de uso, primero de agricultura de temporal hacia huertas y posteriormente, al reducirse la disponibilidad de terrenos, pasó de cobertura forestal a huertas. Por otro lado, existen perturbaciones ecológicas vinculadas a esta actividad agrofrutícola, principalmente son la erosión de los suelos, la deforestación y la degradación vegetal (Reyes González, 2014). Actualmente se sabe que al menos parte de los efectos de estas actividades son muchas veces conocidos y entendidos por quienes los realizan, no obstante, una suerte de presión económica externa y una ambición monetaria interna motivan las actividades de cambio de uso que han realizado muchos de los productores en esa región (Barsimantov, 2012; Reyes González, 2014).

Debido a lo anteriormente expuesto, durante la última década ha existido una presión de deforestación elevada en áreas de bosque remanentes en la franja aguacatera (Reyes González, 2014). Se ha observado que una de las herramientas para el cambio de uso es el uso de incendios provocados en zonas forestales (Barsimantov, 2012; Pérez-Medrano, comunicación personal).

Los incendios han sido un tema bastante controversial en México y el mundo, donde las últimas décadas han estado caracterizadas por un prejuicio negativo en torno a su existencia y a su efecto en los ecosistemas.

Aunque los fuegos de alta intensidad y magnitud propician escenarios de degradación, también se reconoce que todos los tipos de incendios ocasionan cambios en el contenido de nutrientes y cationes intercambiables en el suelo superficial, los cuales derivan en mayor fertilidad química de los sitios y en una reducción del riesgo de mega-incendios catastróficos (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003; Smith *et al.*, 2005; Martínez-Torres *et al.*, 2015). Otros de los efectos de la deforestación, y de los incendios asociados, son la pérdida del material que conforma a los suelos mediante procesos de erosión o combustión (Neary *et al.*, 1999; Chazdon, 2003; Mataix-Solera *et al.*, 2007).

El suelo es un recurso muy importante para la biósfera, es considerado como no renovable debido a su largo proceso de génesis en relación con la vida humana (Blum, 2005). Desafortunadamente en diversos lugares, los suelos se están degradando a tasas alarmantes. Al perderse el suelo se disminuye invariablemente el potencial máximo que puede alcanzar la productividad de los ecosistemas y sus pérdidas no se podrán recuperar en tiempos humanos (Daily, 1995; Apfelbaum y Haney, 2010), pues tardarían decenas de miles de años en restablecerse.

Tanto la producción, como los ingresos generados de cualquier cultivo, incluyendo al aguacate, depende en gran medida de las características del recurso suelo. Si este se pierde, el daño normalmente resulta irreversible y en escala humana de tiempo, no se podrán volver a ver jamás las ganancias y beneficios de los tiempos de bonanza. Por ello, se deben generar e implementar estrategias integrales para la conservación y restauración del suelo al tiempo que se indaga en la forma de habilitar regolitos de sitios altamente degradados o de pedogénesis muy incipiente para su aprovechamiento.

Tanto la generación como la implementación de dichas estrategias para el manejo adecuado de los suelos es necesario para regenerar su calidad y salud, para restablecer parte de la diversidad de los ecosistemas que sostiene y para mejorar las condiciones económicas, de seguridad y de salud de las poblaciones para quienes dicho suelo articula su territorio.

Objetivos del trabajo

A continuación se presentan los objetivos generales para este proyecto de investigación, así como los objetivos particulares que se desprenden de cada uno.

1 Caracterizar los regímenes de disturbio por incendios en la franja aguacatera michoacana

- 1.a Organizar y sistematizar los registros de incendios en los municipios de la franja aguacatera michoacana
- 1.b Analizar espacial y temporalmente los atributos de los regímenes de incendios en la franja aguacatera michoacana

2 Caracterizar las asociaciones entre variables ecológicas en parcelas afectadas por incendios pequeños y poco frecuentes

- 1.a Caracterizar los componentes dasométricos de sitios forestales con distintos tiempos post-incendio
- 1.b Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los suelos bajo uno de los regímenes típicos de incendios de la franja aguacatera michoacana.
- 1.c Evaluar interacciones entre variables dasométricas y edáficas en sitios con regímenes de incendios similares.

3 Evaluar los efectos de incendios superficiales y subterráneos sobre las propiedades hidrofísicas del suelo

- 1.a Analizar la influencia de incendios superficiales y subterráneos menores a 5 ha y de baja recurrencia a la hidrofobicidad, al espacio poroso y a la conductividad hidráulica vertical del suelo.
- 1.b Analizar la interacción entre variables hidrofísicas de infiltración, porosidad e hidrofobicidad.

PARTE 1

**Los regímenes de incendios
dentro de la franja aguacatera**

Los regímenes de incendios dentro de la franja aguacatera

Para poder entender los efectos de los incendios en los suelos de la franja aguacatera es preciso entender primero cómo ocurren y qué factores regulan su existencia. Es por ello que en esta sección de un único capítulo se explorarán las razones económicas, climáticas y sociales detrás de los incendios forestales naturales y provocados de esta importante región productora michoacana.

Objetivos

1 Caracterizar los regímenes de disturbio por incendios en la franja aguacatera michoacana

- 1.a Organizar y sistematizar los registros de incendios en los municipios de la franja aguacatera michoacana
- 1.b Analizar espacial y temporalmente los atributos de los regímenes de incendios en la franja aguacatera michoacana

Marco conceptual

Ecología de Disturbios

El enfoque de ecología de disturbios surge en 1984 con el artículo de Sousa *The role of disturbance in natural communities*, así como con el reconocido libro de Pickett y White (1985) *Ecology of Natural Disturbances and Patch Dynamics*. A partir de entonces se han desarrollado trabajos que exploran sus características según diversos agentes causales como fuego o caídas de árbol (e.g. Martínez-Ramos *et al.*, 1988; Foster & Boose, 1992; Capulín Grande *et al.*, 2010), y que demuestran su importancia en el funcionamiento de los ecosistemas, lo que deriva en consecuencias importantes en la conservación biológica o la restauración ecológica (SER, 2004).

A pesar de la creciente aceptación de que los disturbios naturales son necesarios para mantener a los ecosistemas como sistemas diversos y en estados estables, los disturbios humanos no dejan de estar en entredicho a este respecto. Se ha mostrado que los disturbios humanos pueden ser un agente de degradación en el corto o largo plazo (Scoones *et al.*, 1999; Vega y Peters, s.f.) y que, casi invariablemente, llevan a la pérdida de los ecosistemas manejados. A pesar de ello, no hay

claridad en por qué un disturbio humano es inherentemente negativo o, en su defecto, a partir de qué punto un disturbio humano se vuelve degradativo.

Regímenes de Incendios

Existen componentes de los regímenes de disturbio específicos para entender el conjunto de los eventos de incendios, los cuales son severidad, intensidad, extensión, frecuencia, intervalo de retorno, duración, estacionalidad y tipo de parche (Agee, 1993; Calderón-Aguilera *et al.*, 2012).

- **Severidad.** Pérdida relativa y alteraciones en la biomasa de un ecosistema.
- **Intensidad.** Energía total liberada durante un incendio.
- **Duración.** Tiempo transcurrido desde que inicia un fuego hasta que se extingue.
- **Extensión.** Área afectada por un incendio dado.
- **Frecuencia.** Periodo de tiempo que transcurre entre un evento y otro.
- **Intervalo de retorno.** Tiempo que transcurre para que toda un área dada haya sido afectada por incendios.
- **Estacionalidad.** Parte del año donde preferentemente ocurren los incendios.
- **Tipo de parche.** Conectividad y tipo de hábitat generado tras el incendio, puede haber parches envueltos por una matriz conservada o aislados dentro de una matriz de ecosistemas degradados.

Los incendios en México han estado asociados a actividades agrícolas y pecuarias (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003). Las motivaciones detrás de los incendios provocados atienden principalmente a razones monetarias (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003); sin embargo, existen múltiples propósitos en diversas escalas e ídoles detrás de los incendios provocados, motivaciones culturales y económicas. Es necesario entender la ecología de los sistemas forestales donde ocurren incendios como la de los remanentes forestales de la franja aguacatera; un manejo sostenible de estos recursos debería garantizar la estabilidad del recurso bosque, los servicios ecosistémicos que proporciona, así como la conservación del recurso suelo.

Sitio de estudio

La zona conocida como la *Franja Aguacatera* es un área donde se concentra la principal producción en huertas del país, la cual muchas veces se dedica a exportación para abastecer la demanda internacional (Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010). Se encuentra distribuida en la provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico entre las coordenadas 18°45' y 20°06'N y entre 101°47' y 103°13'O.

El cultivo se localiza desde 1100 hasta los 2900 msnm. En esta variación predominan los climas semicálidos (46,16%), cálidos (22,75%) y templados (22,29%); por otro lado climas como los semifríos ocupan menos del 8.8% de la superficie total. Más del 86% de la superficie recibe precipitaciones entre los 1000 y los 1500 mm anuales, sin embargo, pueden llegarse a plantar aguacates en zonas menos húmedas de hasta 800 mm anuales (INEGI, 1985; Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010). La época lluviosa comienza entre mediados de mayo y principios de junio a octubre para básicamente toda la franja aguacatera. La temporada de estiaje se puede subdividir en una que es seca y fría, de noviembre a febrero, y otra seca y cálida en marzo y abril.

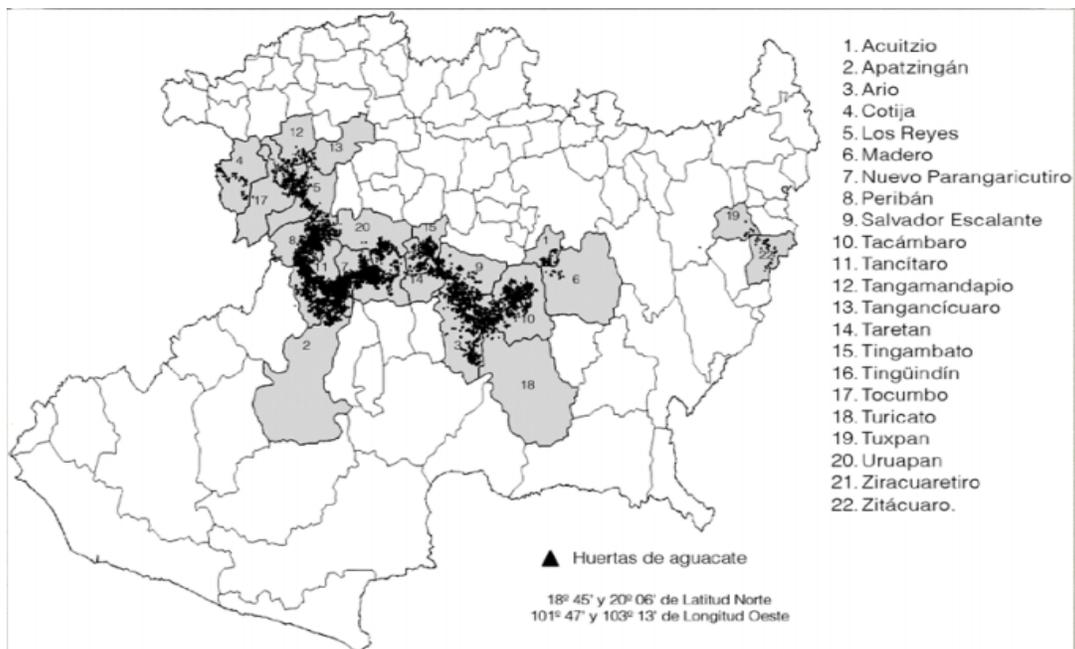


Figura 1. Distribución de las huertas de aguacate en 22 municipios de la franja aguacatera (figura obtenida de Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010)

La superficie dedicada a la producción en huertas de aguacate se encuentra principalmente en los municipios de Tancítaro (24.76%), Uruapan (12.36%) y Ario de Rosales (10.76%). Los tipos de suelos más dominantes son los Andosoles, Luvisoles, Alisoles, Feozem y los

Acrisoles (INEGI, 1985; Gutiérrez-Contreras *et al.*, 2010; observación personal).

La superficie dedicada a la producción en huertas de aguacate ha ido incrementando de forma acelerada en los últimos años. Entre 2003 y 2014 la superficie aumentó de 5 200 a 11 600 ha (Tapia Vargas *et al.*, 2014). Esta producción se ha establecido en terrenos que previamente fueron bosques de coníferas, sin embargo, también se han establecido huertas en sitios reemplazando selva baja caducifolia y pastizales (Bravo-Espinosa *et al.*, 2014).

Materiales y métodos

Se homogeneizaron y unificaron las bases de datos de dos instituciones gubernamentales dedicadas al combate de incendios en el estado de Michoacán, una de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) y otra de la Comisión Forestal del estado de Michoacán (COFOM) para el periodo 2000-2017 en 22 municipios de la franja aguacatera.

Se solicitó información para los siguientes municipios:

- 1 Acuitzio del Canje
- 2 Apatzingán
- 3 Ario de Rosales
- 4 Cotija
- 5 Los Reyes
- 6 Villa Madero
- 7 San Juan Nuevo Parangaricutiro
- 8 Peribán
- 9 Salvador Escalante
- 10 Tacámbaro
- 11 Tancítaro
- 12 Tangamandapio
- 13 Tangancicuaro
- 14 Taretan
- 15 Tingambato
- 16 Tingüindín
- 17 Tocumbo
- 18 Turicato
- 19 Tuxpan
- 20 Uruapan
- 21 Ziracuaretiro
- 22 Zitácuaro

Asimismo se solicitó explícitamente que se incluyeran campos sobre la ubicación de los incendios en valores de coordenadas geográficas y en referencia de predio, la extensión del incendio, el tipo de incendio y la fecha del incendio.

Cada registro en la base de datos corresponde a un incendio forestal, del cual se incluyen un par de coordenadas geográficas con las que sólo se puede visualizar un punto en alguna parte del área quemada, ya que no existen registros de las formas completas de dichos polígonos.

Asimismo, se incluyen campos alusivos al nombre de la localidad o predio donde ocurrió el incendio, su extensión, duración aproximada, el tipo de incendio y la fecha de ocurrencia. La información fue otorgada en cinco series de tiempo, dos de COFOM y tres de CONAFOR, en las cuales no todos los campos coincidían entre sí, además de que no todos los incendios presentaban información relativa a sus coordenadas o la presentaban con errores de dedo (typos). Se uniformizó la información en una única base de datos tras un proceso manual de revisión, depuración y limpieza de la información.

Se evaluaron algunos componentes del régimen de incendios. La estacionalidad y la duración se obtuvieron directamente de los campos registrados en la base de datos homogeneizada. Para la estacionalidad se consideró la variación del número de incendios y de su extensión promedio por mes a lo largo del año.

Se re proyectó la información de WGS84 a ITRF08. Este sistema de coordenadas cuenta un Spatial Reference System Identifier (SRID): EPSG 6372, una proyección cónica conforme de Lambert con elipsoide de referencia GRS 1980. En cada registro con coordenadas disponibles se le hizo un buffer circular, tomando como centroide la coordenada proporcionada por la base de datos. La superficie afectada por un incendio puede tener geometrías de formas muy variadas y al no contar con los vértices de las superficies incendiadas se asumió que todos los incendios tenían geometrías circulares.

Dado que el perímetro de un área incendiada puede tener muchas formas, las cuales *a priori* son desconocidas, se consideró que una forma circular tendría un menor error de omisión (Figura 2). Por otra parte, aunque la coordenada casi nunca se toma en el centro del parche del incendio (Espino, 2018, comunicación personal¹) se asumió que es el centroide del polígono con la finalidad de también tener los menores errores posibles de comisión y omisión cartográfica.

¹Ing. Jesús Espino. Técnico de CONAFOR con vasta experiencia en los registros de incendios por brigadistas de COFOM y de CONAFOR.

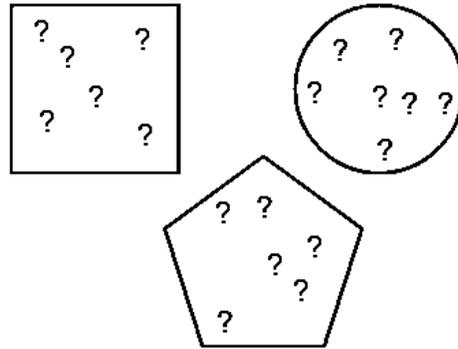


Figura 2. Distintas posibilidades para considerar geográficamente el área y la ubicación de la coordenada registrada para cada incendio

Se realizó un análisis áreas reincendiadas para poder estimar los intervalos de retorno, empleando el ambiente de programación estadística R v3.5.1 (R core Team, 2018) y sus paquetes *rgdal*, *raster*, *sp*, *dplyr*, *rgeos*, *lubridate*, *reshape2* y *tidytext*. Para ello se realizó una extracción de la información de los incendios considerando las intersecciones de los polígonos (Figura 3). Se construyó un objeto tipo lista, donde cada elemento de la lista era un subconjunto de la base de datos general según todos los polígonos intersecados por el área de un incendio dado.

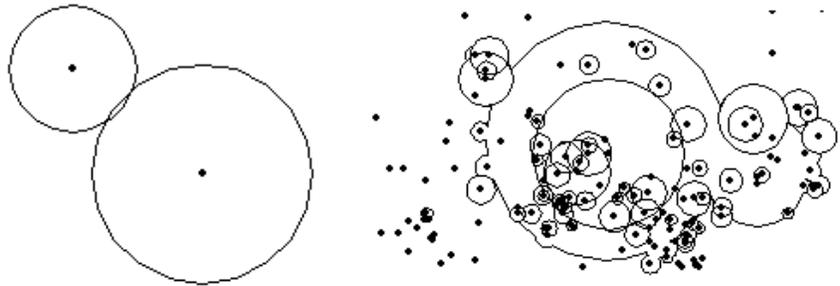


Figura 3. Ejemplos de la intersección de incendios para este análisis geográfico

Se filtraron de la lista todos los elementos redundantes, ya que la información de una misma intersección podía estar presente dos o más veces dentro de la lista. Lo anterior se debe a que el algoritmo empleado generaba elementos de la lista por polígono y no por intersección per se. Suponiendo un polígono A y uno B con una intersección entre ellos, la lista tendrá información de las intersecciones del polígono A más las intersecciones del polígono B.

Se sumó el número de incendios por intersección y se promedió el intervalo de retorno entre incendios cuando había reincidencia de fuegos dentro del periodo estudiado. Dicha información se asignó en una tabla de agregación donde cada fila correspondía con un elemento de la lista. Finalmente se asignó la información procesada a los polígonos originales. Es decir, a cada polígono se le calculó el promedio de los valores de frecuencia y del número de incendios de sus respectivas intersecciones.

Para conocer la relación entre variables climáticas y los regímenes de incendios se utilizaron a) la precipitación el día del incendio, b) la precipitación acumulada de los 30 días previos al incendio, c) la temperatura mínima el día del incendio, d) la temperatura máxima el día del incendio y e) la humedad relativa, a partir de los registros diarios de estaciones cercanas a cada uno de los incendios. Para ello se desarrolló un algoritmo de extracción y asociación a la base de datos de incendios ya mencionada con el software R v3.5.1 (R core Team, 2018). La humedad relativa se estimó de la temperatura media y mínima de cada registro diario y con la asunción de que la temperatura mínima es igual a la temperatura de rocío, según los estándares de la FAO (Allen *et al.*, 2006).

Se minaron datos de 136 estaciones activas e inactivas de la Comisión Nacional de Aguas (CNA) que tienen registros diarios de precipitación, evaporación, temperatura mínima y máxima (algunos hasta desde 1921), así como de 31 estaciones particulares de la Asociación de Productores de Aguacate de México (APEAM), las cuales tienen registros cada hora de todas las variables climáticas de interés desde el 1 de abril del 2010 a la fecha. Se realizaron pruebas de normalidad Shapiro-Wilk y Lilliefors (Kolomorov-Smirnov) con el software R v3.5.1 (R core Team, 2018) y se contrastó la información obtenida mediante análisis de U de Mann-Whitney-Wilcoxon, U de Kruskal-Wallis, de Conover-Iman, de Bonferroni y de GLM.

La forma de asociación entre una estación y un incendio fue mediante polígonos de Thiessen-Voronoi construidos a partir de las ubicaciones de las estaciones climáticas. Se generó una capa poligonal para las estaciones activas de la CNA, otra para las activas más inactivas de la CNA y otra más para las estaciones de la APEAM. Dada su resolución y calidad se dio prioridad a los datos de las estaciones de la APEAM. Si un registro estaba fuera del periodo temporal o del área cubierta por los polígonos de Thiessen-Voronoi de la APEAM se recurrió a las estaciones de la CNA, primero a sus estaciones activas y luego a todas sus estaciones, tanto activas como inactivas. En algunos casos no había registros climáticos para la estación asignada con un incendio,

en dichos casos se asoció la información climática con el método de distancias mínimas euclidianas donde se establecía una matriz de las 10 estaciones más cercanas al incendio y se asignaban los valores de la más próxima de esas que tuviera información completa para el día de ese incendio.

Para entender la distribución espacial de los incendios y su relación con los factores sociales en la franja aguacatera se calcularon las distancias de los puntos de los incendios a 1) zonas agrícolas en general, 2) a huertas de aguacate, 3) a caminos y 4) a zonas urbanas. Los terrenos considerados como huerta de aguacate son según el inventario de Morales-Manilla y Cuevas (2011) generado con imágenes del 2007 a escala 1:20,000. La información geoespacial de presencia de zonas agrícolas, caminos y zonas urbanas corresponden a la información INEGI (2018) con escala 1:50,000.

Se compararon las distribuciones de distancias con una distribución de la misma cantidad de puntos, pero generados al azar, mediante la prueba estadística de U de Mann-Whitney-Wilcoxon con el uso del software R v3.5.1 (R core Team, 2018). Dichos puntos fueron generados dentro del área comprendida por los municipios analizados. Se hicieron modelos lineales generalizados con familia quasipoisson y link = log comparando tanto la frecuencia de los incendios y la extensión con la distancia a las cuatro zonas antrópicas antes mencionadas.

Dada su relación con cultivos, se indagó en la posible relación entre la extensión anual de los incendios y datos de producción anual agrícola (superficie total sembrada y producción de aguacate), según datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) obtenidos de la plataforma SIACON-NG (SIAP, 2019). Se realizaron correlaciones de Pearson desfasadas en el tiempo hasta por 10 años de diferencia, es decir, que la producción o la siembra se viera reflejada algunos años tras los incidentes de incendios. A partir de las mayores correlaciones entre las hectáreas sembradas y las toneladas de producción con la extensión de los incendios se hicieron pruebas de normalidad y se generaron modelos de regresión.

Debido a que la extensión y cantidad de los incendios presentaron una posible variación interanual, se analizó la relación entre la extensión y el número de incendios con el fenómeno conocido como *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO). Para esto, se agruparon a nivel mensual la extensión y número de incendios, así como la precipitación y las temperaturas máxima y mínima y se compararon con los valores reportados del Índice Oceánico Niño (ONI). El ONI sintetiza las desviaciones estándar de medias móviles trimestrales de la temperatura

en la superficie ecuatorial del Océano Pacífico (Huang et al. 2017). Posteriormente, se realizaron pruebas de Kruskal-Wallis y de Conover-Iman con el software estadístico R v3.5.1 (R core Team, 2018) comparando extensión y número de incendios entre tres categorías; meses "el niño", meses "la niña" y "meses promedio", según si el valor mensual del ONI fuera mayor, menor o intermedio, respectivamente, del rango de una desviación estándar de su promedio trimestral.

Resultados

Tras la unificación de las bases de datos, se obtuvo información referente a los incendios de entre 2000 y 2017 para 21 municipios de la franja aguacatera: Acuitzio del Canje, Apatzingán, Ario de Rosales, Cotija, Los Reyes, Peribán, Salvador Escalante, San Juan Nuevo Parangaricutiro, Tacámbaro, Tangamandapio, Tangancícuaro, Taretan, Tingambato, Tingüindín, Tocuambo, Turicato, Tuxpan, Uruapan, Villa Madero, Ziracuaretiro y Zitácuaro.

Tabla 1. Conteo de incendios por año y municipio para el periodo 2000-2017

Municipio	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Acuitzio	10	6	28	24	5	17	7	9	6	4	1	5	1	6	2	1	4	5
Apatzingán	1	3	3	8	6	13	14	11	7	12	3	2	4	1	0	2	0	1
Ario	17	12	15	17	24	26	44	37	63	46	25	36	28	45	25	21	25	18
Cotija	4	9	6	12	6	7	10	3	5	8	5	7	1	2	0	3	3	0
Los Reyes	27	6	18	28	24	34	29	23	27	19	19	29	15	29	19	7	15	21
Peribán	4	5	8	8	3	18	14	7	8	1	2	5	4	2	0	3	3	7
S. Escalante	21	2	12	43	33	36	33	28	33	14	8	27	14	23	6	3	25	30
Nvo Parang.	0	0	0	0	0	3	1	4	3	6	3	0	1	3	4	2	0	1
Tacámbaro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	23	22	0	17	12	3	17	19
Tangamand.	4	0	0	4	2	1	17	10	4	7	1	18	27	17	13	6	16	15
Tangancícuaro.	22	4	7	15	7	17	26	5	10	10	5	20	9	9	5	0	9	17
Taretan	5	1	2	1	5	3	6	9	6	3	1	7	6	12	3	0	8	8
Tingambato	18	11	18	14	14	12	34	35	49	22	13	19	14	42	19	2	11	13
Tingüindín	7	2	6	7	4	7	9	7	6	10	6	4	4	3	4	3	4	3
Tocuambo	7	8	3	4	21	8	18	8	4	9	7	5	8	4	4	6	11	7
Turicato	1	1	1	6	14	15	12	7	5	2	0	0	2	3	1	2	5	0
Tuxpan	7	15	5	12	6	7	17	10	23	7	8	30	12	13	7	1	11	22
Uruapan	42	32	39	37	59	61	80	54	125	110	49	107	90	113	50	38	64	75
Villa Madero	13	3	18	24	10	22	13	15	23	32	13	20	29	31	11	4	14	9
Ziracuaretiro	26	27	38	27	39	43	48	22	44	28	23	37	27	29	17	6	25	17
Zitácuaro	25	18	14	23	14	19	14	21	41	28	18	19	39	30	14	5	8	22
Total	261	165	241	314	296	369	446	325	492	378	233	419	335	434	216	118	278	310

Entre 2000 y 2017 se tiene registro de 5,630 incendios dentro de 21 municipios de la franja aguacatera. De estos registros, 4,698 cuentan con información que permite su georreferenciación (coordenadas). De igual forma, dos municipios no contaron con información de incendios para todos los años. Estos son Tacámbaro, cuyos registros comienzan a partir del 2010 y San Juan Nuevo Parangaricutiro, que cuenta con información a partir del 2005.

Cabe destacar que Uruapan concentra más del 15% de los incendios en todos los años, llegando en algunos a estar por encima del 30% de todos los incendios de los 21 municipios. Otros municipios con alta incidencia de incendios son Ziracuaretiro y Ario de Rosales, cuyos porcentajes oscilan entre el 5 y el 17%.

Por su parte, algunos municipios no se destacan constantemente por su alta actividad de incendios, sin embargo, llegan a tener años bastante activos en comparación al resto de los municipios, este es el caso de Salvador Escalante (años 2003 y 2004), Zitácuaro (años 2001 y 2012), Tingambato (años 2007 y 2008) y Acuitzio del Canje (año 2002).

Más del 80% de la extensión incendiada anualmente sucede sobre bosques templados, resaltando el bosque co-dominante de *Pinus-Quercus* con casi 50%. Los bosques dominados por *Pinus* representan una cuarta parte de la superficie quemada anualmente y el bosque de *Quercus-Pinus* más el bosque de *Quercus* cubren cerca del 15%.

Los tipos de vegetación reportados con incendios son: bosque de pino-encino (BPQ), bosque de pino (BP), bosque de encino-pino (BQP), bosque de encino (BQ), pastizal natural (PN), selva baja caducifolia (SBC), selva mediana caducifolia (SMC), matorral de coníferas (MJ), bosque de oyamel (BA), selva baja espinosa (SBK), bosque de táscate (BJ), selva mediana subcaducifolia (SMS), pastizal inducido (PU), bosque mesófilo (BM), mezquital espinoso (MIKE) y chaparral (ML).

Respecto a la temporalidad y variación intra-anual, los incendios ocurren mayormente durante los meses de abril a mayo. Se concentran en la parte cálida de la estación seca y los principios de la estación lluviosa, la cual va de finales de mayo y principios de junio hasta noviembre en la franja aguacatera. Una vez comenzada la temporada de lluvias, tanto la cantidad como la extensión de los incendios descienden abruptamente.

Los datos de reincidencia entre incendios presentaron una distribución no normal fuertemente cargada hacia la izquierda. La frecuencia media

entre incendios fue de 3.20 años, con una mediana de 2.52 años. El mayor intervalo entre incendios fue de 16 años, no obstante, la ocurrencia de 713 polígonos sin intersección sugiere que podrían tratarse de lugares con una frecuencia de incendios aún más baja, tal vez mayor a los 17 años de registros en la base de datos.

La distribución del tamaño de los incendios es exponencial, concentrándose casi todos los incendios en tamaños menores a 100 ha, aunque llegan a haber algunos de hasta más de 1500 ha. Los 21 municipios de la franja aguacatera tienen en promedio anual 276.4 incendios con una extensión media de 3,286.79 ha.

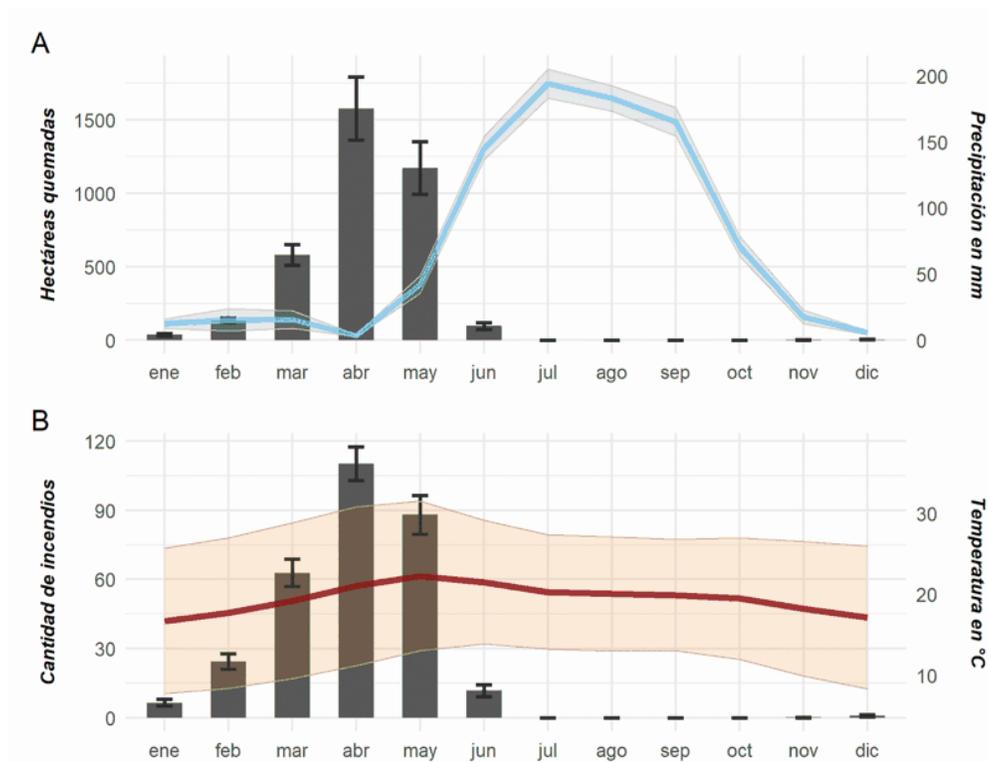


Figura 4. Estacionalidad de la cantidad y extensión promedio de incendios con sus respectivas barras de error estándar

Durante la estación lluviosa se queman en promedio 1296.24 ha al año, en tanto que en toda la estación seca se concentran 2395.14 ha en promedio al año (considerándose los meses de noviembre y diciembre el año anterior para un mismo estiaje). La diferencia entre época seca y lluviosa es significativa según la prueba de *Kruskall-Wallis* ($p < 0.001$, $gl=1$, $\chi^2=21.151$).

Los incendios de mayor tamaño registrados entre 2000 y 2017 han ocurrido en los municipios de Ario de Rosales, Los Reyes,

Tangamandapio, Tingüindín y Tuxpan. Según los registros de CONAFOR, estos se han debido a rencillas por litigios de terreno, al establecimiento de huertas y a causas desconocidas.

También han ocurrido grandes incendios fuera de estos municipios, los cuales han sido bastante icónicos para la población. Un buen ejemplo es el del Cerro de la Cruz de Uruapan, que se originó a finales de abril del 2016. El fuego se concentró en la ladera sur del cerro y que sus llamas se acercaron bastante a varias la zona habitada del norte de la ciudad. CONAFOR reporta que este incendio se ocasionó por fumadores.

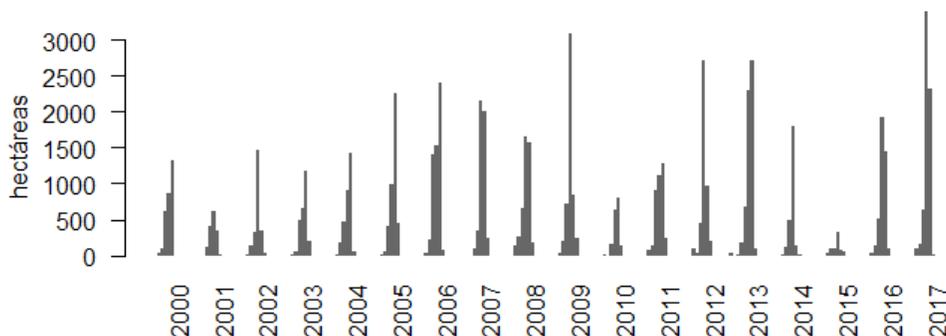


Figura 5. Acumulado mensual de la extensión de incendios.

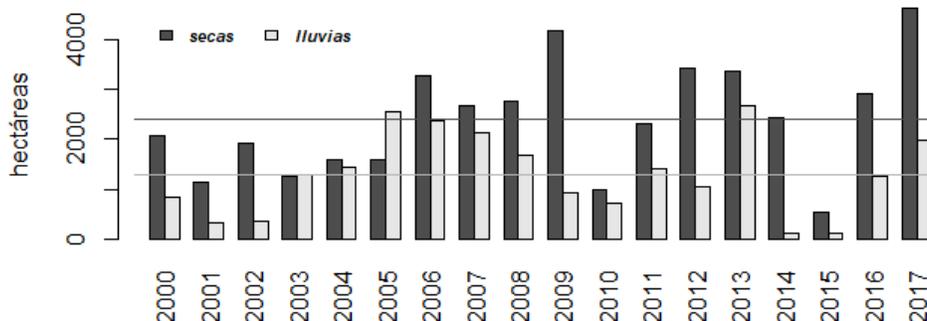


Figura 6. Variación de las hectáreas incendiadas por temporada lluviosa y seca o de estiaje con sus promedios indicados con líneas.

Todos los registros de mega-incendios, de más de 200 ha, tienen su centroide a menos de dos kilómetros de alguna huerta y a menos de 6 de alguna carretera. De 2000 a 2017 existen 24 incendios de más de 200 ha, los cuales están en promedio a 1 km de alguna huerta (desviación estándar de 1.44 km).

La duración de los incendios tiene dos tipos de registros en la base de datos proporcionada, por un lado existe información respecto a las horas que duró el fuego, desglosadas por tiempos de identificación,

llegada de las brigadas y de combate. Por otro lado existe información de las fechas de inicio y término de los incendios. Los datos de diferencia de días se distribuyen de forma no normal, con forma exponencial de escala libre. Por su parte, los datos de duración se distribuyen de forma log-normal.

Los registros de duración basados en horas comienzan a partir del año 2007. Tienen una media de 0.335 hrs (20 minutos), una mediana de 0.222 hrs (13.3 minutos) y su registro máximo es de 15.39 hrs. Por otra parte, su media geométrica es de 0.232 hrs (13.9 minutos) y su media armónica es de 0.174 hrs (10.4 minutos).

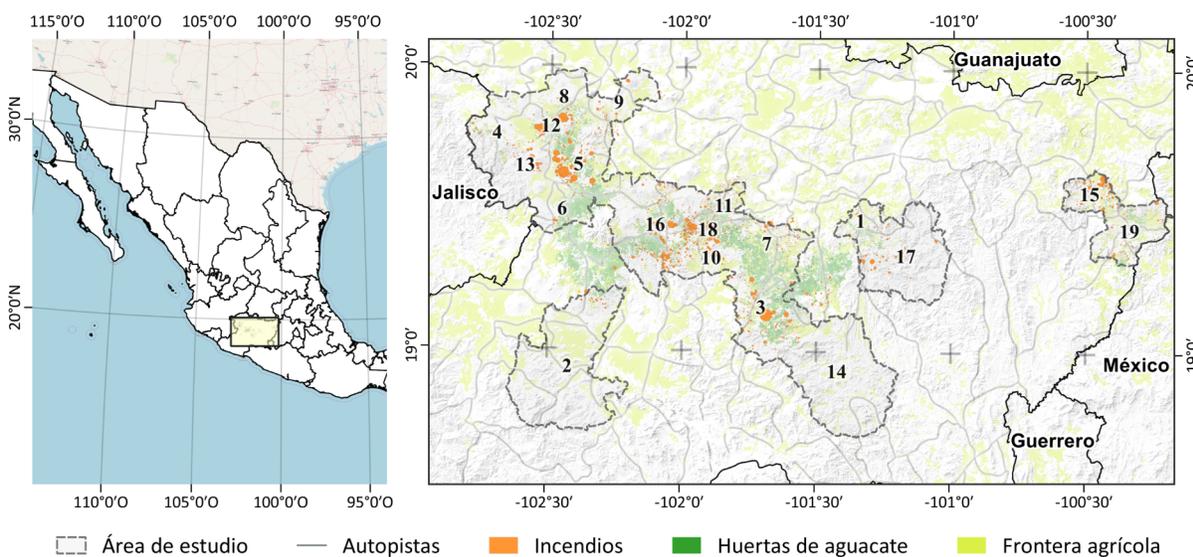


Figura 7. Distribución de los incendios y factores antrópicos

En cuanto a los registros de la diferencia entre las fechas de inicio y término de los incendios, existe información para todos los registros de la base de datos. Su mediana es de 1 día, el promedio es de 1.137 días (i.e. 27.29 hrs ó 1637.3 min). Es importante destacar que, mientras en el registro basado en horas de combate el valor máximo es de 15 horas, el de diferencias de días tiene un valor máximo de 94 días; existen registros de incendios de varias semanas e incluso algunos de un par de meses.

Las distancias mínimas de los incendios a grandes vialidades, a zonas urbanas, a huertas de aguacate y a toda la frontera agrícola tienen una distribución exponencial, misma que también se presenta con los puntos aleatorios (Tabla 2). Sin embargo, tras realizar la prueba U de Mann-Whitney-Wilcoxon se obtuvo que las cuatro distribuciones tienen diferencias significativas con una distribución de distancias con puntos generados al azar ($p < 0.001$).

Los incendios se concentran más en torno a los polígonos de la frontera agrícola, seguido por las huertas de aguacate de 2007 (las cuales están implícitas en los polígonos de la frontera agrícola), después se encuentran las vialidades y por último las zonas urbanas. De analizarse únicamente la distancia a huertas de los incendios previos al 2011 se tiene una disminución en la mediana de las distancias de 309 m a 283 m (en el percentil 95 disminuye de 7179 a 7124 m).

Tabla 2. Distribución de distancias de incendios a factores antrópicos.

<i>Distancia a:</i>	<i>Zonas urbanas</i>	<i>Vialidades</i>	<i>Huertas de aguacate</i>	<i>Frontera agrícola</i>
Estadístico U	6701067	6372718	6729671	9857362
valor de p	p < 0.001	p < 0.001	p < 0.001	p < 0.001
Mediana	1356 m	1168 m	309 m	257 m
Percentil 80	2690 m	2775 m	2607 m	977 m
Percentil 90	3465 m	3779 m	5005 m	1614 m
Percentil 95	4258 m	4598 m	7179 m	2219 m

Se observó que casi todos los incendios responden a factores humanos, sólo una pequeña proporción menor al 5% corresponde con otras causas (v.g. rayos y causas no determinadas). Al analizar de forma anual las causas reportadas se observa que los incendios se derivan principalmente de actividades agropecuarias y del establecimiento de huertas (Figura 8).

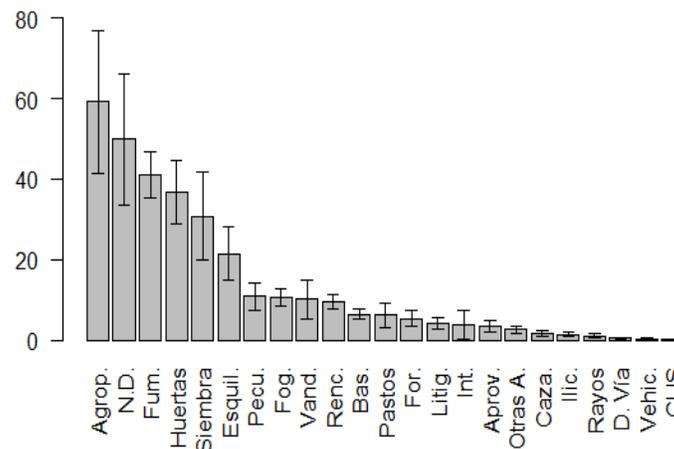


Figura 8. Concentrado anual de las causas de los incendios

La información analizada es consistente con la base de datos. De tenerse un inventario de huertas más actualizado es probable que las distancias a las huertas disminuyan, siendo posible que incluso más que las distancias a la frontera agrícola en general. Como se verá más adelante, la distancia a huertas tiene un efecto importante en la recurrencia de los incendios.

Respecto a parámetros físicos asociados al día en que ocurrió cada incendio, la temperatura mínima es de **9.99±4.7°C**, la temperatura máxima de **28.37±5°C**, la precipitación de **0.29±2.36 mm** y la precipitación acumulada de los últimos 30 días de **5.87±20.6 mm** (promedios y desviaciones estándar, respectivamente). Lo anterior a partir de 3283 registros para la temperatura máxima, 3291 para la temperatura mínima, 3355 para la precipitación y 3366 para la precipitación acumulada de 30 días (Tabla 3).

Tabla 3. Variables climáticas en la región y en los días con incendios.

	<i>Días con incendios</i>			<i>Región de la Franja Aguacatera</i>		
	$\bar{x} \pm s$	<i>n</i>	<i>Distribución</i>	$\bar{x} \pm s$	<i>n</i>	<i>Distribución</i>
<i>Temperatura mínima (°C)</i>	10.0±4.7	3291	Gamma	11.2±2.4	6573	Gamma
<i>Temperatura máxima (°C)</i>	28.4±5.0	3283	Gamma	27.3±3.8	6573	Gamma
<i>Precipitación (mm)</i>	0.29±2.36	3355	Exponencial	1.91±40	6573	Exponencial
<i>Precipitación acumulada a 30 días (mm)</i>	5.87±20.60	3366	Exponencial	—	—	—
<i>Humedad relativa (%)</i>	55.7±8.2	3283	Gamma	60.0±7.1	6573	Gamma

\bar{x} representa el promedio, *s* es la desviación estándar y *n* el tamaño muestral.

Ninguna variable mostró distribución normal de acuerdo a las pruebas de Shapiro y de *Liliefors*. No obstante, ambas temperaturas mostraron una distribución en apariencia simétrica. La distribución de las otras variables está bastante cargada a la izquierda, sugiriendo una distribución exponencial o binomial.

Al comparar estas variables con la extensión de los incendios (mediante GLM con familia quasipoisson y link = log) no se encontró una relación significativa para la temperatura mínima, la precipitación y la precipitación. Por su parte, la temperatura máxima mostró una relación significativa con la extensión total de los

incendios ($p < 0.001$, devianza residual=367.08, g.l.=3281, $R^2_{\text{pseud}}=0.531$). A continuación se muestra la ecuación del modelo lineal generalizado de la relación de la extensión con la temperatura máxima:

Ecuación 1.

$$\log(A) = T_{\max}$$

Donde A es la extensión del incendio expresada en metros cuadrados y T_{\max} la temperatura máxima en grados centígrados.

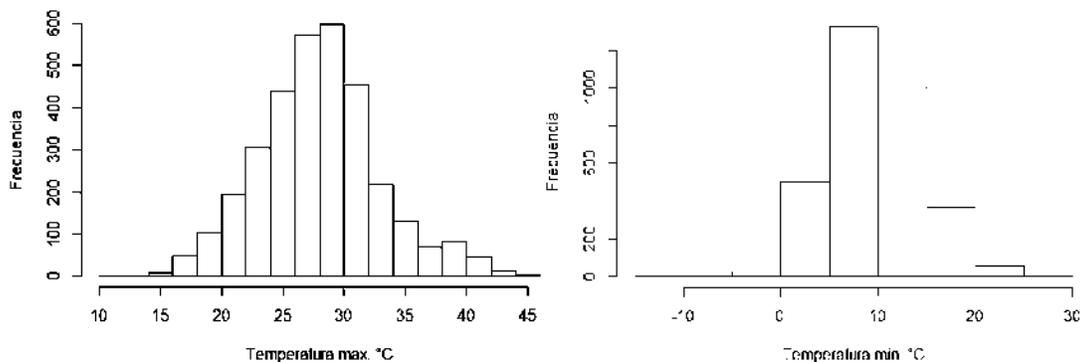


Figura 9. Distribución de las temperaturas máximas y mínimas

La extensión se relaciona también con otras variables como la duración de los incendios. Existe una relación log-log entre el tiempo que dura un incendio y la extensión que logra abarcar ($p < 0.001$, $r^2=0.51$). Esta situación resulta bastante lógica dado que entre más tiempo se le dé a un fuego sin combatirlo, éste consumirá más extensión de la vegetación.

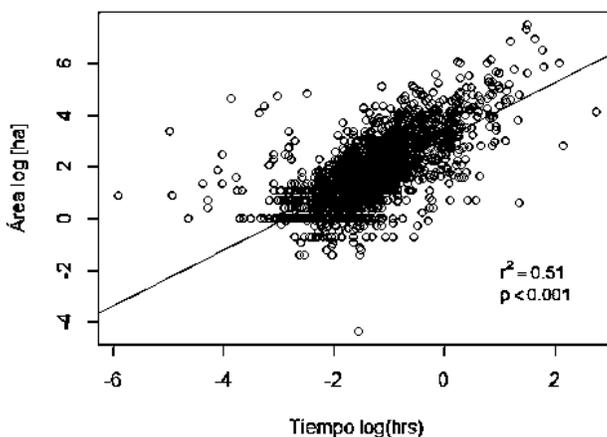


Figura 10. Relación log-log entre la extensión y la duración de los incendios

La extensión se correlaciona con otras variables como la duración de los incendios. Existe una relación log-log entre el tiempo que dura un

incendio y la extensión que logra abarcar ($p < 0.001$, $r^2 = 0.51$).

No existe una relación significativa entre ambas variables ni directas ni con ajustes logarítmicos. Por su parte, se encontró que la mayor correlación se encuentra tanto a los 8 como a los 4 años tras los incendios.

Tabla 4. Correlaciones de Pearson con la extensión anual de los incendios

Años de desfase	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hectáreas sembradas	0.35	0.04	-0.06	0.29	0.50	0.27	0.01	-0.03	0.53	0.39	0.43
Cosecha (ton)	0.42	0.02	-0.09	0.34	0.47	0.22	-0.05	-0.02	0.52	0.36	0.37

En un desfase de 8 y 4 años las variables se distribuyen de forma normal. Sin embargo, no hubo relación significativa entre las variables con los modelos de regresión lineal simple ($p = 0.08$ para la superficie sembrada y $p = 0.15$ para la producción, ambas en el desfase de 4 años).

Se hicieron modelos lineales generalizados con familia *quasipoisson* y *link = log* para indagar la posible relación con la frecuencia de los incendios. La distancia a la zona agrícola y la distancia a las zonas urbanas no mostraron relaciones significativas. Por el contrario, la distancia a vialidades y la distancia a huertas sí, como se muestra a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 5. Comparación entre modelos de la frecuencia de los incendios

	Huertas	Vialidades	Huertas y vialidades
Modelo	$F \sim D_h$	$F \sim D_v$	$F \sim D_h + D_v$
Intercepto	69.48	68.81	68.93
Pendiente	-1.98E-05 $p = 0.0265$	3E-05 $p = 0.0105$	4.86E-05 $p = 0.00018$
Devianza residual	1800199	1799335	1788979
g.l.	2289	2289	2288
R^2_{pseud}	0.242	0.290	0.864

F es la frecuencia (años), D_h la distancia a huertas (m) y D_v la distancia a vialidades (m). Por su parte R^2_{pseud} es la pseudo R^2 o coeficiente de devianza.

Esto sugiere que, aunque los incendios se distribuyen en torno a parcelas agrícolas, es la distancia a caminos y a huertas la que vuelve a un sitio susceptible de volverse a incendiar. Es posible que las quemas agrícolas tengan una recurrencia mucho menor que las quemas

asociadas al establecimiento de huertas de aguacate, sin embargo, esta posibilidad es poco probable por los datos de la misma COFOM y CONAFOR, donde se detecta que la cantidad de quemadas por huertas es mucho menor a todo el conjunto de quemadas asociadas a las actividades agropecuarias. Otra posibilidad es que el intervalo de retorno para la quema de una parcela agrícola es mucho mayor que el periodo de 18 años que se analizó en este estudio. Una tercera posibilidad es que las actividades agrícolas tengan quemadas más controladas donde la frecuencia con la que se salen de control y se vuelven incendios forestales es mucho menor que para el caso de las huertas.

Relación con el fenómeno de la Oscilación del Sur-El Niño (ENSO)

Tanto la extensión como el número de incendios mensuales mostraron una relación significativa con las categorías del ONI ($p < 0.01$, g.l.=2, $\chi^2 = 14.012$ para extensión y $\chi^2 = 13.694$ para el número de incendios). Asimismo, las categorías del ONI mostraron una relación significativa con las variables climáticas de precipitación y temperatura máxima ($p < 0.01$, g.l.=2 en ambos casos, $\chi^2 = 6.145$ para la precipitación y $\chi^2 = 14.163$ para la temperatura máxima). La temperatura mínima no mostró una relación significativa con el ENSO.

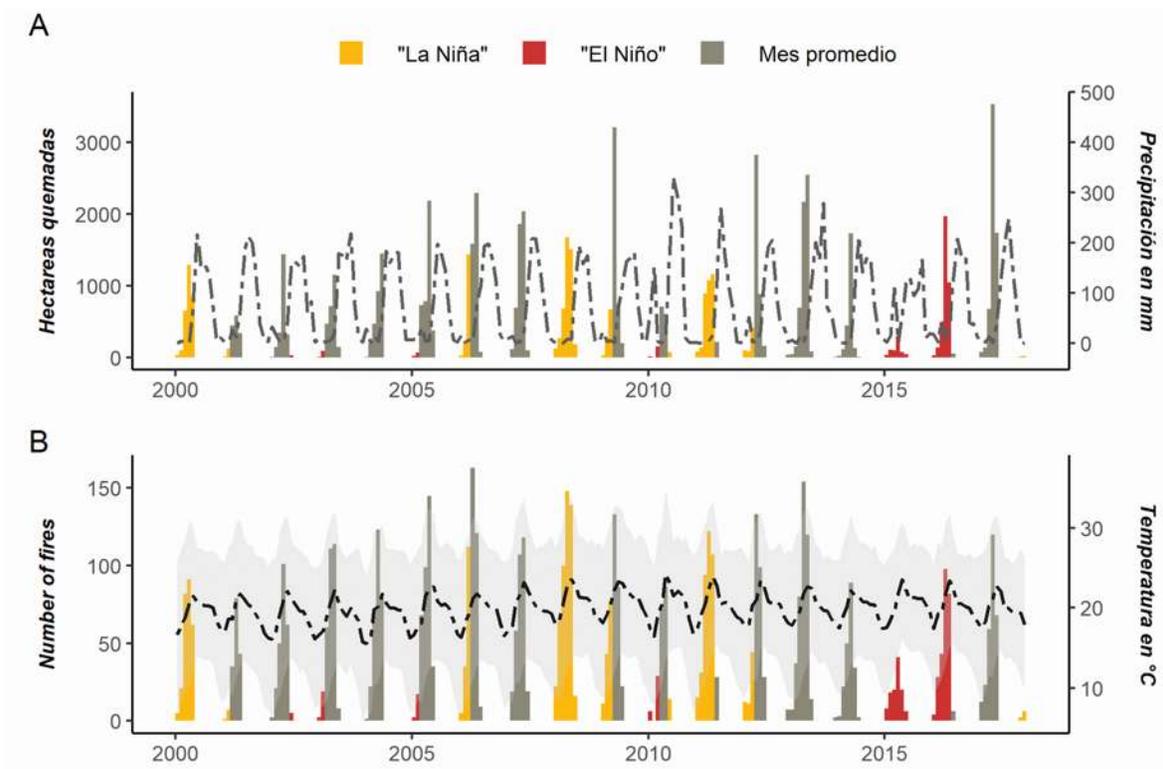


Figura 11. Variación del número y extensión de incendios mensuales entre 2000 y 2017

Tabla 6. Resumen de todos los meses de estudio en relación al ENSO

	<i>Temperatura mínima</i>	<i>Temperatura máxima</i>	<i>Precipitación</i>	<i>ENSO^{KW}</i>
Área quemada	—	***	***	*** "la niña" a "el niño" a mes promedio b
Número de incendios	***	***	***	*** "la niña" a "el niño" a mes promedio b
ENSO ^{KW}	—	*** "la niña" a "el niño" a mes promedio b	* "la niña" a "el niño" ab mes promedio b	

Si no se especifica otra cosa, se realizó una prueba de Mann-Whitney-Wilcoxon ^{KW} significa que se hizo una prueba de Kruskal-Wallis, — significa $p > 0.05$, * para $p < 0.05$, *** para $p < 0.01$. Las letras en negritas representan las diferencias estadísticas del análisis *post hoc* de Conover-Iman.

Del análisis *post hoc* para la relación se encontró que, a pesar de que los meses con La Niña tienen mayor cantidad y tamaño acumulado de incendios que los años con El Niño, esta relación no es significativa. Por otro lado, los meses sin ENSO, tanto Niña como Niño, tuvieron de forma significativa mayor cantidad y extensión acumulada de incendios ($p < 0.01$ en ambos casos).

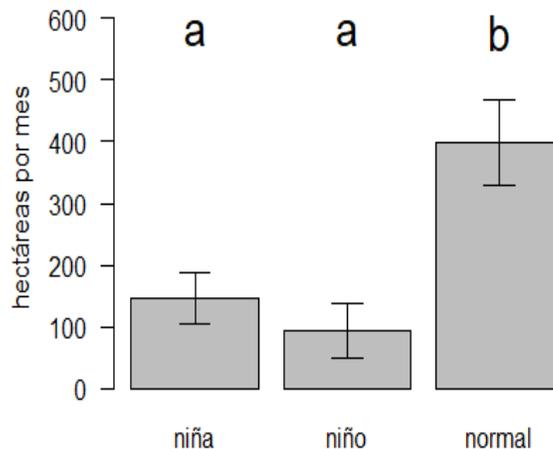


Figura 12. Comparación entre la extensión mensual quemada según el ONI

Discusión

El intervalo de retorno de la franja aguacatera es bastante bajo, especialmente si se comparan con bosques templados de otras partes del mundo, cuyos incendios vuelven a quemar los mismos rodales en décadas o hasta centenas de años (Agee, 1993; Niklasson & Granström, 2000). Sin embargo, en el contexto de incendios en el país, existen más estudios que muestran que es común que los bosques templados de México tengan intervalos de retorno de entre un par de años a un par de lustros (Rodríguez-Trejo & Fulé, 2003; Fulé *et al.*, 2011; Gutiérrez Martínez, 2015; Sáenz-Ceja & Pérez-Salicrup, 2019). Fulé *et al.* (2011) y Sáenz Sáenz-Ceja & Pérez-Salicrup (2019) han señalado que esto puede deberse a un manejo cultural bastante arraigado entre las poblaciones que han vivido en los bosques.

La presencia y extensión de los incendios tiene conductores sociales y climáticos. La asociación espacial de los incendios muestra que estos pueden ocurrir de forma aleatoria alrededor de campos agrícolas. No obstante, la reincidencia de un fuego se asocia al establecimiento de huertas y caminos. Por su parte, la presencia de inviernos con ENSO disminuye drásticamente la presencia de incendios por aumentar la humedad de la cama de combustibles.

A pesar de que existen trabajos que han mostrado la importancia de zonas urbanas y caminos para la propagación de incendios (Gutiérrez *et al.*, 2018; Monjarás Vega *et al.*, 2019), para la franja aguacatera en su conjunto resulta aún más importante considerar la presencia de campos agrícolas. Es importante destacar que los datos de frontera agrícola agrupan todos los tipos de agricultura, incluida la de frutales propia de huertas de aguacate.

La distancia a caminos se ha considerado como una variable importante para explicar los incendios en muchos lugares del mundo (Narayanaraj & Wimberly, 2012; Matin *et al.*, 2017; Abdi *et al.*, 2018; Monjarás Vega *et al.*, 2019). Un camino puede facilitar el acceso para el combate de incendios, así como el de personas que puedan provocar un incendio, tanto involuntaria como intencionalmente.

Por otro lado, la distancia a huertas como factor de reincidencia de incendios es un proceso bastante peculiar de esta región. Este fenómeno sólo ha sido parcialmente descrito por Barsimantov & Navia (2012) y por Gutiérrez *et al.* (2018). Es la primera vez que se vincula de forma tan íntima la presencia de huertas de aguacate como conductor de los incendios forestales de toda la región.

Existen aspectos como la severidad, la intensidad y el tipo de parche que no pueden ser descritos con la base de datos ni con la metodología trabajada en este proyecto. Aunque el tipo de parche se puede asociar con el tipo de incendio reportado, la base de datos no registra este parámetro en todos los años. Previo al 2006 todos los incendios se consideraban superficiales y es hasta hace un par de años que se empezaron a incluir registros de incendios subterráneos.

El eje neovolcánico, donde se encuentra la franja aguacatera, es la primera barrera fisiográfica a los vientos alisios del Océano Pacífico que entran desde las costas michoacanas. Esto le confiere una alta susceptibilidad climática a los procesos de sombra orográfica, especialmente durante la temporada de estiaje donde el Niño tiende a volver a los inviernos bastante más húmedos, mientras que la niña los vuelve más secos (Magaña Rueda, Pérez & Conde, 1998).

Es sabido que la ocurrencia de incendios se facilita por condiciones climáticas cálidas y secas, por un tipo de combustible que esté lo suficientemente seco para arder sin problemas y condiciones de aire que permitan la propagación de las llamas (Agee, 1993). Las condiciones climáticas son bastante congruentes con ello; un mes sin lluvia permite que la cama de combustibles esté lo suficientemente seca para arder y una mayor oscilación térmica como la encontrada implica una menor humedad que, si se suma con corrientes de aires alisios, podrían dispersar rápidamente los fuegos que se generen.

Se ha pensado de forma generalizada que el ENSO tiene grandes repercusiones para el manejo de los incendios en todo México, por aumentarlos en cantidad y extensión. No obstante, sus impactos no son iguales en todos los lugares, especialmente cuando se analizan los cambios a nivel regional o local donde se encuentran efectos contrarios o incluso nulos (Magaña Rueda, Pérez & Conde, 1998; Sáenz-Ceja & Pérez-Salicrup, 2019). Además, normalmente se habla de años "la Niña" o de años "el Niño" como si todos los meses se comportaran igual, idea errada ya que aún dentro de un mismo año puede haber una combinación de ambos fenómenos.

Normalmente se habla de años como Niña o Niño como si todos los meses se comportaran de una u otra manera, sin embargo, aún dentro de un mismo año puede haber una combinación de ambos fenómenos. Durante el estiaje con el que se comienza el año puede existir un Niño del año anterior y con el que se acaba el mismo puede ser un año normal o, incluso, ser el comienzo de una Niña. Relacionar los registros mensuales de incendios con reportes del ENSO como el ONI permiten entender de mejor manera la forma en que los incendios se están

comportando y cómo es que patrones climáticos globales pueden afectar a los incendios regionales para desmitificar el impacto que se le adjudica al ENSO en los incendios de la franja aguacatera.

Los incendios en México han estado asociados a actividades agrícolas, pastoriles y, recientemente, a la presencia de caminos (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003; Briones-Herrera *et al.*, 2019). Las motivaciones detrás de los incendios provocados y del cambio de uso de suelo asociado atienden principalmente a razones económicas (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003; Contreras Peña, 2015). El contexto social en el que se produce el aguacate de exportación en Avocado-land tiene todo un entramado de complejas relaciones de poder en un ambiente de corrupción e impunidad (Contreras Peña, 2015; Vilar *et al.*, 2017; Kennedy, 2019).

Dados los miles de millones de dólares que se mueven al año en torno a esta actividad existe una presión internacional de consumo, la cual ha sido legitimada por acuerdos transnacionales como el TLCAN entre México, Estados Unidos y Canadá (Contreras Peña, 2015). Gran parte de los estadounidenses que comen guacamole durante eventos como el Super Bowl desconocen que detrás de su gran demanda de consumo existen productores que queman bosques, que acaparan agua y contaminan su gente y sus suelos con dañinos pesticidas y que, al mismo tiempo, son extorsionados y desterrados de sus cultivos por narcotraficantes, grupos paramilitares disfrazados y sicarios vinculados a políticos corruptos (Contreras Peña, 2015; Vilar *et al.*, 2017; Kennedy, 2019).

Conclusiones

Entre 2000 y 2017 ocurrieron 5,630 incendios dentro de los 21 municipios de la franja aguacatera trabajados. Al año ocurren alrededor de 276 incendios cuya duración casi siempre es de un día o menos. El periodo de marzo a mayo es muy activo en término de ocurrencia y extensión de incendios.

El inicio de la temporada lluviosa no significa una desaparición de los incendios, ya que continúan ocurriendo uno o dos meses más. Asimismo, los incendios ocurren y duran más tiempo principalmente en la temporada/época/estación de estiaje.

Los resultados indican que aproximadamente, cada 3.2 años se vuelve a quemar un lugar ya incendiado. En promedio se queman 3,286.79 ha al año, concentradas en bosques de coníferas y cercanas a huertas de

aguacate, cuyas distancias a huertas resultaron no aleatorias.

La superficie quemada no se ve reflejada de forma significativa con una mayor o menor superficie sembrada por aguacate ni una mayor o menor producción de dicho cultivo. Existe una correlación alta, pero no significativa, a los 4 y 8 años tras la extensión quemada con la superficie sembrada y la producción. Si se amplía el valor de alfa a 0.1 entonces es significativa la relación de la extensión quemada y la superficie sembrada 4 años después.

Existen factores climáticos y sociales que explican la presencia y reincidencia de los incendios. Los incendios se concentran principalmente en torno a la frontera agrícola, seguido de huertas, caminos y zonas habitadas. La reincidencia de un fuego está explicada por la distancia a huertas y caminos. Los años *Niña* y *Niño* disminuyen la cantidad y extensión de incendios en la región sin diferencias significativas entre sí.

Con los resultados de este capítulo se facilita el establecimiento de políticas preventivas para el manejo de incendios. Es altamente recomendable incluir el periodo de análisis de 1997-1999 y de los municipios faltantes de la franja aguacatera.

Reflexiones sobre la metodología

Analizar la frecuencia de incendios a partir de la sobreposición de áreas vectoriales permitió resultados de mayor resolución y de mayor precisión que los que se pueden lograr utilizando estadísticas de rasters. Existen trabajos que también incorporan información de reincidencia de incendios, sin embargo, su resolución sólo permite ver en escalas relativamente gruesas las áreas con riesgo de re-inciendiarse (Matin *et al.*, 2017; Briones-Herrera *et al.*, 2019). El tiempo requerido para el procesamiento y análisis espacial de la información se ha considerado como una limitante por los requerimientos de hardware necesarios para llevar a cabo dichos análisis. No obstante, el trabajar sobre una interfaz no gráfica de líneas de comando como R o Phyton reduce de forma importante los requerimientos de cómputo y, por ende, los tiempos de análisis de la información. Esto vuelve el geo-análisis de vectores una opción tan viable como el procesamiento de rasters.

Asimismo, en términos geográficos el método de cartografía de intervalos de retorno de incendios tiene sus limitantes, los tamaños estarían sobrevalorados en todos los casos ya que el área interceptada

es, en la mayoría de los casos, sólo una fracción del área incendiada y no el polígono en su totalidad. En la metodología se hace un promedio con el tamaño de las áreas completas y no con el de las fracciones intersecadas.

Resultaría conveniente para análisis geoespaciales a partir de los polígonos de los intervalos de retorno el basar el tamaño en el promedio de sólo las áreas interceptadas entre incendios y la ubicación en el centroide de dichas ubicaciones (comparando con esta metodología, ello conllevaría a tener más polígonos, por estar en forma más desagregada, con un tamaño medio mucho menor). No obstante, para fines de visualización como los que perseguía la generación de un mapa de intervalos de retorno de fuegos para toda la franja aguacatera, esta metodología resulta adecuada. De otra forma sería muy difícil poder apreciar la ubicación de los intervalos de retorno en un área tan basta.

PARTE 2

**Efectos en el suelo y cambios
ecológicos por incendios
superficiales y subterráneos**

Características ecológicas de incendios de extensión reducida y baja reincidencia en la franja aguacatera

Una vez entendidos los controles climáticos y sociales detrás de los incendios de la franja aguacatera, que casi en su totalidad son provocados, podemos explorar algunas de las interacciones ecológicas que ocurren de los sitios con algunos de los tipos de incendios que ocurren en la franja aguacatera. En este capítulo se explorarán las interacciones ecológicas en incendios superficiales y subterráneos, con un énfasis particular a aquellas que permitan entender los cambios a propiedades hidrofísicas del suelo, aspecto abordado en el tercer y último capítulo de esta segunda sección.

Objetivos

2 Caracterizar las asociaciones entre variables ecológicas en parcelas afectadas por incendios pequeños y poco frecuentes

- 2.a Caracterizar los componentes dasométricos de sitios forestales con distintos tiempos post-incendio
- 2.b Caracterizar las propiedades físicas y químicas de los suelos bajo uno de los regímenes típicos de incendios de la franja aguacatera michoacana.
- 2.c Evaluar interacciones entre variables dasométricas y edáficas en sitios con regímenes de incendios similares.

Marco conceptual

Aunque cualquier evento derivado del fenómeno de la ignición, presencia de al menos una llama y combustión se puede denominar fuego, sólo es cuando éste se sale de control que se le denomina incendio y si éste ocurre en un bosque o selva se le denomina incendio forestal (NOM-015-SEMARNAT/SAGARPA-2007; Conafor, 2010; Rodríguez Trejo, 2014). No obstante, estas categorías sólo son útiles en lenguas de habla hispana, pierden sentido en literatura de habla inglesa donde se reconocen en su lugar: *fires* (fuegos e incendios), *wildfires* (incendios naturales) y *arsons* (incendios producidos deliberadamente) (Agee, 1993). Para evitar confusiones en esta parte se abordará el término fuego en su aspecto genérico, es decir, incluyendo a cualquier fuego o incendio, natural o provocado (de manera análoga al término

anglosajón *fire*).

Tipos de Incendios

Según CONAFOR (2010), los incendios se puede clasificar como:

- **Superficial.** El fuego se propaga principalmente de forma horizontal sobre la superficie del terreno. Se afectan combustibles vivos y muertos como pastizales, hojas, ramas, ramillas, arbustos o pequeños árboles de regeneración natural o plantación, troncos, humus, entre otros. Sus llamas alcanzan hasta un metro y medio de altura.
- **Subterráneo.** El fuego se propaga bajo el suelo, sucede una combustión de la materia orgánica acumulada y las raíces, que incluso puede alcanzar los afloramientos rocosos. Generalmente éstos no producen llamas y emiten poco humo. Galerías de animales o poros grandes dejados por antiguas raíces sirven de fuentes abastecedoras de oxígeno para este tipo de combustión que puede ocasionar grandes daños a la vegetación por la afectación a los sistemas radiculares.
- **De copa.** También denominados incendios aéreos. En ellos las llamas avanzan primero sobre el nivel del suelo y luego se propagan por continuidad vertical, es decir, escalan vegetación dispuesta hacia arriba que sirve de combustible en escalera hacia las copas de los árboles. Su severidad es alta y se asocian a eventos altamente destructivos y difíciles de controlar.

En el estudio de incendios es necesario entender tres elementos base que son fundamentales para la existencia de cualquier fuego: oxígeno, calor y combustible. A nivel de paisaje las covariables que regulan el comportamiento de los incendios son: topografía, clima y combustibles (Agee, 1993). Este nuevo triángulo contiene tres factores, cada uno de los cuales engloban una interacción de los elementos del primero (v.g. humedad y temperatura en clima o elevación, pendiente y fisiografía para entrada de los vientos en topografía).

Aunque atributos como la intensidad, la temperatura, el tamaño, la duración y la severidad se pueden cuantificar directamente en un incendio dado, normalmente no se pueden medir directamente en condiciones de campo, debido a que que muchos incendios son fortuitos. Es entonces que se tiene que hacer uso de algunos indicadores para poder constatarlas. Por ejemplo, aunque el registro de fechas, frecuencias e intervalo de retorno de incendios se puede medir con las herramientas de detección remota actuales, es necesario usar métodos

como la identificación de anillos de crecimiento para el caso de incendios antiguos (Agee, 1993; Rodríguez Trejo, 2014).

Existen indicadores para más componentes de los regímenes de incendios. Los cambios en la composición de la comunidad vegetal son respuestas del ecosistema que reflejan parte de la extensión, forma y duración de un incendio pasado (Keeley, 2009). La altura de las llamas (así como las cicatrices que pueden dejar en los árboles), la tasa de propagación y la energía radiante pueden servir como indicadores de su intensidad (Agee, 1993; Keeley, 2009).

La severidad está vinculada estrechamente con la intensidad, es decir, con el particular proceso de combustión en cada incendio y el grado de severidad se puede determinar por los cambios químicos, físicos y ecológicos post-incendio (Mataix-Solera et al., 2007; Keeley, 2009). Ejemplos son la cantidad de árboles chamuscados, las copas quemadas, el grado de hidrofobicidad, la cantidad diferencial de materia orgánica sobre el suelo y bajo tierra. Es importante no confundir severidad con la respuesta ecológica post-incendio, la cual se relaciona más con procesos como la erosión, las tasas de infiltración del agua en el suelo, cambios en la cobertura vegetal y la sucesión ecológica (Keeley, 2009).

Durante un incendio la energía de los combustibles que se consume se puede liberar de forma aérea a manera de llamas o de forma subterránea a manera de combustión latente. La intensidad es un parámetro que incluye ambas formas de liberación de energía. Estos son procesos complementarios y la energía tiende ser liberada a través de uno u otro proceso, pero no de forma simultánea (Rein, 2015).

La combustión latente es el proceso que ocurre durante los incendios subterráneos. Este proceso puede ser posterior a un incendio superficial y se ve influenciado por el espesor del mantillo presente en la zona, el cual es directamente proporcional a la duración de la combustión latente y, por tanto, la severidad bajo tierra (Neary et al., 1999; Varner III et al., 2005; Rein, 2015).

La combustión latente se puede dar en dos tipos de materia orgánica: troncos y ramas gruesas ó suelos orgánicos como los horizontes hísticos de turberas o fólicos de bosques (Rein, 2015). Es un proceso tres órdenes de magnitud más lento que un incendio superficial, está influenciado por la temperatura y la humedad en la superficie del suelo (Varner III et al., 2005; Keeley, 2009). Ocurre vertical y horizontalmente sólo en suelos con más de 20% de materia orgánica; la profundidad a la que se puede dar este proceso está influenciada por

la disponibilidad de oxígeno, la cual aumenta con la presencia de grietas, galerías y macroporos (Rein, 2015).

Sitios de estudio

Para poder tener sitios comparables se hizo una revisión cartográfica de la fisiografía (INEGI, 1985a; INEGI, 2013), la geología (INEGI, 1985b), los climas (INEGI, 1985c), el uso de suelo y vegetación (Morales-Manilla y Cuevas, 2011; INEGI, 2017) y la edafología (INEGI, 1993). Asimismo, se utilizó la información de regímenes de incendios generada a partir de la base de datos de COFOM-CONAFOR (véase primer capítulo de este documento). Los criterios de selección fueron los siguientes:

- Clima templado (clima)
- Andosoles (edafología)
- Uso forestal (uso del suelo)
- Bosque de Pino-Encino (vegetación)
- Cubierta sin huertas (uso del suelo)
- Eje Neovolcánico (provincia fisiográfica)
- Pendientes entre 15 y 35° (fisiografía)

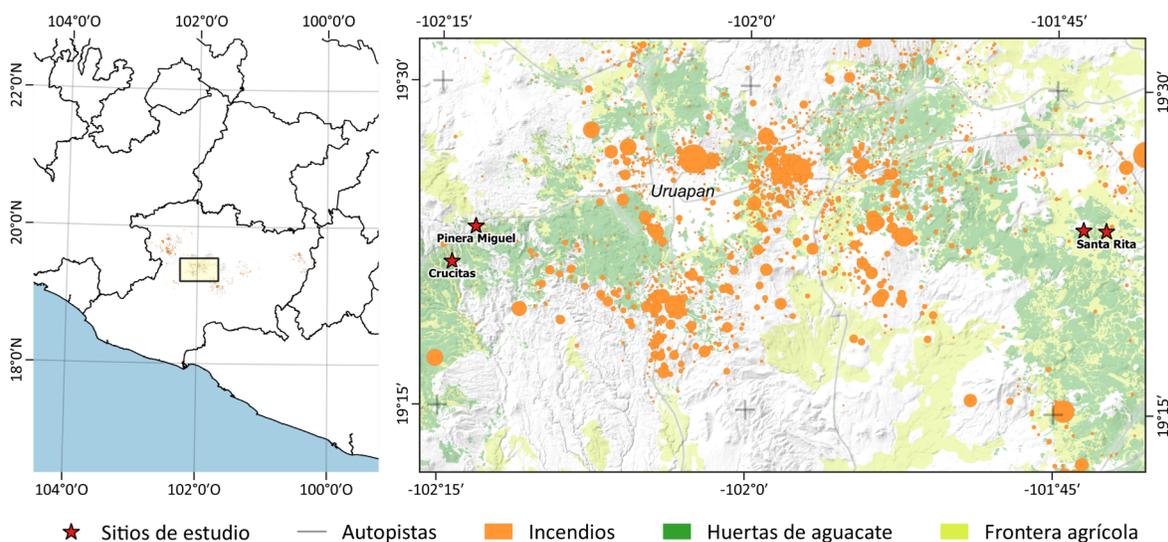


Figura 13. Ubicación de los sitios de estudio.

Con estos criterios fue que se realizó un filtro de información en la base de datos de incendios y se establecieron sitios potenciales para esta parte del estudio. Posteriormente se contactó a los propietarios de los sitios (terrenos particulares, ejidales y comunales), se les

explicó del proyecto de forma oral y mediante oficios y se les solicitó permiso para poder acceder a sus predios y poder realizar los análisis correspondientes. Se trabajó solamente en aquellos sitios donde los propietarios estuvieran apropiadamente informados del proyecto y donde ellos estuvieran plenamente de acuerdo con este trabajo.

Es importante mencionar que parte del trabajo de gestión para poder acceder a los predios incluyó el compromiso de poder entregar en cada uno de los sitios la información generada. Ello no quiere decir que se entregará meramente una copia de este documento, sino que se divulgarán de forma oral y en un lenguaje sencillo los procedimientos y resultados de esta investigación.

Se describieron cuatro sitios entre el 17 de junio y el 19 de julio del 2019, los cuales incluyen incendios de hasta aproximadamente 20 años de antigüedad. Los sitios se pueden resumir de la siguiente forma:

Tabla 7. Características principales de los 4 sitios de estudio.

<i>Nombre clave</i>	Municipio de Michoacán	Tenencia de la tierra	Cantidad de incendios	Año de su último incendio	Manejo en el terreno
1.Santa Rita	Santa Clara del Cobre	Ejidal (Santa Rita)	1	2017	Ninguno
2.La Yácata	Santa Clara del Cobre	Ejidal (Santa Rita)	2	2016	Ninguno
3.Pinera Miguel	San Juan Nuevo Parangaricutiro	Particular	1	1998*	Resinación
4.Crucitas	San Juan Nuevo Parangaricutiro	Particular	1	2012	Ninguno

* Año estimado, según conversaciones con el propietario

Cada sitio fue una unidad de muestreo donde se describió un perfil de suelo en su centro, en la periferia inmediata del perfil se realizaron las mediciones de infiltración en tres diferentes pisos de profundidad y se tomaron mediciones dasométricas en muestreos circulares de 100m² para herbáceas y arbustivas y de 1000m² para arbóreas (Figura 14).

Los ensayos se distribuyeron en bloques de 5 infiltrómetros de tensión automatizados (INDI) por piso de infiltración (Gómez-Tagle *et al.*, 2010; Gómez-Tagle *et al.*, 2014), basándose en las propuestas trabajadas por Coquet, Vachier y Labat (2005) y los pisos de afectaciones por los cambios en la temperatura del suelo planteados en Mataix-Solera *et al.* (2007). Los pisos establecidos fueron:

- 1 0 cm de profundidad (superficial)
- 2 1 a 2 cm de profundidad
- 3 4 a 5 cm de profundidad

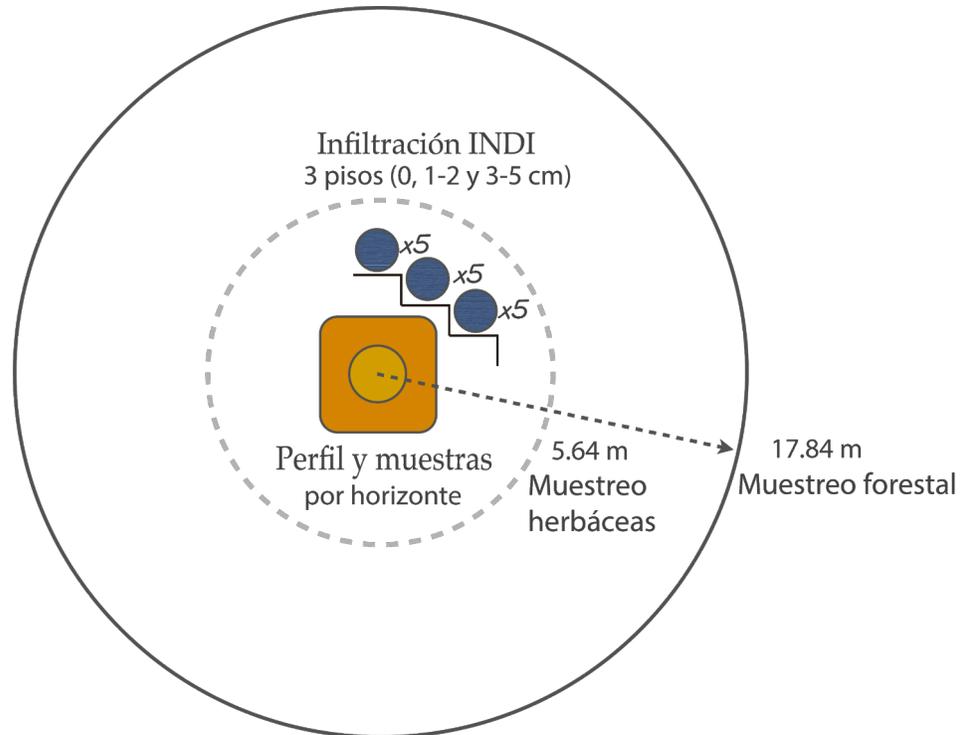


Figura 14. Diagrama del diseño de muestreo en campo

Materiales y métodos

Dasometría de los sitios

Se tomó registro de las plantas vivas dentro de un radio de 5.64 m (100 m²) para arbustivas y herbáceas. Se midió su azimut, distancia desde el centroide, altura, dos diámetros de copa y se tomó registro de su nombre (morfortipo o nombre científico en caso de reconocerse).

Para los árboles se registraron las plantas vivas dentro de un radio de 17.84 m (1,000 m²). Se midió su azimut, distancia desde el centroide, altura, dos diámetros de copa, altura del fuste limpio, presencia de resinación (u otra característica de manejo), altura y anchura de cicatrices de incendio (en caso de estar presentes) y se tomó registro de su nombre (morfortipo o nombre científico en caso de reconocerse).

Independientemente de su estadio de desarrollo se tomó registro de la forma de vida de las especies en tres clases: arbóreo, arbustivo y herbáceo. Para cada una de estas clases se vio el porcentaje de cobertura y se calculó su índice de dominancia de Simpson (Simpson, 1949). Para toda la vegetación de cada sitio se calculó un índice de diversidad de Shannon usando logaritmos naturales (Shannon & Weaver, 1949).

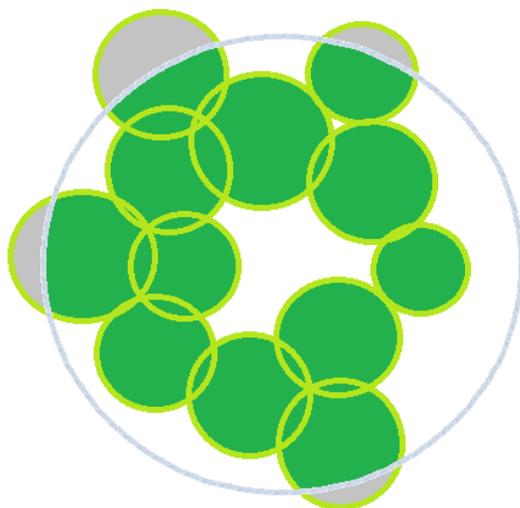


Figura 15. Diagrama del análisis de coberturas.

En verde claro las circunferencias de copa, el fondo gris corresponde a las áreas excluidas y las verde oscuro a las que se unieron para el análisis de cobertura respecto al área de muestreo, al interior de la línea azul

Con base en los registros de azimut y diámetro de copa se hizo una estimación de la cobertura mediante un ajuste en sistemas de información geográfica. Con la unión de los polígonos de las circunferencias de copa al interior del área de muestreo se calculó el porcentaje de cobertura, se excluyeron de la estimación los fragmentos que rebasaran el área de muestreo (Figura 15).

Descripción del sitio y de sus perfiles de suelo

Se describió la fisiografía, pendiente, cubierta, condiciones climáticas del día, ubicación cartográfica, material parental y fragmentos gruesos superficiales (FAO, 2006). Se analizaron las características del mantillo, o humus, en relación a su espesor y a sus procesos de mineralización/humificación (Siebe *et al.*, 1996). Se describió el material parental, el estado de humedad, el drenaje, la cantidad promedio de fragmentos gruesos, la profundidad efectiva del perfil y propiedades u horizontes de diagnóstico para su clasificación.

Dentro de la misma unidad de paisaje se realizó también una descripción de la degradación del suelo (SEMARNAT y CP, 2003). Se levantaron aspectos como el tipo, grado (ligero, moderado, fuerte o extremo), extensión, tasa (positiva, negativa o neutra) y causas de la degradación.

Para identificar los atributos modificados por los disturbios ecológicos se elaboraron descripciones de rutina de perfiles de suelo (FAO, 2006); se describió el límite, el color en seco y en húmedo (Munsell Color, 2000), la textura, el porcentaje estimado de arcilla, de rocas y de gravas, la densidad aparente, la estructura, las motas, la presencia de reductimorfismo, de propiedades ándicas, de rasgos en los peds, las raíces, los poros, la humedad y los artefactos.

Igualmente se tomó en consideración la descripción de las propiedades ándicas (FAO, 2006). Se hizo una diferenciación entre las propiedades evidentes y las que sólo fuesen marcadas, siendo las evidentes donde se apreciara un claro cambio de coloración a rosa, sin embargo, si este cambio adquiría una tonalidad muy intensa se registraba como un cambio marcado.

Infiltrómetros de tensión INDI

Un infiltrómetro de tensión es un dispositivo que permite medir la sortividad y la permeabilidad del suelo y, con ello, el poder determinar su conductividad hidráulica saturada e insaturada (White & Perroux, 1987). El infiltrómetro de disco (INDI), es un infiltrómetro de tensión con la peculiaridad de poderse construir con recursos de bajo coste, pesa aproximadamente 2.5 kg y en su implementación no se requieren de grandes cantidades de agua (Gómez-Tagle, Geissert y Enríquez Fernández, 2014). Su diseño está basado en los infiltrómetros de Spongrová *et al.* (2009) y de Perroux y White (1988).

El INDI se compone de tres partes principales: un reservorio de agua, un tubo de Mariotte y una base de aluminio (Figura 16). El reservorio es el suministro de agua sobre el que se hacen las lecturas para ver la velocidad de infiltración del agua en el suelo, la base de aluminio provee de estabilidad al aparato al tiempo que genera una superficie de contacto con la red de poros del suelo, y el tubo de Mariotte permite regular una tensión, la cual limita el agua que fluye del reservorio del dispositivo al suelo.

Cuando se realiza un ensayo de infiltración con el INDI se establece

generalmente una tensión relativamente alta (v.g. $-9 \text{ cmH}_2\text{O}$) y se pone el infiltrómetro sobre una base de material de contacto (marmolina o arena fina) que facilita el contacto de toda la superficie con el suelo a pesar de las irregularidades que este pudiese tener en el terreno de su superficie (Gómez-Tagle *et al.*, 2014). En terrenos muy inclinados es recomendable que la marmolina funcione a manera de microterracea para dar estabilidad al instrumento, si el cambio de textura no es muy abrupto, esta técnica permitiría lecturas fiables sin riesgo de tener sesgos por flujo lateral (Miyazaki, 1988).

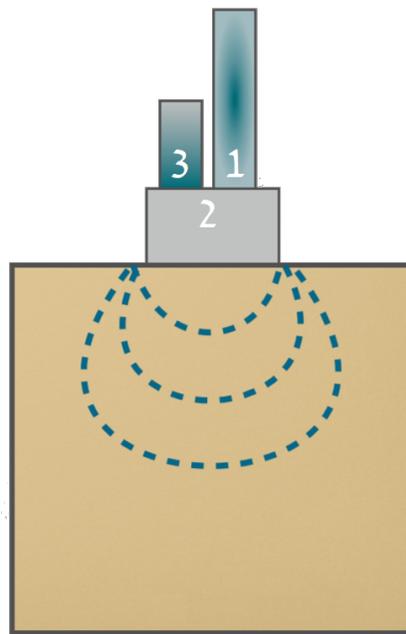


Figura 16. Las partes principales de un INDI: reservorio (1), base (2) y tubo de Mariotte (3)

Ensayos de infiltración

Para cada sitio se realizó un estudio de la permeabilidad insaturada en condiciones de campo con ajustes para conocer la conductividad hidráulica saturada e insaturada, utilizando los infiltrómetros de tensión INDI, previamente mencionados. Este equipo permite estimar la conductividad hidráulica saturada del suelo, cuantificar la infiltración en flujo insaturado y estimar la porosidad efectiva, así como el flujo de infiltración, para distintos tamaños de poro. Este método permite comparar variables clave del suelo como porosidad efectiva, conductividad hidráulica y flujo de infiltración para distintas condiciones de disturbio.

Por sitio se realizaron quince ensayos de permeametría con tensiones

de -9.0, -3.0 y -0.5 cm. Considerando correcciones geométricas para conocer la conductividad hidráulica saturada e insaturada de campo (Wooding, 1968; Logsdon y Jaynes, 1993).

Para conocer la conductividad hidráulica saturada se realizó una aproximación numérica a las ecuaciones no lineales de Wooding y de Gardner, según la metodología propuesta por Logsdon y Jaynes (1993). Lo anterior mediante el uso del software R v3.5.1 (R Core Team, 2018). Mediante dicho método se puede conocer el valor de la conductividad hidráulica saturada de campo y el parámetro de proporcionalidad de alfa de Gardner.

Ecuación 2. Ecuación de Gardner (1958).

$$K_{(\psi)} = K_{(s)} e^{\alpha \cdot \psi}$$

Donde $K_{(\psi)}$ es la conductividad hidráulica insaturada a una tensión determinada, $K_{(s)}$ es la conductividad hidráulica en condiciones de saturación, α es el parámetro de proporcionalidad del modelo de Gardner y ψ es la tensión aplicada.

Ecuación 3. Ecuación de Wooding (1968).

$$q_{\infty(\psi)} = \pi r^2 K_{(\psi)} + 4r \int K_{(\psi)} d\psi$$

Base para el ajuste no lineal propuesto por Logsdon y Jaynes.

Donde q_{∞} es el flujo volumétrico en estado estacionario, $K_{(\psi)}$ es la conductividad hidráulica en una tensión ψ determinada y r es el radio de la base circular del infiltrómetro.

Ecuación 4. Ajuste no lineal de Logsdon y Jaynes (1993).

$$\frac{q_{\infty}}{\pi r^2} = K_{(s)} e^{\alpha \cdot \psi} \cdot \left(1 + \frac{4}{\pi r \alpha}\right)$$

Donde $q_{\infty}/\pi r^2$ es el flujo lineal en estado estacionario. Las demás variables tienen la misma notación que las ecuaciones antes presentadas.

*nls(q.ms ~ (Ks*exp(a*psi.m) * (1+4/pi/r/a)), start=list(Ks=5E-7, a=0.05), alg='port', control = list(maxiter = 100))*

Función para calcular en el software R la conductividad hidráulica saturada de campo y el parámetro alfa de Gardner.

Toma de muestras de suelo y análisis de laboratorio

Se tomó un kilogramo de suelo por cada horizonte genético de suelo. Se

dejaron secar a la sombra, se almacenaron y tamizaron. Posteriormente se les hicieron análisis físicos y químicos. Estos fueron la granulometría por el método del hidrómetro (Bouyoucos, 1951; Gee & Bauder, 1986), la densidad aparente con el método del cilindro (Blake & Hartge, 1986), conductividad eléctrica con un conductímetro (ISO 11265, 1994), pH con un medidor de pH (Bates, 1983), carbono orgánico y materia orgánica estimada (Walkey & Black, 1934).

De cada ensayo de infiltración se tomaron núcleos en los que se midió la hidrofobicidad según los métodos del *Water Drop Penetration Penetration Time* (WDPT) y de porcentajes de etanol -también denominado Molaridad de la Gota de Etanol, *Molarity of an Ethanol Droplet* (MED) o prueba de la tensión superficial crítica- (Van't Woudt, 1959; Letey et al., 2000). Para el MED se calcularon índices dinámicos de hidrofobicidad: el índice integrativo dinámico de repelencia (IRDI), los ángulos de contacto máximos y a 105°C, la humedad higrométrica en el ángulo de contacto máximo y mínimo y el área bajo la curva de hidrofobicidad (Regalado y Ritter, 2005).

Análisis estadísticos

Se realizó un análisis de componentes principales y de *K-means* para ver la agrupación y correlaciones de 44 variables edáficas, dasométricas y geográficas entre los cuatro sitios de estudio (Tabla 7).

Tabla 8. Claves de variables edáficas, dasométricas y geográficas

Clave	Variable	Tipo de indicador	Clave	Variable	Tipo de indicador
Q.cic	Presencia o ausencia de <i>Quercus</i> con cicatriz	duración	ALT.A	Altura media de árboles	cov. sitio
n	Número de incendios entre 1997 y 2017	frecuencia	DN.o	Diámetro normal de árboles que no son pináceas	cov. sitio
ALT.f	Altura de la llama	intensidad	DN.p	Diámetro normal de <i>Pinus</i>	cov. sitio
char	Profundidad del suelo con carbonos detectables	intensidad	expo.lad	Exposición de ladera	cov. sitio
a.105	Alfa de hidrofobicidad a 105°C en la superficie del suelo	severidad	mo_m ²	Materia orgánica por metro cuadrado de suelo	cov. sitio

Clave	Variable	Tipo de indicador	Clave	Variable	Tipo de indicador
a.max1	Alfa máxima de hidrofobicidad en la superficie del suelo	severidad	pend	Grados de pendiente del terreno	cov. sitio
a.max2	Alfa máxima de hidrofobicidad entre 1-2 cm de prof. del suelo	severidad	R	Porcentaje de arcillas en el primer horizonte	cov. sitio
ALT.hum	Espesor medio del humus	severidad	S3	Área de la curva de hidrofobicidad entre 3-5 cm de prof. del suelo	cov. sitio
AN.cic	Porcentaje medio de diámetro normal con cicatriz	severidad	w.min3	Humedad mínima con alfa perceptible entre 3-5 cm de prof.	cov. sitio
ce_A	Conductividad eléctrica del primer horizonte	severidad	a_h.ha	Densidad de arbustos y herbáceas por hectárea	respuesta del ecos.
humus	Tipo de humus (moll, moder, mull)	severidad	ALT.a	Altura media de arbustos	respuesta del ecos.
IRDI	Integrative repellency dynamic index en la superficie del suelo	severidad	ALT.h	Altura media de herbáceas	respuesta del ecos.
mo_A	Materia orgánica del primer horizonte del suelo	severidad	COB.A	Porcentaje de cobertura arbórea	respuesta del ecos.
S1	Área de la curva de hidrofobicidad en la superficie del suelo	severidad	COB.a	Porcentaje de cobertura arbustiva	respuesta del ecos.
S2	Área de la curva de hidrofobicidad entre 1-2 cm de profundidad	severidad	COB.h	Porcentaje de cobertura herbácea	respuesta del ecos.
w.max	Humedad en la máxima hidrofobicidad (α -max) en superficie	severidad	COB.a_h	Porcentaje de cobertura arbustiva y herbácea	respuesta del ecos.
w.min1	Humedad mínima con alfa perceptible en la superficie del suelo	severidad	Dom.A	Dominancia de Simpson (arbórea)	respuesta del ecos.
w.min2	Humedad mínima con alfa perceptible entre 1-2 cm de prof. del suelo	severidad	Dom.a	Dominancia de Simpson (arbustiva)	respuesta del ecos.
A	Porcentaje de arenas en el primer horizonte genético	cov. sitio	Dom.h	Dominancia de Simpson (herbácea)	respuesta del ecos.
A.ha	Densidad de árboles por hectárea	cov. sitio	H	Diversidad de Shannon con ln	respuesta del ecos.

Clave	Variable	Tipo de indicador	Clave	Variable	Tipo de indicador
a.max3	Alfa máxima de hidrofobicidad entre 3-5 cm de prof. del suelo	cov. sitio	Ks	Conductividad hidráulica de la superficie del suelo	respuesta del ecos.
alt	Elevación sobre el nivel del mar	cov. sitio	t_inc	Tiempo transcurrido tras el último incendio	respuesta del ecos.

Covariables del régimen en el sitio (cov. sitio) y variables indicadoras de la respuesta del ecosistema al régimen de incendios (respuesta del ecos.).

Para el análisis de K-means se establecieron los grupos con base en el cálculo de 26 índices de mejor agrupamiento y la mayoría de índices que coincidieran en un determinado número de grupos. Los índices incluidos fueron: *kl*, *ch*, *hartigan*, *ccc*, *scott*, *marriot*, *trcovw*, *tracew*, *friedman*, *rubin*, *cindex*, *db*, *silhouette*, *duda*, *pseudot2*, *beale*, *ratkowsky*, *ball*, *ptbiserial*, *gap*, *mcclain*, *gamma*, *gplus*, *tau*, *dunn*, *sdindex* y *sdbw*. Todos los análisis estadísticos y de índices se realizaron con el software R v3.5.1 (R Core Team, 2018).

Resultados

Remanentes forestales

Se constató que la vegetación en los cuatro sitios fue de *Pinus-Quercus*, con dominancia de *Pinus pseudostrobus* y codominancia de algunos encinos como *Quercus rugosa*, *Q. laurina* y *Q. crassipes*. En todos los sitios se encontraron cicatrices de incendio, las cuales se observaban como resto de carbón en la superficie de la corteza. Las cicatrices ocurrieron principalmente en pinos, aunque hubo dos sitios donde se encontraron cicatrices en encinos también. Sólo hubieron 12 árboles, además de los pinos, con cicatrices de incendio.

En los sitios se observó la presencia de especies herbáceas, arbustivas y arbóreas indicadoras de incendios. Entre las herbáceas se encontraron ejemplares de *Pteridium aquilinum* (helecho) y *Lopezia racemosa* (cabeza de alfiler); *Roldana sp.* se encontró tanto en forma herbácea como arbustiva. También se encontró un árbol asociado a incendios: *Calliandra grandiflora* (cabello de ángel).

El índice de dominancia D es similar entre estratos para cada uno de los tres sitios, la comunidad vegetal presenta una distribución de especies heterogénea. Los sitios de Santa Rita y Crucitas presentaron

valores altos de dominancia (Figura 17). Los valores bajos en Pinera Miguel y La Yácata están asociados a la presencia de otros árboles latifoliados de talla baja. Estos valores muestran una relación con la apertura de la cobertura forestal.

Las densidades arbóreas fueron muy contrastantes entre sitios, algunos con escasos árboles (170 por ha) y otros con densidades medias (hasta 620 por ha). El sitio con menor densidad fue Santa Rita, en tanto que Crucitas fue el sitio más poblado de árboles. Sin embargo, este valor debe entenderse en conjunto con el diámetro normal, ya que se observó que los árboles en Crucitas forman parte de un rodal coetáneo con un estado de latizal alto.

Las coberturas arbóreas fueron mayores al 90% excepto en el sitio de Pinera Miguel. En cuanto a las coberturas de herbáceas y arbustivas tuvieron valores contrastantes entre sitios, desde 0 hasta 97% para arbustivas y entre 20 y 94% para herbáceas. De no hacerse el ajuste SIG de las coberturas, algunas resultarían en valores mayores al 100%, esto es debido a que si un árbol estaba en el borde del muestreo y se registraba la cobertura parte de esta rebasaría los límites del círculo muestreado y generaría sobreestimaciones.

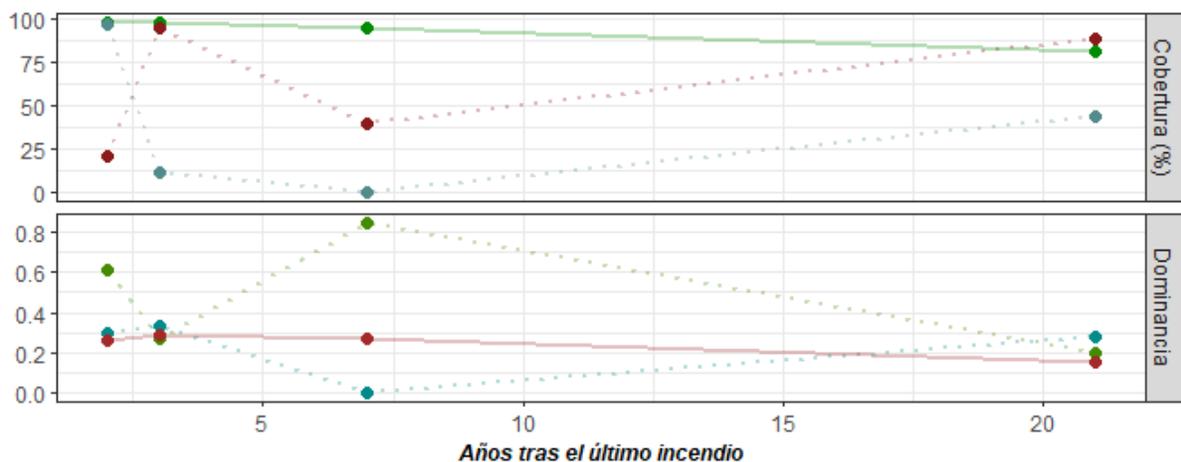


Figura 17. Cambios post-incendio en la cobertura y la dominancia de los estratos vegetales arbóreo (verde), arbustivo (azul) y herbáceo (rojo). Los valores con líneas sólidas muestran una correlación con el tiempo post-incendio.

Características edáficas

En el sitio de La Yácata se encontró, además de la mayor profundidad de carbones desde la superficie del suelo orgánico, un sistema de galerías con restos de carbón en su interior hasta poco más de 80 cm

de profundidad. Presumiblemente esto se podría tratar de los restos del sistema radicular de un pino adulto que, tras el incendio, tuvo un proceso de combustión latente.

Tabla 9. Resumen de análisis de laboratorio de los suelos estudiados

Sitio	Horizonte	Lim. i. cm	pH	CE dS/m	da g/cm ³	dr g/cm ³	COS kg/m ²	MO %	Clase textural
1	Oa/A	3	5.7	1.5	0.5	1.8	2.9	32.3	Franco
1	2AB	25	6.0	0.3	0.5	2.1	8.6	12.4	Franco
1	3ABb	55	6.0	0.2	0.5	2.1	6.6	7.4	Franco
1	3BCw	70	6.1	0.2	0.6	2.1	3.2	6.7	Franco Limoso
1	3CBw	95	5.9	0.2	0.6	2.1	4.4	5.4	Franco
1	4Btb	105	5.9	0.2	0.7	2.3	1.7	4.0	Franco Limoso
1	4Bt	120	5.8	0.2	0.9	2.3	3.3	4.0	Franco Arcilloso
2	Oi	2	-	-	0.5	-	6.0	100.0*	-
2	Oe	2.5	-	-	0.5	-	1.4	100.0*	-
2	Oa/A	4	6.2	1.0	0.6	1.9	1.4	31.6	Franco Arenoso
2	2Ah	32	5.8	0.3	0.5	1.9	9.1	12.1	Franco
2	2Bw	53	5.9	0.3	0.5	2.1	7.4	11.6	Franco
2	2C	88	5.8	0.2	0.6	2.1	11.1	9.4	Franco
2	3CBb	110	5.8	0.2	0.5	1.9	5.6	8.9	Franco
2	3C	120	6.0	0.1	0.4	2.1	2.2	8.5	Franco Arenoso
3	Oe	4	-	-	0.6	-	16.4	100.0*	-
3	Oa	12	5.3	1.6	0.4	1.9	5.9	33.6	Franco Arenoso
3	Ah	22	5.6	0.5	0.9	2.5	4.7	10.0	Franco Arenoso
3	2Bw1	50	6.0	0.2	0.6	2.1	7.7	7.7	Franco Arenoso
3	2Bw2	78	6.1	0.2	0.6	1.9	6.3	7.3	Franco
3	2BCt	120	6.1	0.2	0.6	1.9	8.7	6.7	Franco
4	A	19.5	5.7	0.1	0.7	2.1	7.8	10.5	Franco Limoso
4	2Ab	42	5.7	0.1	0.7	2.1	8.2	9.4	Franco Limoso
4	2Bw	61	5.8	0.1	0.7	2.1	5.7	7.5	Franco Limoso
4	2Bt	79	5.7	0.3	0.8	2.3	4.5	6.2	Franco limoso arcilloso
4	2Btg1	106	5.7	0.2	0.9	2.3	5.4	4.0	Arcilloso
4	2Btg2	120	5.9	0.1	1.0	2.5	2.8	3.8	Arcilloso

1=Santa Rita, 2=La Yácata, 3=Pinera Miguel, 4=Crucitas. Lim.i.=Límite inferior, CE=conductividad eléctrica, da=densidad aparente, dr=densidad real, COS=carbono orgánico del suelo y MO=materia orgánica. En los horizontes orgánicos no se calculó la textura debido al bajo contenido de suelo mineral. *Valor de 100% por ser horizontes orgánicos.

El tipo de humus fue *mull* en Santa Rita y Crucitas y *moder* en La Yácata y Pinera Miguel. En estos dos últimos sitios se encontró una mayor actividad biológica, tanto en la parte orgánica como en la parte superior mineral del suelo. Exceptuando Crucitas, los horizontes superficiales mostraron valores muy bajos de densidad aparente y densidad real, lo cual podría estar asociado a la cantidad de materia orgánica o a procesos de degradación ligados a erosión de ladera.

La ausencia de horizontes O y la presencia de discontinuidades litológicas en los sitios de Santa Rita y Crucitas indicaron una degradación ligera del suelo debida a erosión laminar. Dadas las condiciones de pendiente abrupta y ubicación en la parte alta de la ladera en el sitio de Crucitas es lógico pensar que la erosión implica pérdida de los materiales derivados del fuego sin la recepción de nuevos aportes, como pudo haber sucedido en Santa Rita, donde se muestreo en la parte media de ladera.

En concordancia con lo observado en torno a la erosión se encontró que la conductividad eléctrica del primer horizonte del sitio de Crucitas fue considerablemente inferior con respecto a los horizontes superficiales de los otros sitios. Es más, descartándose el valor atípico de Crucitas, estos aumentos mostraron una diferencia significativa ($p < 0.01$, $\chi^2 = 7.5$, $gl = 1$) con respecto al resto de los horizontes.

Los suelos de los 4 sitios mostraron propiedades ándicas. El sitio de Pinera Miguel mostró una discontinuidad litológica con un depósito negruzco poco intemperizado de cenizas volcánicas. El sitio de Crucitas tuvo un horizonte árgico dentro de los primeros 100 cm desde la superficie del suelo. Los suelos se clasificaron según el sistema WRB (IUSS Working Group, 2015) de la siguiente forma:

- 1 Silandic **Andosol** (Loamic)
- 2 Silandic **Andosol** (Loamic)
- 3 Folic Silandic **Andosol** (Loamic, Areninovic)
- 4 Endostagnic **Alisol** (Epiandic)

Infiltración e hidrofobicidad de los suelos

Se realizaron 60 ensayos de infiltración en los cuatro sitios. Sólo en 46 se pudo caracterizar la conductividad hidráulica debido al grado de repelencia al agua que presentaron algunos de los horizontes superficiales.

Tanto el parámetro alfa como la conductividad hidráulica presentaron una distribución log-normal. No se encontró una diferencia significativa entre los tres pisos de infiltración para la conductividad hidráulica ni para el parámetro de Gardner ($p>0.05$, $gl=2$, $F<3$).

Tabla 10. Conductividad hidráulica y α de Gardner en los sitios de estudio

Piso	n	Ks (mm hr ⁻¹)		α (m ⁻¹)	
		media	d.e.	media	d.e.
<i>Santa Rita</i>					
1	5	10.5	8.8	16.8	15.8
2	5	5.9	5.4	5.6	2.7
3	5	14.8	8.8	11.8	9.9
<i>La Yácata</i>					
1	5	22.3	23.2	31.6	27.5
2	5	17.8	20.9	22.8	22.3
3	3	13.2	7.6	8.6	1.4
<i>Pinera Miguel</i>					
1	3	7.3	5.5	20.2	25.6
2	1	1.4	-	1.0	-
3	3	6.5	4.1	5.7	1.1
<i>Crucitas</i>					
1	4	4.9	5.0	5.0	4.1
2	5	10.2	12.5	8.3	6.1
3	3	12.9	8.9	9.7	6.3

De los 60 ensayos de infiltración se realizaron 57 análisis de hidrofobicidad. No todas las muestras mostraron hidrofobicidad, en sitios como Santa Rita hubo muestras con muy poca o nula hidrofobicidad. Estas muestras son fácilmente identificables por tener un ángulo de contacto de 90 y desviaciones estándar de cero.

Los datos de ángulos de contacto (máximos y a 105°C) y de humedades en la máxima y mínima hidrofobicidad mostraron una distribución no normal. El resto de las variables presentaron distribuciones normales: Área de la curva de hidrofobicidad y el IRDI.

Tabla 11. Parámetros dinámicos de hidrofobicidad en los sitios de estudio

Piso	n	IRDI		a.105		a.max		w.max		w.min	
		media	d.e.								
<i>Santa Rita</i>											
1	5	59.8	14.3	91.6	2.7	96.8	7.8	0.28	0.33	0.70	0.57
2	2	45.0	-	90.0	-	90.0	-	0.00	-	0.10	-
3	5	45.0	0.0	90.0	0.0	90.0	0.0	0.00	0.00	0.10	0.00
<i>La Yácata</i>											
1	5	60.8	9.2	101.2	2.1	103.8	1.9	0.22	0.24	1.24	0.30
2	5	58.2	2.1	93.7	2.8	100.9	5.4	0.13	0.05	0.83	0.31
3	5	59.9	17.1	94.5	3.6	97.0	4.8	0.17	0.24	0.65	0.28
<i>Pinera Miguel</i>											
1	5	69.4	4.3	95.5	4.5	110.5	3.8	0.28	0.04	0.96	0.15
2	4	77.6	9.3	99.1	5.7	112.4	3.1	0.46	0.19	1.06	0.29
3	6	70.2	14.8	90.0	0.0	93.3	5.4	0.22	0.15	0.36	0.17
<i>Crucitas</i>											
1	5	58.2	13.0	93.3	2.7	96.6	6.0	0.14	0.17	0.62	0.33
2	5	56.4	13.9	93.1	2.8	95.2	5.3	0.12	0.18	0.40	0.33
3	5	71.1	16.0	90.0	0.0	93.5	2.8	0.46	0.34	0.70	0.32

n=número de ensayos, d.e.=desviación estándar

Tabla 12. Modelos de hidrofobicidad significativos

Modelo	Prueba	Estadístico	gl	p
IRDI ~ sitios	ANOVA	6.945	3	<0.001
a.max ~ pisos	KW	12.166	2	0.002
a.max ~ sitios	KW	20.655	3	<0.001
a.105 ~ pisos	KW	12.979	2	0.002
a.105 ~ sitios	KW	15.289	3	0.002
w.min ~ pisos	KW	11.093	2	0.004
w.min ~ sitios	KW	11.723	3	0.008

KW=Kruskal-Wallis, gl=grados de libertad

La humedad en el ángulo de contacto máximo no mostró diferencias significativas entre sitios ni entre pisos ($F=2.0814$, $gl=3$, $p>0.05$ y $F=0.0438$, $gl=2$, $p>0.05$ respectivamente). El índice integrativo dinámico de repelencia (IRDI) no mostró diferencias significativas entre pisos ($p>0.05$, $F=0.0107$, $gl=2$), pero sí entre sitios ($p<0.001$,

F=6.945, gl=3). Por su parte, el ángulo de contacto máximo, el ángulo de contacto a 105°C y la humedad de la mínima hidrofobicidad mostraron diferencias significativas tanto entre sitios como entre pisos de infiltración ($p < 0.01$ en todos los casos, véase tabla 10).

Interacciones ecológicas fuego-vegetación-suelo

Del análisis multivariado de componentes principales se identificó que con tres de las cuatro componentes se puede explicar prácticamente el 100% de la variación de los datos (Figura 18).

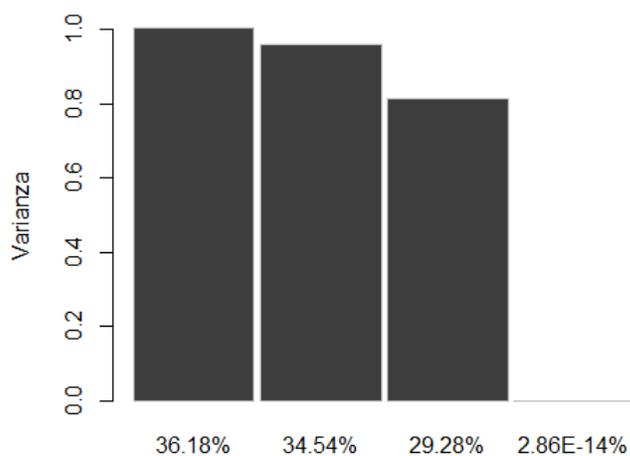


Figura 18. Variación explicada por los componentes del PCA (*Scree plot*)

Tabla 13. Índices para determinar el mejor número de K-means

Índice	Número de clusters	Valor	Índice	Número de clusters	Valor
<i>duda</i>	0	0.36	<i>kl</i>	6	102.29
<i>gap</i>	0	0.56	<i>marriot</i>	6	8724.60
<i>beale</i>	1	0.38	<i>silhouette</i>	6	0.42
<i>mcclain</i>	2	0.45	<i>sdindex</i>	6	1.65
<i>dunn</i>	2	0.27	<i>friedman</i>	9	11.02
<i>trcovw</i>	3	639.69	<i>ch</i>	11	33.36
<i>tracew</i>	3	9.50	<i>ccc</i>	11	2.40
<i>ball</i>	3	19.53	<i>rubin</i>	11	-1.26
<i>ptbiserial</i>	3	0.69	<i>cindex</i>	11	0.30
<i>tau</i>	3	189.37	<i>gamma</i>	11	0.94
<i>ratkowsky</i>	4	0.39	<i>gplus</i>	11	2.27
<i>hartigan</i>	5	10.75	<i>db</i>	12	0.72
<i>scott</i>	5	44.63	<i>sdbw</i>	12	0.11

Por su parte, de acuerdo con la mayoría de índices de k-means se encontró que con 11 grupos se explica de forma más robusta la variación de los datos entre los cuatro sitios. Los índices que identificaron 11 como el mejor número de grupos fueron: *ch*, *ccc*, *rubin*, *cindex*, *gamma* y *gplus* (Tabla 12).

Del PCA se puede apreciar que los parámetros ecológicos de los sitios de La Yácata y Pinera Miguel covarían de forma muy parecida, sin relación con los de Santa Rita y muy poca con la de Crucitas (Figura 19). La varianza de los valores se explica poco por el sitio de La Yácata en comparación con el resto de los sitios. Las mayores longitudes de vector las tienen Santa Rita y Crucitas.

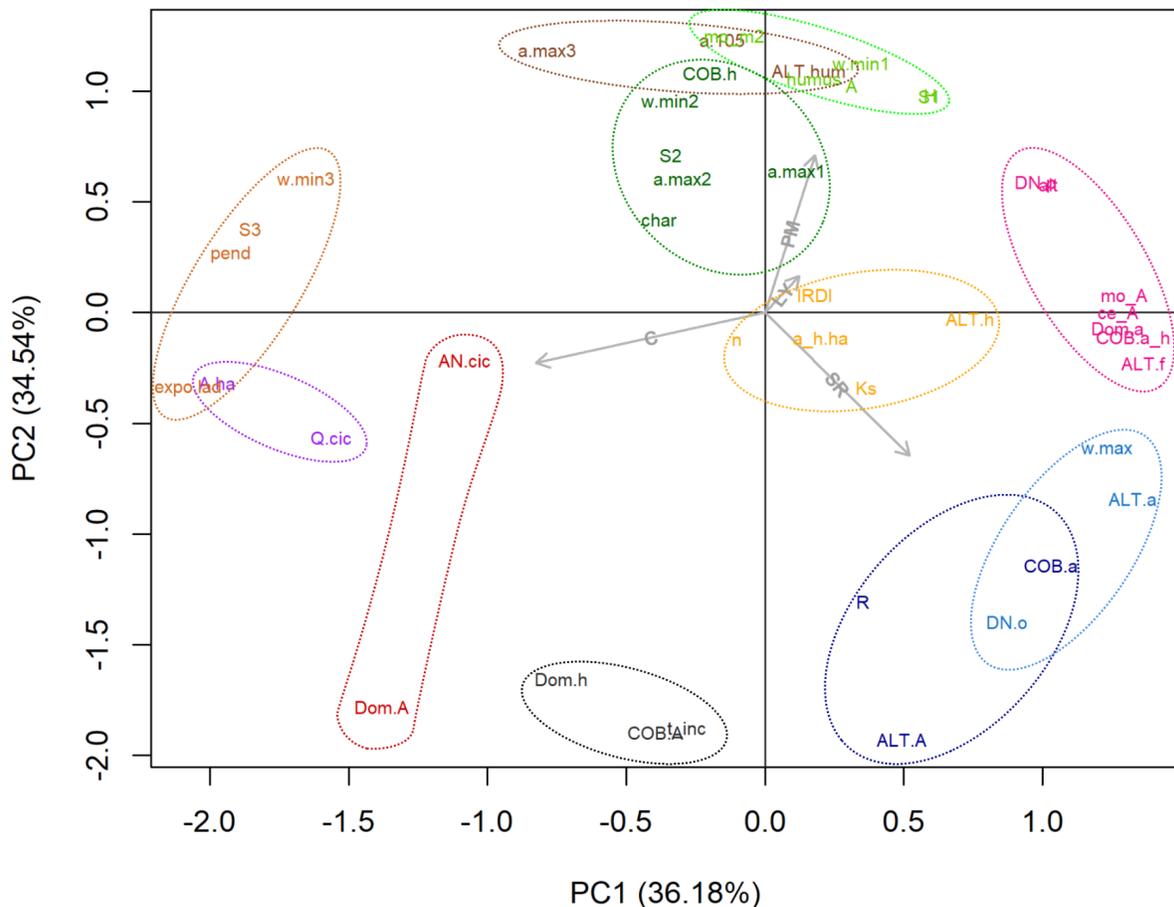


Figura 19. Interacción entre variables ecológicas agrupadas por colores según análisis de k-means. Las flechas indican la similitud entre sitios: Santa Rita (SR), La Yácata (LY), Pinera Miguel (PM) y Crucitas (CR).

A continuación se describen las interacciones identificadas para cada uno de los 11 clusters:

Cluster 1 - color negro

Todas las variables de este clúster son de respuesta del ecosistema, el tiempo post-incendio relacionado con la cobertura arbórea y la dominancia de herbáceas. Estas relaciones cobran sentido en términos del proceso de sucesión ecológica y de la regeneración de las copas de los árboles posteriores a cada evento de fuegos. Tras un incendio, aparecen especies pioneras indicadoras de incendios como *Pteridium aquilinum* (helecho), *Lopezia racemosa* (cabeza de alfiler) o *Roldana sp.*, las cuales se observaron predominantemente en los sitios recientemente quemados.

Tabla 14. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 1

<i>Clave</i>	<i>Unidad</i>	<i>1. Santa Rita</i>	<i>2. La Yácata</i>	<i>3. Pinera Miguel</i>	<i>4. Crucitas</i>	<i>Tipo de indicador</i>	<i>Distribución</i>
COB.A	%	98.065	97.276	81.253	94.735	resp. del ecos.	
Dom.h		0.26	0.29	0.15	0.27	resp. del ecos.	
t_inc	año	2017	2016	1998	2012	resp. del ecos.	

Este clúster no muestra una gran relación con cualquiera de los otros clusters dada su ubicación en el espacio tridimensional.

Cluster 2 - color verde oscuro

La variación de este clúster está definida principalmente por la segunda y tercer componente. Se integra por variables ligadas a la hidrofobicidad máxima desde la superficie a los primeros dos centímetros del suelo, así como la profundidad de carbones y la cobertura de herbáceas.

El sitio de la Yácata se separa estadísticamente del resto en casi todas las variables del clúster. Este sitio también es el único que ha tenido dos incendios en lugar de uno. Aunado al tipo de mantillo tipo *moder* es probable que en ambas ocasiones haya tenido incendios subterráneos o al menos con una combustión latente que permitiera tal profundidad de carbones y tales cambios a la hidrofobicidad máxima del suelo.

Esto podría reflejar una relación inversamente proporcional con las

variables de ese cluster (dominancia de árboles y porcentaje del diámetro normal cubierto por cicatriz), no obstante, se encuentran tan separadas entre sí que las relaciones serían en todo caso mínimas.

Tabla 15. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 2

<i>Clave</i>	<i>Unidad</i>	<i>1. Santa Rita</i>	<i>2. La Yácata</i>	<i>3. Pinera Miguel</i>	<i>4. Crucitas</i>	<i>Tipo de indicador</i>	<i>Distribución</i>
char	<i>cm</i>	3	11	6	5	intensidad	
a.max1 **	°	96.8 (a) n=12	110.5 (b) n=15	103.8 (ab) n=15	96.6 (a) n=15	severidad	no normal
a.max2 ***	°	90 (a) n=12	112.4 (b) n=15	100.9 (a) n=15	95.2 (a) n=15	severidad	normal
S2 *	° <i>kg/kg</i>	4.5 (a) n=12	81.6 (b) n=15	48.1 (ab) n=15	25.4 (a) n=15	severidad	normal
w.min2 **	<i>kg/kg</i>	0.10 (a) n=12	1.06 (b) n=15	0.83 (ab) n=15	0.40 (a) n=15	severidad	normal
COB.h	%	20.17	94.38	88.02	39.5	resp. del ecos.	

Si el parámetro contaba con repeticiones se hicieron comparaciones de ANOVA y Kruskal-Wallis, según la distribución de los datos; de ahí, $p > 0.05$ (-), $p < 0.05$ (*), $p < 0.01$ (**), $p < 0.001$ (***) y tamaño de muestra (n). Entre paréntesis el nombre del agrupamiento estadístico entre sitios.

Este clúster tiene una ubicación diametralmente opuesta al centroide del cluster 3 - rojo.

Cluster 3 - color rojo

Tabla 16. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 3

<i>Clave</i>	<i>Unidad</i>	<i>1. Santa Rita</i>	<i>2. La Yácata</i>	<i>3. Pinera Miguel</i>	<i>4. Crucitas</i>	<i>Tipo de indicador</i>	<i>Distribución</i>
AN.cic ***	%	93.5 (a) n=13	84.8 (b) n=8	100 (ac) n=7	100 (c) n=54	severidad	escala libre
Dom.A		0.61	0.27	0.20	0.85	resp. del ecos.	

Si el parámetro contaba con repeticiones se hicieron comparaciones de ANOVA y Kruskal-Wallis, según la distribución de los datos; de ahí, $p > 0.05$ (-), $p < 0.05$ (*), $p < 0.01$ (**), $p < 0.001$ (***) y tamaño de muestra (n). Entre paréntesis el nombre del agrupamiento estadístico entre sitios.

Este clúster tiene dos elementos que en realidad se encuentran muy separados entre sí. Aunque se observa una posible correlación entre el porcentaje del diámetro normal de pinos cubierto por cicatrices y el índice de dominancia de árboles (que finalmente se trataría de dominancia de pinos), el sitio de Pinera Miguel muestra un índice de

dominancia de árboles bajo y todos sus pinos muestran cicatriz en todos sus diámetros normales.

Cluster 4 - color azul marino

Tabla 17. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 4

<i>Clave</i>	<i>Unidad</i>	<i>1. Santa Rita</i>	<i>2. La Yácata</i>	<i>3. Pinera Miguel</i>	<i>4. Crucitas</i>	<i>Tipo de indicador</i>	<i>Distribución</i>
ALT.A ***	<i>m</i>	21.97 (a) n=17	12.91 (b) n=44	11.53 (b) n=29	13.51 (bc) n=62	cov. sitio	no normal
R	<i>%</i>	19.64	9.64	15.08	13.64	cov. sitio	
COB.a	<i>%</i>	96.6	11.52	43.51	0	resp. del ecos.	

Si el parámetro contaba con repeticiones se hicieron comparaciones de ANOVA y Kruskal-Wallis, según la distribución de los datos; de ahí, $p > 0.05$ (-), $p < 0.05$ (*), $p < 0.01$ (**), $p < 0.001$ (***) y tamaño de muestra (n). Entre paréntesis el nombre del agrupamiento estadístico entre sitios.

Aunque no tan marcada como el cluster rojo, este cluster también presenta una buena amplitud entre sus variables. Por lo que las correlaciones entre sus propias variables serán limitadas. De igual forma, tampoco muestra una relación aparente con cualquiera de los otros clusters, dada su ubicación en el espacio tridimensional.

Un aspecto destacable es la diferenciación de la altura de los árboles de Santa Rita, la cual se diferencia estadísticamente del resto de los sitios. Tanto esta altura de sus árboles como la baja cobertura forestal explicarían la gran cobertura en arbustivas que presentó este sitio.

Cluster 5 - color rosa

Este cluster es uno de los que tienen mayor agregación dentro de todo el análisis de componentes y *K-means*. Se integra por variables que reflejan la intensidad y la severidad de los fuegos, así como algunas de sus respuestas al ecosistema y covariables del sitio. Sólo el diámetro normal de pinos y altitud del sitio se alejan del resto, lo cual es un aspecto esperado, ya que se esperaba que esas covariables no influyeran en otros parámetros del régimen.

La cobertura de arbustivas y herbáceas refleja el estado del sotobosque en general. Parece existir una relación con la dominancia de las arbustivas, las cuales fueron nulas en el sitio de Crucitas. La pendiente de dicho sitio y su posición fisiográfica en un valle

propician procesos erosivos de ladera que podrían ocasionar que los nutrientes concentrados tras el incendio, así como la materia orgánica en general, se pierdan de forma progresiva del sitio.

Por su ubicación en el espacio tridimensional, este cluster podría tener una relación inversamente proporcional con el cluster 10 - morado, el cual tiene variables de árboles por hectárea y presencia de *Quercus* con cicatriz.

Tabla 18. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 5

<i>Clave</i>	<i>Unidad</i>	<i>1. Santa Rita</i>	<i>2. La Yácata</i>	<i>3. Pinera Miguel</i>	<i>4. Crucitas</i>	<i>Tipo de indicador</i>	<i>Distribución</i>
ALT.f ***	<i>m</i>	2.33 (a) n=13	2.08 (a) n=8	2.24 (a) n=7	1.5 (b) n=54	intensidad	normal
ce_A	<i>mS</i>	1.5	1	1.6	0.1	severidad	
mo_A	<i>%</i>	32.3	31.6	33.6	10.5	severidad	
alt	<i>m</i>	2261	2353	2408	2031	cov. sitio	
DN.p ***	<i>cm</i>	50.13 (a) n=13	46.93 (ab) n=8	74.86 (ac) n=7	17.00 (d) n=54	cov. sitio	no normal
COB.a_h	<i>%</i>	97.53	95.21	92.65	39.5	resp. del ecos.	
Dom.a		0.30	0.33	0.28	0	resp. del ecos.	

Si el parámetro contaba con repeticiones se hicieron comparaciones de ANOVA y Kruskal-Wallis, según la distribución de los datos; de ahí, $p > 0.05$ (-), $p < 0.05$ (*), $p < 0.01$ (**), $p < 0.001$ (***) y tamaño de muestra (n). Entre paréntesis el nombre del agrupamiento estadístico entre sitios.

Cluster 6 - color amarillo

En este cluster se observan por un lado variables ligadas al espectro de hidrofobicidad en diferentes condiciones de humedad (índice IRDI) en la superficie del suelo y por otro aspectos ligados a la frecuencia de incendios y la respuesta del ecosistema en parámetros como la densidad de plantas en el sotobosque, la altura media de herbáceas y la conductividad hidráulica del suelo.

No obstante a tener dos incendios, la hidrofobicidad y la conductividad hidráulica del sitio de la Yácata no muestran diferencias estadísticamente significativas con respecto al resto de los sitios. Por su parte existen algunas características del cluster 2 - verde, como la profundidad de carbones, que muestran cierta correlación con el número de incendios.

A diferencia de La Yácata, el sitio de Crucitas sí se separa estadísticamente del resto de los sitios por la altura de las

herbáceas. Aunque esta disminución se observa también en los otros parámetros del cluster es probable que se deba más a su pendiente más abrupta o a su propia composición vegetal del sotobosque, donde se encontró predominantemente *Pteridium aquilinum* (helechos). De forma negativa, muestra también una correlación con el porcentaje del diámetro de pinos cubierto por cicatriz (parámetro del cluster rojo).

Tabla 19. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 6

Clave	Unidad	1. Santa Rita	2. La Yácata	3. Pinera Miguel	4. Crucitas	Tipo de indicador	Distribución
n		1	2	1	1	frecuencia	
IRDI -	°	59.8 n=12	69.3 n=15	60.8 n=15	58.2 n=15	severidad	normal
a_h.ha	ind./ha	11900	21100	11500	9800	resp. del ecos.	
ALT.h ***	m	1.26 (a) n=15	1.87 (ab) n=193	1.23 (ac) n=110	0.73 (d) n=98	resp. del ecos.	no normal
Ks -	mm/hr	10.51 n=5	22.27 n=5	7.25 n=3	4.9 n=4	resp. del ecos.	Log-normal

Si el parámetro contaba con repeticiones se hicieron comparaciones de ANOVA y Kruskal-Wallis, según la distribución de los datos; de ahí, $p > 0.05$ (-), $p < 0.05$ (*), $p < 0.01$ (**), $p < 0.001$ (***) y tamaño de muestra (n). Entre paréntesis el nombre del agrupamiento estadístico entre sitios.

Cluster 7 - color azul claro

Tabla 20. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 7

Clave	Unidad	1. Santa Rita	2. La Yácata	3. Pinera Miguel	4. Crucitas	Tipo de indicador	Distribución
w.max -	kg/kg	0.28 n=12	0.28 n=15	0.22 n=15	0.14 n=15	severidad	no normal
DN.o *	cm	30.75 (a) n=4	27.28 (ab) n=28	13.79 (b) n=22	13.06 (b) n=5	cov. sitio	no normal
ALT.a **	m	2.22 (a) n=104	1.54 (b) n=18	1.16 (b) n=5	0 n=0	resp. del ecos.	no normal

Si el parámetro contaba con repeticiones se hicieron comparaciones de ANOVA y Kruskal-Wallis, según la distribución de los datos; de ahí, $p > 0.05$ (-), $p < 0.05$ (*), $p < 0.01$ (**), $p < 0.001$ (***) y tamaño de muestra (n). Entre paréntesis el nombre del agrupamiento estadístico entre sitios.

A pesar de que en dos dimensiones este cluster no aparente estar bien agrupado, cuando se observa en tres se aprecia mejor su relativo agrupamiento. Está integrado por dos variables dasométricas que muestran diferencias significativas entre Santa Rita y los demás

sitios y una variable hidrofísica del suelo sin diferencia entre sitios.

La altura de la vegetación arbustiva en el sitio de Santa Rita es significativamente mayor que en resto de los sitios, lo cual muestra una relación positiva con el diámetro normal de no pináceas. Buena parte de la vegetación arbustiva en los sitios llegaba a cierto porte donde su forma de vida era arbórea, por lo que era esperable que existiese una relación con el diámetro normal de todas las latifoliadas.

En el PCA se puede apreciar que estas variables tienen una relación inversamente proporcional con las del clúster 8 de color naranja, especialmente para variables como la pendiente o la humedad de la hidrofobicidad mínima a cinco centímetros de profundidad del suelo (variables ligadas a las condiciones generales del sitio).

Cluster 8 - color naranja

Tabla 21. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 8

<i>Clave</i>	<i>Unidad</i>	<i>1. Santa Rita</i>	<i>2. La Yácata</i>	<i>3. Pinera Miguel</i>	<i>4. Crucitas</i>	<i>Tipo de indicador</i>	<i>Distribución</i>
expo.lad	°	70	115	112	204	cov. sitio	
pend	°	19	23	24	27	cov. sitio	
S3 **	° kg/kg	4.5 (a) n=12	26.9 (ab) n=15	39.6 (b) n=15	53.6 (bc) n=15	cov. sitio	no normal
w.min3 **	kg/kg	0.10 (a) n=12	0.36 (ab) n=15	0.65 (b) n=15	0.70 (b) n=15	cov. sitio	no normal

Si el parámetro contaba con repeticiones se hicieron comparaciones de ANOVA y Kruskal-Wallis, según la distribución de los datos; de ahí, $p > 0.05$ (-), $p < 0.05$ (*), $p < 0.01$ (**), $p < 0.001$ (***) y tamaño de muestra (n). Entre paréntesis el nombre del agrupamiento estadístico entre sitios.

Este cluster tiene buena parte de todas las covariables del sitio, las cuales se pretendía tuvieran poca asociación con el resto de los atributos ecológicos del régimen. El sitio de Santa Rita se diferenció estadísticamente del resto de los sitios por su menor hidrofobicidad a cinco centímetros de profundidad del suelo (profundidad de control donde se esperan influencias mínimas del régimen de incendios).

Por su posición en el espacio tridimensional de componentes principales, sólo muestra una relación inversamente proporcional con el cluster 7 azul claro, el cual tiene una variable de hidrofobicidad

y dos dasométricas.

Cluster 9 - color café

Tabla 22. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 9

Clave	Unidad	1. Santa Rita	2. La Yácata	3. Pinera Miguel	4. Crucitas	Tipo de indicador	Distribución
a.105*	o	91.6 (a) n=12	95.5 (ab) n=15	101.2 (b) n=15	93.3 (a) n=15	severidad	no normal
ALT.hum	cm	2	4	12	1.5	severidad	
a.max3*	o	90.0 (a) n=12	93.3 (ab) n=15	97.0 (b) n=15	93.5 (b) n=15	cov. sitio	no normal

Si el parámetro contaba con repeticiones se hicieron comparaciones de ANOVA y Kruskal-Wallis, según la distribución de los datos; de ahí, $p > 0.05$ (-), $p < 0.05$ (*), $p < 0.01$ (**), $p < 0.001$ (***) y tamaño de muestra (n). Entre paréntesis el nombre del agrupamiento estadístico entre sitios.

En este cluster se agrupan dos variables edáficas ligadas a la severidad y una covariable del sitio. Las variables de hidrofobicidad no muestran diferencias consistentes entre sitios. La hidrofobicidad del suelo secado a 105°C en la superficie del suelo muestra una buena correlación con el espesor del humus.

Este cluster está bastante relacionado con el 11 verde claro, especialmente si se aprecia su distribución en las primeras dos componentes principales. Para el resto de los clusters, éste no muestra correlaciones destacables.

Cluster 10 - color morado

Tabla 23. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 10

Clave	Unidad	1. Santa Rita	2. La Yácata	3. Pinera Miguel	4. Crucitas	Tipo de indicador	Distribución
Q.cic		No	Sí	No	Sí	duración	
A.ha	ind./ha	170	440	290	620	cov. sitio	

En este cluster se observan sólo dos variables, los árboles por hectárea y la presencia de encinos con cicatriz. Se asumió que la presencia de *Quercus spp.* con cicatrices darían cuenta de la duración del incendio dada la dificultad para que arda dicha madera en comparación con la de los pinos.

Este cluster muestra una relación negativa con el cluster rosa, el cual contiene otras variables del régimen asociadas a la intensidad y severidad: altura de la llama, conductividad eléctrica y materia orgánica en la superficie del suelo.

Cluster 11 - verde claro

Tabla 24. Parámetros ecológicos y comparaciones estadísticas del cluster 11

<i>Clave</i>	<i>Unidad</i>	1. Santa Rita	2. La Yácata	3. Pinera Miguel	4. Crucitas	<i>Tipo de indicador</i>	<i>Distribución</i>
humus		1	2	2	1	severidad	
S1 -	° kg/kg	48.1 n=12	66.5 n=15	75.6 n=15	36.8 n=15	severidad	normal
w.min1 -	kg/kg	0.70 n=12	0.96 n=15	1.24 n=15	0.62 n=15	severidad	normal
A	%	34.36	50.36	50.92	32.36	cov. sitio	
mo_m²	kg/m ²	30.77	44.26	49.66	34.42	cov. sitio	
H		2.05	2.27	2.7	1.78	resp. del ecos.	

Si el parámetro contaba con repeticiones se hicieron comparaciones de ANOVA y Kruskal-Wallis, según la distribución de los datos; de ahí, $p > 0.05$ (-), $p < 0.05$ (*), $p < 0.01$ (**), $p < 0.001$ (***) y tamaño de muestra (n). Entre paréntesis el nombre del agrupamiento estadístico entre sitios.

En este cluster se agrupan variables edáficas ligadas a la severidad y covariables del sitio, así como la diversidad como variable de respuesta ecosistémica. De este subconjunto resalta la alta correlación entre porcentaje de arenas, la humedad en la mínima hidrofobicidad en la superficie del suelo, así como el tipo de humus. No obstante, las variables de hidrofobicidad de este clúster no mostraron una diferencia significativa entre los sitios.

Otra asociación fuertemente correlacionada es la de la sumatoria de ángulos de contacto dentro del espectro de humedad (S1) con el índice de Shannon para todas las especies (H).

De este cluster resalta sólo una correlación inversa en el índice de Shannon con respecto a las dominancias de Simpson en los clusters negro y rojo. Por otra parte hay correlaciones con el cluster café, como la materia orgánica por perfil con el ángulo de contacto del suelo a 105°C.

Discusión

Atributos destacables de los regímenes de fuego

Se observó una concordancia general entre aspectos dasométricos y edáficos entre los sitios, sólo el sitio de Crucitas mostró marcadas diferencias que se ven plasmadas tanto en el PCA como en la clasificación de sus suelos con respecto al resto. El resto de los sitios se pueden englobar como bosques de *Pinus-Quercus* en laderas moderadas con *Silandic Andosols* e incendios poco frecuentes de poco más de dos metros de altura de llama y menos de 5 ha de extensión.

Por otro lado se puede destacar la gran similitud resultante entre los sitios de Pinera Miguel y La Yácata (véanse Figura 19 y tablas 16 y 17). En la Yácata fue evidente la presencia de una combustión latente que acompañó al incendio superficial. Se observó un sistema de galerías y macroporos y restos de carbón de raíces en estas galerías hasta más de 50 cm (Figura 20). En la matriz del suelo se observaron carbones a más de 10 cm de profundidad. Pinera Miguel comparte el tipo de humus, texturas superficiales franco arenosas y el área de hidrofobicidad en la superficie del suelo (variable S1). Resulta factible pensar que Pinera Miguel también presentó combustión latente.

Los incendios subterráneos, como el de la Yácata, se caracterizan por la presencia de combustión latente, donde entre mayor sea el espesor de los horizontes de suelos forestales O_a u O_e mayor será la duración de la combustión latente y, por tanto, la severidad bajo tierra (Neary et al., 1999; Varner III et al., 2005; Rein, 2015). Los horizontes de los cuatro sitios con más de 20% de materia orgánica son susceptibles de presentar combustión latente tras un incendio superficial (Rein, 2015). En el caso de la Yácata, las grietas, galerías y macroporos de su primer incendio pudieron haber aumentado la disponibilidad de oxígeno para que su segundo incendio subterráneo fuera aún más profundo.

Es por lo anterior que resulta lógico que, tras dos incendios lentos el sitio de La Yácata tenga carbones en hasta 11 cm. La transferencia de calor por combustión latente puede elevar la temperatura del suelo a más de 60°C en profundidades de hasta 20 cm (Varner III et al., 2005). En suelos de turbera estas profundidades pueden llegar a más de 50 cm (Wösten et al., 2006). La combustión latente en suelos orgánicos puede comenzar con humedades gravimétricas hasta de 120% (Neary et al., 1999). Las humedades de campo promedio registradas durante los muestreos en temporada de lluvias en los horizontes orgánicos de La Yácata y Pinera Miguel fueron de 102 y 79%, respectivamente.



Figura 20. Sistema de galerías tras el incendio subterráneo de La Yácata.

Es probable que el primer incendio subterráneo de La Yácata dejase en la memoria edáfica del suelo macroporos y grietas donde había raíces, los cuales permitieron una mayor oxigenación durante el segundo incendio, lo cual permitió a su vez una combustión latente aún más profunda que la anterior. Durante la temporada de estiaje los horizontes orgánicos suelen estar secos (Wösten et al., 2006), no obstante los Andosols se caracterizan por su alta retención de humedad en la parte mineral (IUSS Working Group WRB, 2015). Aunque la conductividad térmica del suelo es muy baja, la del vapor del agua no lo es; si la combustión latente dura el suficiente tiempo puede cambiar el estado del agua de líquido a gas en el espacio poroso del suelo y permear más profundo en el suelo, además de elevar la temperatura del suelo en la parte donde se vuelve a condensar (Agee, 1993; Neary et al., 1999).

En Pinera Miguel sólo se tiene un incendio registrado y su espesor de humus es considerablemente mayor que en La Yácata. Esto aumenta el riesgo de que pueda ocurrir un incendio subterráneo, que pueda producir efectos similares a los observados en la Yácata. El que el suelo mantenga más humedad generando efectos de calor a mayor profundidad no es necesariamente un efecto negativo. Se ha visto que la disipación de calor puede ser un proceso amortiguador de la intensidad del incendio que reduce el riesgo de inviabilidad en el banco de semillas por choque térmico aunque aumente la profundidad a la que se puedan encontrar daños a la rizósfera, cambios estructurales en la materia orgánica y la presencia de compuestos hidrofóbicos (Neary et al., 1999; Varner III et al., 2005; Martínez-Torres et al.,

2015).

El clúster que mejor retrata los efectos de la combustión latente es el verde oscuro. La profundidad de carbones es un excelente indicador en la memoria edáfica de la intensidad del incendio y sus efectos en la severidad sobre aspectos de la hidrofobicidad como la repelencia máxima y la humedad con mínima hidrofobicidad. De alguna forma la cobertura de herbáceas parece correlacionarse bastante bien con estas características.

Otros clusters relacionados con las características de los horizontes orgánicos vistos como parte de la cama de combustibles son el café y el verde claro. En ambos se ven los efectos del tipo de cama de combustible y de tener un segundo incendio subterráneo sobre aspectos de hidrofobicidad. Aunque un gran espesor en los horizontes orgánicos o la presencia de humus tipo moder o moll se ha visto asociado a los efectos no deseables de la supresión de incendios (Varner III *et al.*, 2005), no se debe de olvidar que también puede reflejar una alta productividad primaria del ecosistema, como ocurre comúnmente en los bosques templados tropicales (Fulé *et al.*, 2011).

Respecto a la correlación entre la conductividad hidráulica y la densidad del sotobosque (arbustivas y herbáceas por hectárea), se puede explicar por la densidad del sistema radicular vinculada a la densidad de plantas en el sotobosque, la cual se ha visto está relacionada directamente con la infiltración de los suelos (Gómez-Tagle *et al.*, 2014). Ello aunado a la memoria edáfica de combustiones latentes anteriores. La presencia de canales de flujo preferencial para la infiltración de los suelos contrarresta el efecto de la hidrofobicidad de los mismos.

Aunque no se encuentran en el mismo cluster, existe una cercanía en términos de correlación entre el cluster amarillo y el verde oscuro. El número de incendios está vinculado con la profundidad de carbones como ya se mencionó. Igualmente hay una cierta relación con el ángulo de contacto máximo de los pisos uno y dos desde la superficie del suelo y la humedad con mínima hidrofobicidad en el piso dos. Nuevamente, parecen ser rasgos vinculados a la memoria edáfica y a la historia de uso.

Del cluster verde claro se puede destacar que, aunque entre sitios no hay diferencias significativas, la relación entre las características de concentración de arenas con el tipo de humus y la humedad con hidrofobicidad mínima en la superficie del suelo. Estas relaciones con la hidrofobicidad ya han sido constatadas antes (Jordán *et al.*, 2013).

Para que se forme un tipo de humus tipo moder se requieren mayores condiciones de humedad que con uno tipo mull, por lo que esto podría implicar un lavado de limos y arcillas hacia horizontes más profundos mediante el proceso de iluviación (Buol & McCracken, 1990). No obstante, en el sitio de Pinera Miguel el alto contenido de arenas es debido al depósito volcánico reciente sobre el que se desarrolla un nuevo horizonte A.

El patrón formado al ver los cambios en la cobertura arbórea y la diversidad de herbáceas según el año tras el incendio (cluster negro) es inversamente proporcional y no correlacionado positivamente como se esperaría según la dinámica de claros tras un disturbio (Pickett & White, 1985; Martínez-Ramos *et al.*, 1988; Agee, 1993). A pesar de ello sí se observa que la disponibilidad de luz tiene influencias sobre la diversidad de arbustivas y herbáceas. Al estar más cerrados, la luz en los claros se vuelve un recurso altamente limitante para el sotobosque y la presión de competencia excluye especies dejando sólo las plantas más competitivas y tolerantes a la sombra (Pickett & White, 1985). Los daños al sistema radicular por combustión latente o al cambium por resinación generan estrés en los árboles, lo cual los vuelve más susceptibles a enfermedades y merma su crecimiento en el mediano plazo (Neary *et al.*, 1999; Varner III *et al.*, 2005). Es probable que los efectos a la cobertura sean consecuencia del estrés fisiológico de los árboles posterior al disturbio.

El que la energía de los combustibles sea finita y se libere o en forma de llamas o en forma de combustión latente (Rein, 2015), da cuenta de la relación inversa entre las variables indicadoras del tiempo de residencia del incendio agrupadas en el cluster negro (*Quercus* quemados y árboles por hectárea) contra la altura de las cicatrices de los pinos del cluster rosa. Existen otras métricas para entender la intensidad como la temperatura o la energía radiante, sin embargo, la duración es fundamental para entender los efectos de severidad en el suelo (Neary *et al.*, 1999; Mataix-Solera *et al.*, 2007). Al haber llamas se producen altas temperaturas por encima del suelo en periodos cortos de tiempo y temperaturas altas sólo en uno o dos centímetros del suelo (Rein, 2015). Sólo con combustión latente se aumenta el tiempo de residencia del fuego y del calor a mayores profundidades (Keeley, 2009).

Existe también la posibilidad de tener incendios de copa, sin embargo, en estos sitios es poco probable que esto suceda. Para que un incendio de copas activo o pasivo ocurra se debe rebasar un umbral mínimo de entre 500 y 1000 árboles por hectárea (Agee, 1996; Cruz *et al.*, 2005; Álvarez *et al.*, 2013). Las densidades arbóreas de los cuatro sitios

están por debajo del umbral que detona incendios de copa activos en diversos templados bosques del mundo.

Una premisa inicial de este trabajo fue que la presencia de *Quercus spp.* con cicatrices estaría relacionada con un mayor tiempo de residencia del incendio, al menos el suficiente para dejar cicatriz mediante la combustión de líquenes o de corteza directamente. Parece que, mientras se esté debajo del umbral que produce incendios de copa, la densidad arbórea es una barrera para el incendio superficial y propiciará entonces una combustión latente en incendios subterráneos, siempre que existan horizontes orgánicos que lo permitan.

La altura de la cicatriz de los pinos de los cuatro sitios también muestra una relación positiva con la conductividad eléctrica y la materia orgánica (Figura 21). Aunque no se suele presentar, la influencia de la intensidad del fuego con la conductividad eléctrica debida a la producción de cenizas es un fenómeno ya conocido (Mataix-Solera *et al.*, 2007; Bento-Gonçalves *et al.*, 2012).

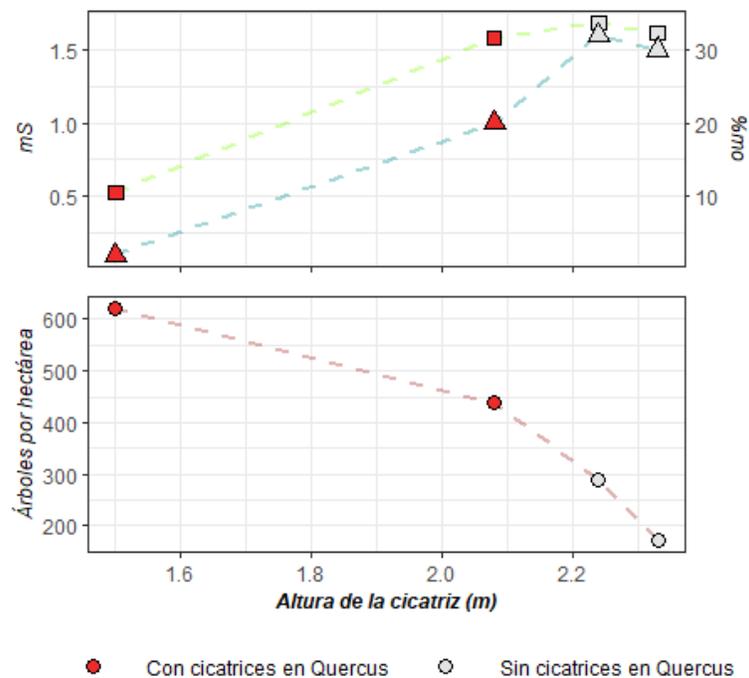


Figura 21. Relación de la altura de cicatrices con la conductividad eléctrica (triángulos), la materia orgánica (cuadros) y la densidad arbórea (círculos)

En sitios con alturas de cicatriz mayores a 2.10m no existieron cicatrices de *Quercus*, así como valores mayores de conductividad eléctrica y materia orgánica. Ello está estrechamente ligado a la discusión previa de si la forma en la que la energía del incendio se libera es preferentemente de forma superficial o subterránea.

Si se asume que las cicatrices son la altura real de la llama y se usan las ecuaciones proporcionadas en Agee (1993) se podría pensar que todos los sitios presentan una intensidad alta a intermedia según sus valores de energía liberada (Tabla 24). Alturas de llama mayores a un metro se consideran ya como de alta intensidad (Agee, 1993; Kennard & Gholz, 2001).

Tabla 25. Energía liberada según tamaño de las cicatrices como altura de la llama

Ecuación	Santa Rita	La Yácata	Pinera Miguel	Crucitas
$I=258FL^{2.17}$	1617.27 kWm ⁻¹ 1390.60 kcalm ⁻¹	1264.20 kWm ⁻¹ 1087.02 kcalm ⁻¹	1484.77 kWm ⁻¹ 1276.67 kcalm ⁻¹	621.92 kWm ⁻¹ 534.75 kcalm ⁻¹
$I=3(10FL)^2$	1628.67 kWm ⁻¹ 1400.40 kcalm ⁻¹	1297.92 kWm ⁻¹ 1116.01 kcalm ⁻¹	1505.28 kWm ⁻¹ 1294.31 kcalm ⁻¹	675.00 kWm ⁻¹ 580.40 kcalm ⁻¹

Ecuaciones de Agee (1993).

Fuegos y erosión

Además de la evidente relación de la conductividad eléctrica con la altura de las cicatrices, resalta la presencia de discontinuidades entre horizontes O y A que sugerían la presencia de procesos de erosión. En pendientes escarpadas estos propician la pérdida por arrastre de nutrientes y partículas finas como las cenizas cargadas de nutrientes. No obstante, el encontrar altas concentraciones de nutrientes aún después de 20 años sugiere una rápida estabilización de los mismos en los agregados de los Andosols.

Crucitas es un sitio que se encuentra en un valle escarpado, tiene una pendiente más pronunciada que el resto de los sitios de estudio. Muestra hidrofobicidad en los primeros centímetros de suelo mineral. Es por lo anterior que resulta lógico el haber encontrado debajo de la capa de mantillo un mayor grado de erosión superficial. Esta erosión explicaría los bajos niveles de conductividad eléctrica y materia orgánica actuales.

Se ha reportado en otras partes que es bastante normal que la conductividad eléctrica se vea incrementada a valores entre 1 y 1.5 mS tras un incendio (Kutiel & Naveh, 1987; Certini, 2005; Yusiharni & Gilkes, 2012). Esto sumado a sus aumentos en la hidrofobicidad y pendientes escarpadas resulta congruente el pensar que el no ver esta característica en el sitio de Crucitas se debe a que los materiales más finos se perdieron por erosión. Por otro lado, los estudios antes

citados mencionan que el incremento de la conductividad eléctrica es un aspecto efímero, que se pierde en meses. Ello es un aspecto contrastante con lo encontrado con los Andosols de este estudio, donde se mantiene hasta por XX años.

La erosión es una respuesta del ecosistema que se ve influenciada tanto por la intensidad como por la severidad en el suelo en cada incendio (Mataix-Solera *et al.*, 2007; Keeley, 2009; Bento-Gonçalves *et al.*, 2012). En otros suelos como *Cambisoles*, *Regosoles*, *Umbrisoles*, *Kastanozems*, *Luvisoles (Andic)* o *Andosoles Vitric* se ha observado una menor resistencia pérdida de los nutrientes adquiridos tras los disturbios por incendios (Neary *et al.*, 1999; González-Pérez *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2017). En pocos meses sus características edáficas parecen volver a las condiciones originales, sin embargo, esto se puede deber más bien a pérdidas por erosión que a la resiliencia del sistema suelo. Esto puede desencadenar efectos en otros aspectos como la composición de comunidades bacterianas y la tasa de los flujos biogeoquímicos (Neary *et al.*, 1999; Fultz *et al.*, 2016; Smith *et al.*, 2017).

Conclusiones

Se caracterizaron los componentes dasométricos y edáficos de cuatro sitios con bosques de *Pinus-Quercus* en el eje neovolcánico. Todos estos sitios presentaron incendios superficiales, sin embargo, dos de ellos presentaron además incendios subterráneos debidos al proceso de combustión latente.

Se constataron asociaciones ecológicas ligadas a variables del régimen de incendios. Se vio la presencia de cicatrices en *Quercus* y la densidad arbórea como indicadores de la duración del fuego. La altura de las llamas se vio relacionada inversamente con la combustión de materia orgánica y positivamente con la conductividad eléctrica como indicador de la producción de cenizas.

La reincidencia de incendios subterráneos tiene efectos directos sobre la memoria edáfica en parámetros como el ángulo de contacto máximo, el ángulo de contacto a 105°C y la humedad con hidrofobicidad mínima. La combustión latente disipa la intensidad de los incendios al distribuir la energía térmica en mayores profundidades de suelo. Ésta también aumenta la profundidad a la que hay efectos de la severidad y puede cambiar la respuesta ecosistémica en aspectos como la cobertura

arbórea. La profundidad media a la que se encuentran los carbones en la matriz del suelo y el tipo de humus forestal son buenos indicadores de la combustión latente.

La presencia de claros aumenta la diversidad de plantas en el sotobosque, sin embargo, la generación de claros parece no ser un efecto inmediato tras la ocurrencia de incendios de baja intensidad. Por su parte, la densidad de plantas del sotobosque mostró una relación directa con la conductividad hidráulica del suelo.

El tiempo tras el último incendio mostró un efecto de disminución de la cobertura forestal y un aumento en la diversidad del sotobosque, consecuencia del aumento de luz disponible.

Los Andosoles presentan una alta resistencia para amortiguar los disturbios por incendios superficiales y subterráneos de áreas e intensidades bajas. En estos mismos términos, en este estudio no se tienen resultados concluyentes respecto a su resiliencia.

Efectos de la reincidencia de incendios en propiedades hidrofísicas de suelos forestales

Aunque se han entendido algunos de los efectos de los efectos de dos tipos de incendios sobre propiedades generales del suelo, se puede ir más allá y hablar de sus implicaciones ecosistémicas mediante el estudio de las propiedades hidrofísicas del suelo. Esta es la razón de un tercer capítulo en el cual hablaremos de ello y de un fenómeno común en la franja aguacatera no abordado en el capítulo anterior, la reincidencia de incendios.

Objetivos

3 Evaluar los efectos de incendios superficiales y subterráneos sobre las propiedades hidrofísicas del suelo

- 3.a Analizar la influencia de incendios superficiales y subterráneos menores a 5 ha y de baja recurrencia a la hidrofobicidad, al espacio poroso y a la conductividad hidráulica vertical del suelo.
- 3.b Analizar la interacción entre variables hidrofísicas de infiltración, porosidad e hidrofobicidad.

Marco conceptual

Ya que los disturbios no sólo son cambios en la estructura de especies y/o comunidades, sino cambios en los flujos de materia y energía, el suelo resulta ser un cuerpo donde también se verán reflejados de forma importante los regímenes de disturbios. Los horizontes superficiales, o epipedones, son especialmente más susceptibles a modificarse por agentes externos (Sojka, 1999; Doerr, Shakesby y Walsh, 2000). Aunque se requiera un tiempo e intensidad mayor para cambiar características en los horizontes más profundos, su registro tendría como consecuencia cambios más duraderos (v.g. los efectos acumulados de la erosión post-incendio).

Según la intensidad, la duración y la severidad del fuego en el suelo se generan una serie de alteraciones, algunas sumándole y otras restándole fertilidad. Incluyen la volatilización y el cambio del balance de nutrientes, modificaciones a la estructura de minerales, incrementos en el pH, formación o destrucción de hidrofobicidad,

depósitos de ceniza, generación de humo (el cual genera, a su vez, depósitos ex situ), estimulación para la germinación o inviabilidad de semillas, aumento en la erodabilidad, en el estrés fisiológico de las plantas y pérdida de individuos de diversas especies de plantas y microorganismos (Neary *et al.*, 1999; Keeley, 2009; Capulín Grande *et al.*, 2010; Bento-Gonçalves *et al.*, 2012). Como se vio en el capítulo anterior, aunque puede tener efectos de disminución en la conductividad hidráulica, éstos pueden ser contrarrestados por el aumento de macroporosidad ligada a la combustión latente de parte de la rizosfera.

Las actividades humanas de manejo también tienen importantes efectos sobre el suelo. Pueden desde detonar degradación e irrecuperable pérdida y hasta propiciar activamente su conservación y restauración (Oldeman, 1988; Van Lyden, 1997; Chazdon, 2003). Así como las pérdidas por degradación pueden ser irrecuperables en tiempos humanos, las estrategias de restauración pueden llegar a promover sinergias e importantes cambios en los ecosistemas en el mediano y largo plazo (Mataix-Solera *et al.*, 2007).

En este sentido resulta importante entender tanto las historias de manejo como las de regímenes de disturbio, como la forma en la que interaccionan, para poder entender las condiciones actuales de un ecosistema. Por poner un ejemplo, la conductividad hidráulica de un suelo puede incrementarse por la cubierta vegetal, pero este efecto pasa a segundo término frente a una historia de uso que pudo haber originado cárcavas en el terreno (Gómez-Tagle, 2009).

Resiliencia, memoria edáfica y funciones del suelo

El enfoque de la resiliencia ha cobrado gran importancia en el estudio de sistemas ecológicos y socio-ecológicos. Existen varios conceptos básicos para poder entenderla en la comunidad vegetal, el suelo o cualquier otra parte de un ecosistema. Se entenderá por resiliencia como la capacidad de un sistema de continuar o recuperar una función frente a un disturbio exógeno (Holling, 1973; Hodgson *et al.*, 2015). A partir de ahí, surgen dos componentes que permiten cuantificar la resiliencia de un sistema: la resistencia y la recuperación (Hodgson *et al.*, 2015).

La resistencia es el efecto inmediato de un disturbio exógeno, es decir, qué tanto se aleja un sistema de su estado original. Básicamente, tras comparar el estado de un parámetro del sistema justo después de un disturbio con su estado previo, entre menor diferencia

haya más resistente será. Por su parte, la recuperación es la consecuencia de los procesos endógenos que llevan nuevamente un sistema perturbado a un equilibrio. La tasa a la que se recupera un sistema se conoce con el nombre de "elasticidad" (Hodgson et al., 2015).

Para poder sacar a un sistema de su estado estable se requiere que los disturbios rebasen umbrales para detonar los cambios. El umbral puede alterarse según la vulnerabilidad del sistema al cambio, lo cual implica que no necesariamente se requiere un disturbio grande para cambiar un sistema profundamente. Los factores que reducen estos umbrales se conocen como estresores (Hodgson et al., 2015; de la Hera-Portillo et al., 2020). Los suelos son en general sistemas que pueden salir fácilmente de su estado estable, pero con capacidad para recuperarse en tanto no rebasen un umbral de degradación irreversible (Lal, 1997; Ayala-Orozco et al., 2018).

La degradación es un estado estable no deseado del suelo no deseado y la resiliencia permite entender la recuperación que puede tener el suelo en su estructura y de sus seis principales funciones en el planeta: producción de biomasa, protección del ambiente y de los humanos, reservorio genético, soporte físico para el desarrollo, fuente de materias primas y preservación de la herencia cultural (Lal, 1997; Blum, 2005). La degradación de alguna de estas funciones provoca una reducción en la productividad general de los ecosistemas (Apfelbaum y Haney, 2010).

Todos los cambios de estado estable dejan un registro en diversos rasgos del suelo y todo el conjunto esas características estables - previas y recién adquiridas- forman parte de lo que se conoce como memoria edáfica (Targulian & Goryachkin, 2004). No todos los cambios de estado estable son negativos, algunos como los ocasionados por la bioturbación o la reducción de pedregosidad implican mejoras a las funciones del suelo que quedan registradas en la memoria edáfica del mismo (Phillips & Marion, 2004).

Existen dos rasgos fundamentales en la resiliencia de los suelos: la estructura y la materia orgánica (Lal, 1997; Griffiths & Philippot, 2013). Gran parte de las características del suelo, como las comunidades microbianas, la erodabilidad o los flujos biogeoquímicos dependen de estas dos características (Griffiths & Philippot, 2013). En menor medida también pueden llegar a ser de relevancia la historia de disturbios previos, el porcentaje de arcillas y el pH (Griffiths & Philippot, 2013). Todas estas variables están generalmente integradas en la clasificación de un suelo (como la *WRB* o la *Soil Taxonomy*).

Desgraciadamente, el fuego tiene el potencial de modificar irreversiblemente la estructura del suelo (de la Hera-Portillo et al., 2020).

Por poner un ejemplo, en un sistema edáfico donde se quiera evaluar la resiliencia ante un disturbio, un incendio superficial, en el contenido de nutrientes –como nitrógeno, fósforo o potasio– se podría observar que, si el disturbio no es lo suficientemente grande y la capacidad amortiguadora del suelo no es lo suficientemente baja existirá un cambio de estado que rápidamente volvería a las condiciones originales. En este sentido, se está entendiendo la vulnerabilidad como una pobre capacidad de amortiguamiento del suelo, dada por su pH, su capacidad de intercambio catiónico, el tipo de complejos organo-minerales en el suelo y su saturación de bases.

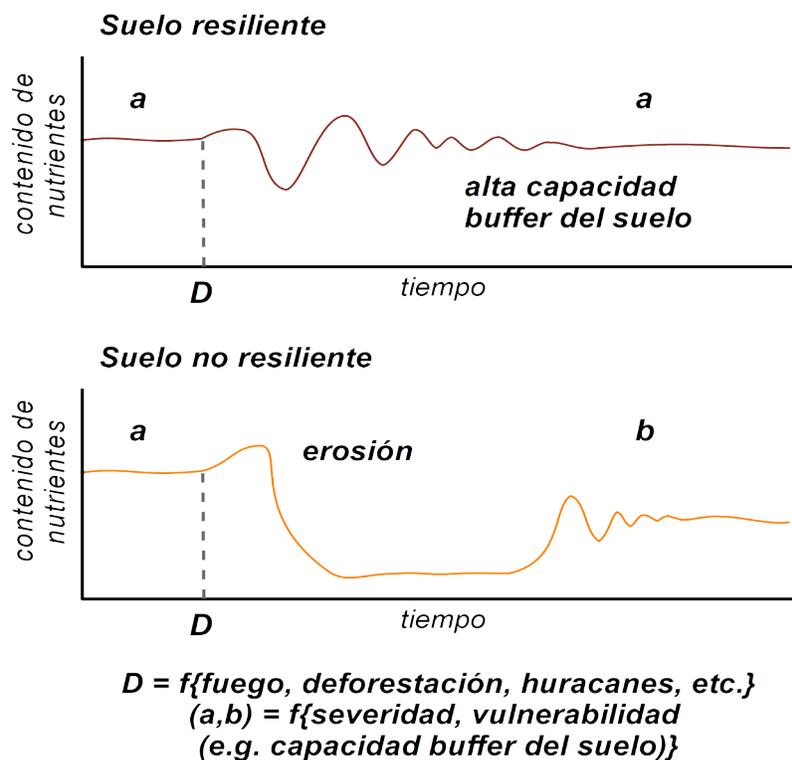


Figura 22. Ejemplo de la aplicación del concepto de resiliencia al suelo.

Por otra parte, siguiendo el mismo ejemplo, si el disturbio rebasa un umbral (ya sea por ser de mayor magnitud o por el suelo ser más vulnerable) se podrían desencadenar procesos de degradación como pérdida de suelo por erosión hídrica. Ello llevaría a un nuevo estado estable, uno degradado. Después de algunos cientos de años, con nuevos aportes de materia mineral y orgánica e intemperismo, se podría tener nuevo suelo de forma tal, que se llegue a un nuevo estado estable sin degradación, sin embargo, distinto del estado original del suelo.

Principios físicos en la infiltración de suelos

Cada que hay un evento de precipitación, o cualquier otro aporte de agua desde la atmósfera, el agua puede recorrer múltiples caminos en el terreno. Puede escurrir en la superficie, ir descendiendo en el suelo hasta quedar almacenada en el pedón o percolarse en la zona de vadosa y almacenarse en la profundidad de algún acuífero. El recorrido que tome el agua quedará determinado por principios físicos que tienen que ver con propiedades como la viscosidad, la tensión superficial, la hidrofobicidad, la conductividad hidráulica, el diámetro de los poros y el flujo preferencial (Gardner, 1958; Lin *et al.*, 1996; Gómez-Tagle, 2009).

La **infiltración** es la acción por la cual el agua fluye a través del suelo (o de cualquier medio poroso). Por su parte, la **permeabilidad** es la velocidad con la que ocurre la infiltración bajo determinadas condiciones. Un caso específico de permeabilidad es la **sortividad** (del inglés **sorptivity**, traducida también como sorbilidad o sorptividad), la cual se refiere a la capacidad que tiene un medio de absorber o de desorción de un líquido por capilaridad (Elrick & Reynolds, 1992; Robichaud, Lewis & Ashmun, 2008; Gliński, Horabi & Lipiec, 2011); esto es particularmente importante para entender cómo se comportaría el agua en el suelo durante los primeros minutos de lluvia (medida en $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1/2}$ ó en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1/2}$). Estos conceptos son clave en el tema de la infiltrometría.

La infiltración se puede ver fuertemente influida por la textura y estructura del suelo, su contenido de humedad, la densidad aparente, el contenido de materia orgánica del suelo, la compactación y la historia de manejo que haya tenido el terreno (Marín-Castro *et al.*, 2016).

Cuando hay un aporte continuo de agua al suelo, el agua primero permea en una fase transitoria que es acelerada y luego presenta una fase donde se estabiliza y fluye con una velocidad constante (Elrick & Reynolds, 1992). Durante la **fase transitoria** se da una acelerada infiltración, debida principalmente a la succión de los poros que están insaturados y, una vez que estos se van llenando de agua, se va disminuyendo permeabilidad hasta llegar a una **fase estable** donde se tiene un flujo que no se acelera más y que fluye a una velocidad constante.

Si se libera de forma espontánea una columna de agua con cierta altura

sobre el suelo se dará la infiltración mediante una **presión** ejercida, la cual fluirá por oquedades y grietas. Es entonces que se habla de **flujo preferencial** en el suelo. Por su parte, si el agua va fluyendo a manera de gotas que van incorporándose paulatinamente sobre el suelo, se dice que esa infiltración estará dominada por la **capilaridad**. El tamaño de poro umbral para tener flujo por capilaridad o un flujo preferencial es de 1 mm de diámetro (Luxmoore, 1981). Incluso se puede pensar en agua que esté en contacto con el suelo y, en lugar de una fuerza positiva como la que podría ejercer la presión, tenga una negativa que ofrezca una resistencia a su incorporación al suelo, es en este sentido cuando hablamos de **tensión** del suelo (Elrick & Reynolds, 1992).

Para que el agua escurra sobre un suelo debe primero saturarlo, es decir, que la velocidad con la que se aporta agua al suelo sea mayor a la que tiene el mismo para poder infiltrarse. Cuando el agua se va absorbiendo en el suelo se puede generar un bulbo de infiltración saturada y alrededor de este un frente de humedad que se va expandiendo por capilaridad conforme van llegando nuevos aportes de agua. Todo el potencial de infiltración que tiene el suelo debido a sus diferentes tamaños de poro, se conoce como **potencial mátrico** o potencial de flujo del suelo (Elrick & Reynolds, 1992; Gliński et al., 2011). Bajo estos principios es que permeámetros de pozo e infiltrómetros buscan medir el flujo del agua, así como sus constantes hidráulicas (Gómez-Tagle et al., 2014).

Si el agua fluye en un suelo con una tensión determinada (la cual se puede regular mediante el uso de infiltrómetros), ésta tendrá su fase transitoria y su fase estable (White et al., 1992; Gómez-Tagle et al., 2014). No obstante en la fase estable sólo se habrán saturado los poros que tengan la capacidad de conducir el agua por tener un potencial de succión mayor o igual a la tensión ejercida, es decir, la infiltración ocurrirá de forma insaturada (Elrick & Reynolds, 1992; Gliński et al., 2011).

Dicho potencial está determinado por la **capilaridad** -propiedad de los fluidos de elevarse o descender en contacto con un sólido-, la cual está regida a su vez por la viscosidad del agua que esté fluyendo y resistencia que oponga el medio mediante la repelencia al agua vista como ángulo de contacto del agua con el suelo.

En caso de que se haga un ensayo de infiltración con una columna de agua que no esté regulada por una tensión entonces el agua será presionada en todos los poros por igual (Gliński, 2011). Instrumentos como los infiltrómetros de anillo sencillo, anillo doble o de pozo

inundado como el permeámetro de Guelph o el Amoozímeter (*Amoozimeter*) funcionan midiendo la permeabilidad con una presión a una determinada altura de la columna de agua impuesta (Elrick & Reynolds, 1992; White et al., 1992; Gómez-Tagle et al., 2014).

Al realizar ensayos de infiltración con al menos tres diferentes tensiones se pueden utilizar ajustes geométricos que permiten conocer, tanto la permeabilidad saturada de campo de ese suelo, como la conductividad hidráulica del mismo (Wooding, 1968; Logsdon & Jaynes, 1993). En este sentido, la conductividad hidráulica no es más que un coeficiente que nos permite entender los cambios en la permeabilidad basándose en los principios establecidos por la ecuación de Darcy.

Ecuación 5. Ecuación de Darcy

$$Q = \frac{-k \cdot A \cdot \Delta P}{\mu \cdot L}$$

Donde **Q** es la descarga total, **k** es el coeficiente de permeabilidad, **A** es el área de la sección cruzada del medio poroso, **L** la longitud del medio, **ΔP** la caída de presión ($P_f - P_i$), **μ** la viscosidad del fluido.

Así como es importante tener un ajuste geométrico que permita conocer la permeabilidad saturada de campo también es importante realizar una corrección geométrica para no sobreestimar la conductividad hidráulica. La lámina de agua no desciende de forma vertical en el suelo, sino a manera de una esfera de agua que va incrementando su radio conforme se va infiltrando (Wooding, 1968).

Materiales y métodos

Comparaciones hidrofísicas en la superficie del suelo entre regímenes

Se utilizaron tres de los cuatro sitios descritos en el capítulo pasado: Santa Rita, La Yácata y Pinera Miguel. Asimismo se incorporó información de un bosque de referencia (Rodríguez Rodríguez, 2014) y de registros de infiltración tras unos meses de un incendio en un predio denominado Yeto ubicado justo entre los sitios de Santa Rita y La Yácata (Cruz Cruz, en proceso)². Las características ecológicas de todos estos sitios son similares: Bosques de *Pinus-Quercus* en suelos volcánicos recientes con propiedades ándicas dentro de la misma subprovincia fisiográfica: Neovolcánica tarasca (INEGI, 1985a).

Los muestreos trabajados en Rodríguez Rodríguez (2014) como bosque

²Tesis de licenciatura de biología de Edgar Cruz Cruz - UMSNH

natural sirvieron como valores de referencia. Se encuentran entre los 1900 y 2650 msnm sobre una superficie cumbral con pendiente menor a 10°, con edades del rodal entre 50 y 80 años. La altura máxima de los árboles es de 28.0 m y su densidad es de 663 árboles/ha (similares a las de los sitios de incendios trabajados). Se encuentran en el área denominada Alto Fresno, centro particular de investigación forestal el cual tuvo actividades de resinación hasta el año 2013. Presenta *Andic Alisols* asociados con *Silandic Andosols*. En ambos casos el epipedón tiene gran porosidad y presencia de alofanos, aspecto en común con los otros sitios.

Los regímenes de incendios trabajados tuvieron tamaños menores a 5 ha, fueron de alta intensidad, de baja reincidencia y ocurrieron en zonas moderadamente escarpadas. Se trabajó con incendios superficiales, representados por los sitios de Santa Rita y el incendio reciente y con evidencias de haber tenido varios incendios en el mismo lugar de Cruz Cruz (*en proceso*). Los incendios subterráneos están representados por los sitios de la Yácata (con una historia de dos incendios) y Pinera Miguel (con un incendio en las últimas dos décadas). Dichos incendios subterráneos se derivaron de incendios superficiales, pero con una posterior combustión latente (Tabla 25).

Tabla 26. Resumen de las características de los sitios comparados

Sitio	Clave	n	Tipo de incendio	Vegetación	Suelo	Posición fisiográfica
<i>Bosque natural (Rodríguez Rodríguez, 2014)</i>	BN(0)	30	—	Bosque <i>Pinus-Quercus</i>	<i>Andic Alisol, Silandic Andosol</i>	Cumbre
<i>Santa Rita (1 incendio)</i>	Sup(1)	5	Superficial	Bosque <i>Pinus-Quercus</i>	<i>Silandic Andosol</i>	Ladera media
<i>Yeto (2 incendios) (Cruz Cruz, en proceso)</i>	Sup(2)	20	Superficial	Bosque <i>Pinus-Quercus</i>	<i>Silandic Andosol</i>	Ladera media
<i>Pinera Miguel (1 incendio)</i>	Sub(1)	4	Superficial y subterráneo	Bosque <i>Pinus-Quercus</i>	<i>Folic Silandic Andosol</i>	Ladera media
<i>La Yácata (2 incendios)</i>	Sub(2)	5	Superficial y subterráneo	Bosque <i>Pinus-Quercus</i>	<i>Silandic Andosol</i>	Hombro de ladera

Debido a discrepancias en la metodología de cálculo de la conductividad hidráulica se hizo un reprocesamiento de las conductividades hidráulicas de Rodríguez Rodríguez (2014). A partir de la ecuación que dicho autor usó se volvieron a calcular sus flujos de infiltración en fase estacionaria para sus tres tensiones a partir de sus valores de K_s y α de Gardner (α de Gardner) reportados. Con

ello se hizo el ajuste no lineal de Logsdon y Jaynes (1993) descrito en el capítulo anterior en la sección de ensayos de infiltración.

Se hicieron regresiones lineales múltiples tanto de las conductividades hidráulicas como del parámetro α de Gardner de los sitios contrastando con el efecto del tipo y la reincidencia de los incendios.

Análisis de propiedades hidrofísicas en pisos verticales

Para poder revisar el efectos de los regímenes a la infiltración, porosidad e hidrofobicidad de forma vertical en el suelo se seleccionaron nuevamente los tres sitios con características ecológicas similares y con muestreos en diferentes pisos de infiltración: Santa Rita - Sup(1), La Yácata - Sub(2) y Pinera Miguel - Sub(1).

Al tener una distribución log-normal, las variables de infiltración y porosidad se trabajaron con los respectivos ajustes.

Se hicieron regresiones lineales múltiples para ver el efecto individual y conjunto del tipo y reincidencia de los incendios, así como del piso vertical sobre los siguientes parámetros: conductividad hidráulica saturada de campo (K_s), parámetro α de Gardner (α), Número de macroporos por metro cuadrado (N_M), porcentaje de flujo preferencial por macroporos (PF_M), humedad en la mínima hidrofobicidad (w_{min}), Área de la curva de hidrofobicidad (S) y el índice dinámico integrativo de repelencia (IRDI).

Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el software estadístico R v4.0.2 (*R Core Team*, 2020).

Correcciones al ángulo de contacto

El método MED de evaluación de hidrofobicidad considera una tensión superficial crítica que se debe rebasar para que el agua pueda infiltrarse dentro del periodo arbitrario de cinco segundos (Van't Woudt, 1959; Letey et al., 2000). No obstante, la relación molaridad del etanol a ángulo de contacto tiene la peculiaridad de que su valor mínimo posible es 90° (Regalado y Ritter, 2005). No obstante, los ángulos de contacto del agua comienzan desde 0 en suelos hidrofílicos y llegan a más de 100° en suelos hidrofóbicos. Como el ángulo mínimo posible según el método del MED es 90 y no 0 es que se hizo una calibración comparando la metodología de ángulos de contacto, según

porcentajes de etanol de Regalado y Ritter (2005) con mediciones directas del ángulo de contacto.

Se utilizó un Goniómetro de bolsillo Modelo PG-1 de la marca Gardco (Gardco The Pocket-Goniometer) para medir los ángulos de contacto directamente. Se tuvo un un criterio de lectura estática de 5 segundos, dado que algunas gotas de agua iban cambiando su ángulo de contacto lentamente conforme se infiltraban. Se tomaron y promediaron 5 lecturas de goniómetro por muestra.

Las mediciones se realizaron en la Universidad Miguel Hernández de Elche, España, con muestras tamizadas con malla de 2 mm de suelo superficial provenientes de laderas medias a altas entre el Lago Grey, Lago del Pato y el Lago del Toro del Parque Nacional Torres del Paine, Chile. Los transectos se realizaron en un área con Andosols, Cambisols y Podzols (ISRIC, 2020). Aunque las muestras procesadas para las correlaciones son de un lugar distinto a los del estudio, todas son del mismo tipo de suelo y, por tanto, con propiedades físicas y mineralógicas bastante similares.

Se utilizaron los valores de muestras hidrofóbicas para generar una correlación ajustada a 90 como 0. Dado que los datos no presentaron una distribución normal se utilizó un modelo lineal generalizado de familia *quasipoisson* (Figura 23). Sus valores fueron significativos ($p < 0.001$) con una devianza nula de 1417.26 y una devianza residual de 76.23, es decir, una *pseudo r²* de 0.946.

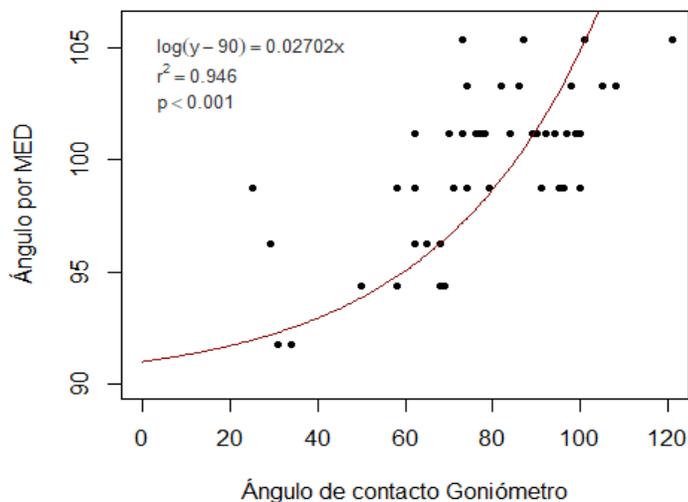


Figura 23. Modelo modelo *quasipoisson* (línea roja) para la calibración de los ángulos de contacto.

La ecuación de calibración utilizada fue:

Ecuación 6.

$$\theta = \frac{\log(\alpha_{MED} - 90)}{0.02702}$$

Donde θ es el ángulo de contacto calibrado ($^{\circ}$) y α_{MED} el ángulo de contacto obtenido por el método de molaridad del etanol ($^{\circ}$).

Análisis del espacio poroso

Para el análisis del espacio poroso se trabajó con los principios de la metodología de Watson y Luxmoore (1986) con algunas adecuaciones y precisiones propuestas. Esta metodología permite el cálculo del espacio poroso que está actuando de forma efectiva en la infiltración de un suelo mediante los principios físicos de tensión superficial y viscosidad planteados en la ecuación de capilaridad del agua de la **Ley de Jurin** (Jurin, 1719), la cual es una particularidad que se puede derivar de la **ecuación de Young-Laplace**.

Ecuación 7. Ecuación de Jurin (1718)

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r_o}$$

Donde **h** es la altura del líquido (m), **γ** es la tensión superficial ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$), **ρ** es su densidad aparente ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), **θ** es el ángulo de contacto del líquido sobre el sólido ($^{\circ}$), **g** es la aceleración gravitacional ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$) y **r_o** es el radio del conducto sólido (m).

Se consideró la aceleración de gravedad de $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, la tensión superficial de $0.0728 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$ (estándar a 20°C) y la densidad del agua de $998.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (estándar a 20°C). Sustituyendo los valores de la ecuación de Jurin y resolviendo se obtiene una relación de:

Ecuación 8.

$$h_{[m]} \approx \frac{-1.4869 \times 10^{-5} (\text{m}^2) \cdot \cos \theta}{r_{o[m]}}$$

Las tensiones de la ecuación de Gardner se pueden sustituir como alturas de columna $\text{cm}\cdot\text{H}_2\text{O}$ que se pueden expresar como $\text{m}\cdot\text{H}_2\text{O}$ en la ecuación de Jurin y así poder calcular el flujo de infiltración para diferentes tamaños de poro. Normalmente se utiliza la relación aproximada a -1.5 para la ecuación de Jurin, asumiendo un ángulo de contacto de 0 (Watson & Luxmoore, 1986; Gómez-Tagle et al., 2014). No obstante, por los órdenes de magnitud manejados entre las tensiones, el no considerar más decimales conlleva a errores importantes nada despreciables en la estimación del número total de poros activos. Asimismo, considerar θ como cero puede ser cierto para ensayos hechos

con etanol, pero no lo es para ensayos con agua donde el suelo puede tener algún grado de repelencia y, por ende, un ángulo de contacto mayor que cero (Letey et al., 1962).

Los diámetros de poro utilizados fueron los propuestos por Luxmoore (1981). Aunque existen otras propuestas referentes a clases diamétricas de poros (Watson & Luxmoore, 1986; Lin et al., 1996; Alaoui et al., 2011; Gómez-Tagle et al., 2011; Maranhão de Melo, 2016; Soltani et al., 2019), es el único que claramente estipula su utilidad para conocer los poros participantes en el flujo preferencial, en drenaje gravitacional y en presiones mátricas residuales (Luxmoore, 1981).

Tabla 27. Rangos de tamaños de poros sugeridos por Luxmoore (1981)

Nombre	<i>Macroporos</i>	<i>Mesoporos</i>	<i>Microporos</i>
Asociación	<i>Inundación</i>	<i>Gravitacional</i>	<i>Et. pot mátrico</i>
Radio	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
Límite superior	—	0.5	0.005
Límite inferior	0.5	0.005	—

Adicionalmente, se calcularon otras métricas de porosidad de Watson & Luxmoore (1986): el número de macroporos efectivos por unidad de área (**N**), el porcentaje de espacio poroso efectivo (**Θ** V/V) y el porcentaje de flujo de infiltración por rango de poros activos (**PF**).

Ecuación 9. Ecuaciones de métricas de porosidad

$$N = \frac{8 K_{(h)}}{\pi \rho g r_{(h)}^4} = N \pi r_{(h)}^2 \quad PF = \frac{K_s e^{\alpha h_a} - K_s e^{\alpha h_b}}{K_s} \cdot 100$$

Donde **N** número máximo de poros efectivos, **μ** es la viscosidad dinámica del agua ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$), **ρ** es la densidad aparente del agua ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$), **Θ** es el espacio poroso efectivo total ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$), **g** es la aceleración gravitacional ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$), **K_s** es la conductividad hidráulica saturada del suelo ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), **K_(h)** es la conductividad hidráulica ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) del suelo para la tensión **h** (m), **r** es el radio mínimo del poro, **PF** es el porcentaje de flujo entre un rango máximo (**a**) y mínimo (**b**) de tensión en función de sus respectivos radios de poro.

Se consideró la aceleración de gravedad de $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$, la viscosidad dinámica del agua de $1.002\text{E}-03 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ (estándar a 20°C) y la densidad del agua de $998.2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (estándar a 20°C).

Resultados

Los cinco sitios comparados presentaron en promedio conductividades hidráulicas saturadas de campo menores a 25 mm/hr. Los sitios que experimentaron incendios superficiales mostraron conductividades hidráulicas menores al bosque de referencia. El sitio con dos incendios superficiales mostró una conductividad hidráulica ligeramente superior (13.7 ± 8.0 mm/hr) al sitio con sólo un incendio superficial (10.6 ± 8.9 mm/hr).

Por su parte, los incendios subterráneos mostraron resultados contrastantes (Figura 24). El incendio subterráneo con un incendio mostró una conductividad hidráulica mucho menor a los demás sitios (6.3 ± 6.0 mm/hr), el sitio con dos incendios subterráneos presentó tanto el mayor promedio como la mayor desviación estándar en su conductividad hidráulica (22.5 ± 23.1 mm/hr).

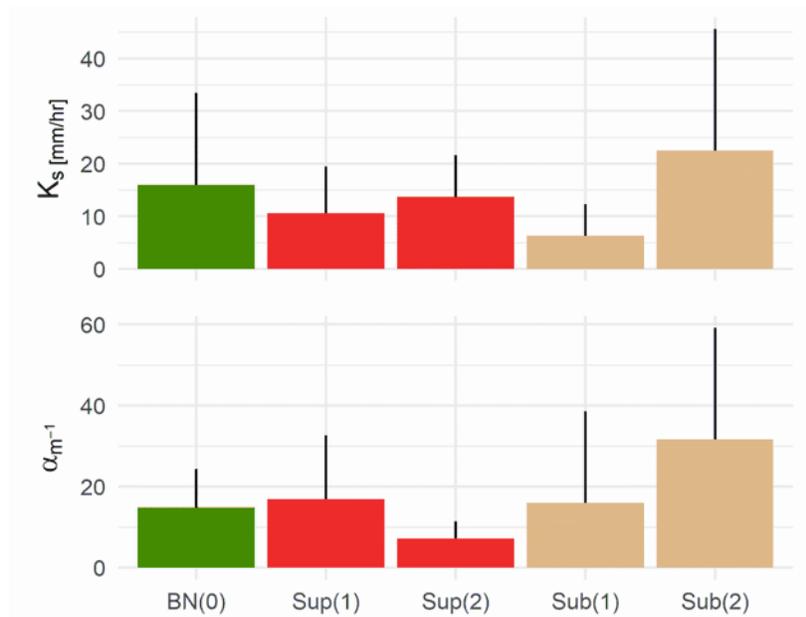


Figura 24. Parámetros de infiltración entre tipo y reincidencia de incendios. Entre paréntesis se indica la cantidad de incendios en los últimos 20 años.

A pesar de las tendencias encontradas, al comparar todos los sitios la conductividad hidráulica no mostró diferencias significativas por el tipo o reincidencia de los incendios. Posiblemente por la gran desviación estándar que mostró la conductividad hidráulica del bosque de referencia (15.9 ± 17.5 mm/hr). Aunque ello podría dar cuenta de una baja auto-correlación espacial, en este sitio es importante recordar que en dicha área se practicaba resinación de pinos, lo cual ha contribuido a un aumento de la hidrofobicidad cerca de los troncos lo

cual explicaría la alta desviación estándar del sitio con una distribución espacializable (Rodríguez Rodríguez, 2014).

El parámetro α de Gardner muestra un patrón distinto al de la conductividad hidráulica; con diferencias significativas, aunque poco explicativas entre los regímenes de incendios. El bosque de referencia tiene un α de Gardner de $14.8 \pm 9.5 \text{ m}^{-1}$. Un valor similar al de los sitios con solo un incendio, tanto superficial ($16.8 \pm 15.8 \text{ m}^{-1}$) como subterráneo ($16.0 \pm 22.6 \text{ m}^{-1}$).

Los sitios reincendiados muestran efectos diferenciados según el tipo de incendio. Tras un segundo incendio superficial se obtiene una reducción en el parámetro α ($7.2 \pm 4.2 \text{ m}^{-1}$), en tanto que un segundo incendio subterráneo muestra un considerable aumento del mismo ($31.6 \pm 27.5 \text{ m}^{-1}$). Destaca aquí nuevamente la gran desviación estándar del sitio con dos incendios subterráneos.

Tabla 28. Modelos de regresión lineal múltiple entre regímenes de incendios

	Modelo	gl	F	R^2	p
log(Ks)	<i>tipo</i>	2	0.2607	0.01	0.77
	<i>reincidencia</i>	2	1.624	0.05	0.20
	<i>tipo + reincidencia</i>	4	1.028	0.07	0.40
log(α)	<i>tipo</i>	2	3.388	0.10	0.04
	<i>reincidencia</i>	2	1.656	0.05	0.20
	<i>tipo + reincidencia</i>	4	3.7	0.10	0.01

Al contrastar la influencia del tipo de incendio y de la cantidad de incendios sobre los dos parámetros de infiltración trabajados se obtuvo que no existen diferencias significativas en la conductividad hidráulica explicadas por el tipo o cantidad de incendios (Tabla 28). Dadas las grandes desviaciones estándar, ésta no se ve alterada por el tipo o por una primer reincidencia de incendios. En cuanto al α de Gardner, sí se encontraron diferencias significativas, las cuales están dadas por el efecto del tipo de incendio, así como por el tipo y reincidencia de los mismos.

Tras realizar la estimación y comparación de poros activos a través de las constantes de infiltración de conductividad hidráulica y α de Gardner se encontró que existe una alta correlación de Pearson, tanto del porcentaje de flujo (0.98) como del número de macroporos activos (0.92) con el α de Gardner.

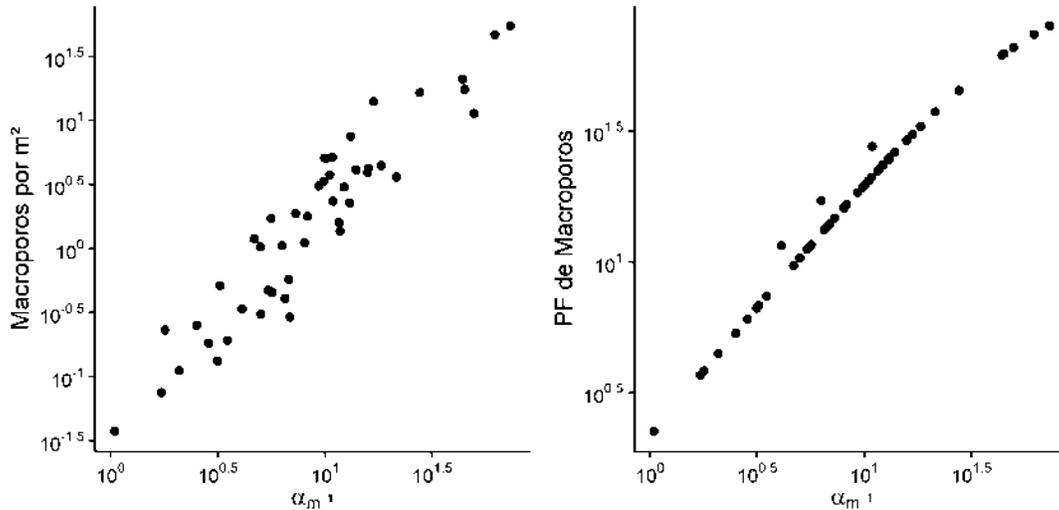


Figura 25. Influencia del α de Gardner en la macroporosidad.

Tanto la relación log-log del α con el número por metro cuadrado y el porcentaje de flujo de macroporos mostraron relaciones significativas ($p < 0.001$, $R^2 = 0.88$, pendiente = 0.5 y $p < 0.001$, $R^2 = 0.98$, pendiente = 1.2, respectivamente; Figura 25).

Tabla 29. Parámetros hidro-físicos entre los tres pisos de profundidad.

Piso	n	Infiltración		Porosidad		Hidrofobicidad			
		Ks	α	PF _M	N _M	n	w.min	S	IRDI
<i>Sup(1) - Santa Rita</i>									
1	5	10.5±8.8	16.8±15.8	27.8±28.2	4.8±7.2	5	0.70±0.57	48.1±0	59.8±14.3
2	5	5.9±5.4	5.6±2.7	17.2±23.3	1.6±1.2	2	0.10	4.5	45.0
3	5	14.8±8.8	11.8±9.9	21.3±2.6	6.1±6.5	5	0.10±0.00	4.5±0.0	45.0±0.0
<i>Sub(1) - Pinera Miguel</i>									
1	3	7.3±2	20.2±25.6	23.7±28.6	3.2±5.5	5	0.96±0.15	75.6±22.5	69.4±4.3
2	1	1.4	1.0	2.3	0.0	4	1.06±0.29	48.1±18.5	77.6±9.3
3	3	6.5±2	5.7±1.1	11.7±2.1	1.1±0.7	6	0.36±0.17	39.6±18.4	70.2±14.8
<i>Sub(2) - La Yácata</i>									
1	5	22.3±23.2	31.6±27.5	43.1±28.2	16.8±22.8	5	1.24±0.30	66.5±10.6	60.8±9.2
2	5	17.8±20.9	22.8±22.3	34.3±23.3	11.7±19.9	5	0.83±0.31	82.6±24.1	58.2±2.1
3	3	13.2±7.6	8.6±1.4	17.0±2.6	2.9±1.9	5	0.65±0.28	26.9±14.0	59.9±17.1

Celdas con promedio ±desviación estándar. PF_M=profundidad de flujo de macroporos, N_M=número de macroporos por m², n=número de ensayos.

En la comparación de todas las variables hidrofísicas en los tres sitios con información en diferentes pisos de infiltración se tuvieron

números de muestra de 5 en casi todos los casos (Tabla 29). Sin embargo, por las condiciones de hidrofobicidad de los sitios o de condiciones externas durante las jornadas de campo, en algunos casos sólo se pudieron tener números de muestra de 2 o, incluso, de 1 en un caso.

Tabla 30. Modelos de regresión lineal múltiple significativos

		Modelo	gl	F	R²	p
Ks	~	<i>tipo + reincidencia</i>	2	3.492	0.17	0.042
a.m	~	<i>reincidencia</i>	1	5.481	0.14	0.025
a.m	~	<i>tipo + reincidencia</i>	2	3.753	0.19	0.034
PF _M	~	<i>reincidencia</i>	1	4.833	0.12	0.035
PF _M	~	<i>tipo + reincidencia</i>	2	4.124	0.20	0.025
N.m ⁻² _M	~	<i>reincidencia</i>	1	4.454	0.12	0.042
N.m ⁻² _M	~	<i>tipo + reincidencia</i>	2	4.324	0.21	0.022
w.min	~	<i>piso</i>	1	17.879	0.31	<0.001
w.min	~	<i>piso + tipo</i>	5	10.743	0.60	<0.001
w.min	~	<i>piso + reincidencia</i>	5	4.745	0.40	0.002
w.min	~	<i>piso + tipo + reincidencia</i>	8	8.132	0.66	<0.001
w.min	~	<i>tipo</i>	1	25.403	0.39	<0.001
w.min	~	<i>tipo + reincidencia</i>	2	12.572	0.39	<0.001
S	~	<i>piso</i>	1	15.123	0.27	<0.001
S	~	<i>piso + tipo</i>	5	9.243	0.56	<0.001
S	~	<i>piso + reincidencia</i>	5	6.060	0.46	<0.001
S	~	<i>piso + tipo + reincidencia</i>	8	7.307	0.64	<0.001
S	~	<i>tipo</i>	1	26.889	0.40	<0.001
S	~	<i>reincidencia</i>	1	4.438	0.10	0.042
S	~	<i>tipo + reincidencia</i>	2	13.129	0.40	<0.001
IRDI	~	<i>piso + tipo</i>	5	3.661	0.34	0.009
IRDI	~	<i>piso + reincidencia</i>	5	4.718	0.40	0.002
IRDI	~	<i>piso + tipo + reincidencia</i>	8	4.173	0.50	0.002
IRDI	~	<i>tipo</i>	1	15.080	0.27	<0.001
IRDI	~	<i>reincidencia</i>	1	19.660	0.33	<0.001
IRDI	~	<i>tipo + reincidencia</i>	2	13.640	0.41	<0.001

Al comparar los modelos con los valores según pisos verticales se encontró que la profundidad tiene un alto poder explicativo sobre la hidrofobicidad, pero no sobre la infiltración ni la porosidad (Tabla

30). El mejor modelo explicativo estuvo en la relación de la profundidad, tipo y reincidencia de incendios sobre la humedad con hidrofobicidad mínima ($R^2=0.66$ y $p<0.001$). Una relación casi igual se encontró con el área de la curva de hidrofobicidad y la profundidad, tipo y reincidencia de los incendios ($R^2=0.64$ y $p<0.001$).

Al excluir el bosque natural el modelo de diferencias en la conductividad hidráulica según tipo y reincidencias de incendios se volvió significativo, no obstante, con una muy bajo poder explicativo. En este modelo la disminución en el primer incendio subterráneo y el aumento en el segundo se vuelven significativas. En este modelo se consideran juntan los valores entre pisos, teniendo tamaños muestrales de entre 8 y 15. El incendio superficial con un incendio siguió sin mostrar una diferenciación significativa, a pesar de considerar ahora su tamaño muestral de 15.

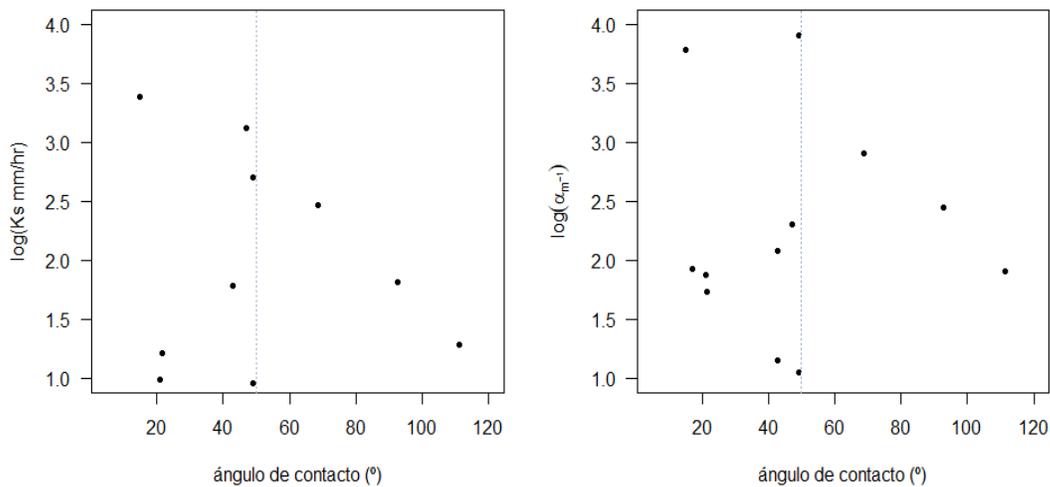


Figura 26. Influencia del ángulo de contacto a la infiltración.

Por otra parte, la conductividad hidráulica y el α de Gardner no mostraron relaciones significativas con la humedad de mínima hidrofobicidad (w_{min}), el área de la curva de hidrofobicidad (S), ángulo de contacto máximo, ángulo de contacto a 105°C o el IRDI ($p>0.05$ en todos los casos). Respecto al ángulo de contacto asociado a la humedad de campo, aunque mostró una correlación de Pearson baja, de -0.17 , existe un patrón que sugiere la existencia de una relación no lineal con ambos parámetros de infiltración (Figura 26).

Discusión

De todos los componentes de un régimen de incendios, la duración es la que más efectos puede tener sobre el suelo (Keeley, 2009). Es en este sentido que resulta lógico y esperado el que los dos sitios con incendios subterráneos, por la combustión latente, hayan presentado mayor hidrofobicidad y a mayor profundidad respecto de los demás sitios. Dichos cambios parecen no ser homogéneos en el espacio dadas las mayores desviaciones estándar que también presentaron estos sitios. Esto puede ser producto de infiltración por flujo preferencial como la del "flujo en dedos" (DeBano, 2000; Doerr, Shakesby & Walsh, 2000), contrarrestando así los detrimentos puntuales la conductividad hidráulica.

Hay aspectos como la humedad del suelo, concentración de arenas, el contenido y tipo de materia orgánica que afectan tanto a la infiltración como a la hidrofobicidad (Jordán *et al.*, 2013; Marín-Castro *et al.*, 2016), por lo que se esperó algún tipo de correlación entre ambos. No obstante, sólo el ángulo de contacto mostró una cierta correlación con los parámetros de infiltración, la cual fue no lineal. Esto ha sido documentado antes e incluso ha mostrado tener utilidad para el cálculo de un parámetro a partir del otro (Carrillo, Letey & Yates, 1999; Doerr *et al.*, 2000).

La relación no lineal del ángulo de contacto con la conductividad hidráulica y el ángulo de contacto (véase Figura 26) parece estar relacionada con los dominios de humectabilidad, donde se ha descrito que el ángulo de contacto crítico para la humectabilidad del suelo está entre 50 y 60° (Bán *et al.*, 1987; Shirtcliffe *et al.*, 2006). Asimismo, existe un segundo umbral a 90° donde ángulos más grandes requieren de una presión para poder infiltrarse (Jimenez Pinilla *et al.*, 2016;). Entonces es que se pueden entender tres dominios de hidrofobicidad para las muestras trabajadas de Andosols: 1) Entre 0-50° con humectabilidad espontánea, 2) entre 50-90° con humectabilidad por fuerzas capilares y 3) Mayores a 90° con humectabilidad sólo por fuerzas de presión y suelos completamente repelentes al agua.

En términos generales se podría decir que las conductividades hidráulicas de los remanentes forestales incendiados y del bosque de referencia son moderadamente altas (*Soil Science Division Staff*, 2018). No obstante, excepto por el sitio con dos incendios subterráneos que fue superior, todos los sitios estuvieron por debajo del promedio mundial que existe para suelos son su misma clase textural (Gupta *et al.*, 2020). Ello podría estar ligado a las propias condiciones de hidrofobicidad que todos los sitios presentaron.

El que no cambie de forma significativa la conductividad hidráulica ni el α de Gardner entre el bosque de referencia y los sitios con un primer incendio refleja la resiliencia que tienen los Andosols ante el fuego ya que sus promedios no cambian de forma significativa (Hodgson *et al.*, 2015). Esto aplica tanto para la infiltración como para la porosidad del suelo, ya que se puede asociar la porosidad efectiva - que es la que participa activamente en el proceso de infiltración, distinta a la total, donde pueden haber poros no interconectados- con el α de Gardner. El α de Gardner también se ha visto asociada a la agregación y compactación de un suelo, entre más altos los valores, más arenoso o con mejor estructura de aireación, en tanto que valores menores hacen referencia a un suelo más desagregado, compacto o sin estructura (Elrick & Reynolds, 1992).

El que la conductividad hidráulica vertical no mostrase diferencias significativas entre las variables puede deberse, más bien, a un limitado tamaño de muestra. Se ha visto que se requieren tamaños de muestra mínimos de entre 11 y 13 para poder realizar análisis estadísticos robustos dada la distribución log-normal de la conductividad hidráulica (Gómez-Tagle *et al.*, 2011). Parece ser que otros parámetros hidrofísicos no requieren tamaños de muestra tan grandes, ya que fueron suficientes en este estudio para ver tendencias claras aún entre pisos de profundidad. Es por ello que no podría ser concluyente si los incendios generan efectos en la conductividad hidráulica vertical y, por tanto, generen un medio heterogéneo isotrópico en el epipedón.

La gran desviación estándar que presentó el sitio de referencia está vinculada a la hidrofobicidad que presentó el sitio, aún en tiempo de lluvias (Rodríguez Rodríguez, 2014). Esto podría deberse a compuestos exudados por los pinos ya sea en sus raíces o desde su tallo, es importante tener presente que muchos años dicho rodal tuvo actividades de resinación. Este tipo de aprovechamiento ha llegado a ser bastante habitual sobre los bosques de la región, incluido el rodal de este estudio con un incendio subterráneo. No es raro que los sitios de referencia en bosques susceptibles de incendios sean hidrofóbicos, tal como han visto también Filipović *et al.* (2019).

No obstante la resiliencia de los Andosols ante un primer incendio, algunos rasgos quedan impresos en la memoria del suelo, como el porcentaje de carbones o la conductividad eléctrica en la superficie orgánica. A pesar de que no se pueda evaluar la resistencia o recuperación en este estudio, es claro que pasando el valor umbral de un incendio se ven alteraciones claras a la porosidad e infiltración,

las cuales siguen distintas trayectorias según el tipo de incendio.

Aunque se desconoce si estas características finales son un nuevo estado estable o están en proceso de recuperación, se observa que dos incendios superficiales tienden a la degradación en tanto que dos subterráneos mejoran la calidad del suelo. Dos incendios superficiales consecutivos conllevan a disminuciones en la porosidad, aunque la conductividad hidráulica no se vea afectada, posiblemente porque aún hay suficientes mesoporos activos que contrarrestan estos efectos. Por su parte, con dos incendios subterráneos, aunque el disturbio es más directo sobre el suelo, el suelo muestra una mayor resiliencia y sólo aumenta su porosidad.

El aumento en el promedio y la variabilidad espacial de la hidrofobicidad, porosidad e infiltración producto de dos incendios subterráneos acumulados tiene consecuencias dobles. Aunque por un lado se mejore su función edáfica de infiltración y recarga de acuíferos, aumenta su riesgo de contaminación por disminuir la función de amortiguación y filtro natural producto de la infiltración acelerada del flujo preferencial (DeBano, 2000; Doerr et al., 2000). Asimismo, no se evaluó el efecto de la combustión latente sobre la germinación, lo cual tiene implicaciones directas sobre la resiliencia del sistema forestal en general (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003; Keeley, 2009).

Parámetros como la humedad en la hidrofobicidad mínima y el área bajo la curva de hidrofobicidad parecen ser indicadores útiles para entender la historia de los fuegos en los Andosols. Esto dado que sus modelos mostraron diferencias claras entre profundidad, tipo de y reincidencia de incendios. Ya que no se vio alterada con estos cambios alguna de las funciones ambientales del suelo como la infiltración y recarga de acuíferos o la estructura del mismo se habla sólo de un cambio en la memoria edáfica, pero no de uno en el estado estable del suelo.

Efectos hidrológicos de los regímenes de incendios

En las primeras lluvias de cada año el suelo se encuentra en una condición de baja humedad que podría aumentar la cantidad de puntos con grandes ángulos de contacto agua-suelo que limiten la infiltración y aumenten la erodabilidad, especialmente en los sitios incendiados. En sitios recién quemados, además, se tiene el suelo expuesto o con una importante reducción de su mantillo (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003). Aunque la hidrofobicidad puede no tener un efecto a grandes escalas sobre la infiltración por la presencia del flujo preferencial

(Doerr et al., 2000), es factible pensar que esta también se verá reducida si la temporada de secas es lo bastante severa como se ha visto que ocurre en inviernos *no niña* o *no niño* (primer capítulo de este trabajo).

La humedad en la mínima hidrofobicidad es un parámetro que sirve para identificar los umbrales de humedad donde un suelo verá alterado su ángulo de contacto (Regalado & Ritter, 2005). Es por ello que con este parámetro podemos visualizar donde podrían existir los mayores riesgos de erosión, en incendios superficiales esto ocurre en la superficie del suelo, en el primer centímetro rápidamente desaparece la hidrofobicidad. Por su parte, en los incendios subterráneos esta perdura con valores altos hasta en cinco centímetros de profundidad, con mayores valores en si se experimenta, además, un segundo incendio subterráneo. Los efectos de la hidrofobicidad sobre la erosión y el flujo preferencial también han sido discutidos en otros suelos de la misma región llegando a conclusiones similares (Jordán et al., 2013).

Un evento de precipitación normal en la estación meteorológica 16146 Zirahuen -la cual está geográficamente en medio de todos los sitios de este estudio- es de 3.1 ± 7.4 mm durante la última década (CONAGUA, 2020). Sin embargo, los datos climáticos presentan una distribución exponencial de escala libre; existen valores máximos de hasta 140 mm.

Si la intensidad de un evento de precipitación es mayor que la conductividad hidráulica está escurrirá hasta encontrar una grieta o una zona de flujo preferencial, en caso contrario tendrá un flujo hortoniano que puede erosionar el suelo (Doerr et al., 2000). Este riesgo parece ser mayor para sitios con incendios superficiales y menor para sitios con incendios subterráneos, especialmente si hay más de un incendio presente. Actividades como la resinación parecen aumentar la erodabilidad al disminuir la conductividad hidráulica por la presencia de resinas en el suelo. Desafortunadamente, tanto la presencia de incendios superficiales como de actividades de resinación son dos aspectos comunes en los bosques de la franja aguacatera, lo que aumenta los riesgos de erosión en la región.

Conclusiones

Se evaluaron los efectos de incendios superficiales y subterráneos sobre las propiedades hidrofísicas del suelo. Tras un incendio los Andosols mostraron resiliencia en sus parámetros de infiltración y porosidad. Un segundo incendio genera un nuevo estado estable, con incendios superficiales de forma degradativa y con incendios subterráneos aumentando su infiltración por flujo preferencial.

Se encontraron relaciones entre la porosidad, la hidrofobicidad y la infiltración. La porosidad mostró una alta correlación con el α de Gardner. La conductividad hidráulica y el α de Gardner mostraron relaciones no lineales con el ángulo de contacto del agua con el suelo, según sus tres dominios de humectabilidad.

Existen cambios evidentes tras los incendios en los primeros centímetros del suelo. La hidrofobicidad se vio alterada por la profundidad, tipo y reincidencia de los incendios. Por su parte, la conductividad hidráulica no mostró diferencias significativas respecto de la profundidad.

El número de muestras fue una limitante para poder dilucidar esta parte del estudio. Es recomendable tener estudios pareados con remanentes forestales no quemados y mínimo diez ensayos de infiltración por piso de profundidad en cada sitio para poder entender mejor las diferencias de cada régimen.

Discusión General

En México existen políticas a nivel nacional encargadas de la restauración de suelos como las compensaciones por daños ambientales y las obras de mitigación relacionadas a Manifestaciones de Impacto Ambiental para Cambio de Uso del Suelo. La Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en compañía de la Comisión Nacional Forestal tienen toda una serie de leyes y reglamentos vinculados con la protección del suelo. En este sentido, los incendios han sido parte de un entramado de actividades ilícitas de degradación para el Cambio de Uso del Suelo lejos de una estrategia de manejo para mejorar la resiliencia de los ecosistemas forestales. El clima y patrones climáticos como el ENSO los aumentan o merman, pero factores antrópicos como huertas y caminos promueven su ocurrencia y reincidencia.

La ley está aún lejos de albergar estrategias para manejar los suelos sanos y fértiles expuestos a un cambio de uso del suelo. Las leyes y los reglamentos han ido más enfocados a la restauración de suelos degradados. Los suelos sanos normalmente son sepultados por cemento o removidos y llevados a bancos de tiro, como materiales de desperdicio, en obras de cambio de uso. Los suelos degradados tienen obras cuando ya llevan estados avanzados de degradación, pero no indicadores de monitoreo cuando aún están sanos, pero erosionables.

Ya sea una quema agrícola que se sale de control o una degradación intencionada para un cambio de uso ilegal, los incendios han formado parte íntima de los sistemas de manejo forestal en los ecosistemas de montaña en la franja aguacatera. Aunque se han intentado implementar por décadas políticas de combate y extinción de incendios, hoy está claro que lejos de beneficiar se pueden llegar a tener consecuencias catastróficas con la aparición de mega-incendios (Agee, 1993).

Se suele asociar un incendio con impactos invariablemente degradativos. Sin embargo, queda claro que entender la conjunción de tipo de régimen, la historia de manejo y la vulnerabilidad o resiliencia del suelo es crucial para determinar si el sitio está en un claro proceso de deterioro o de recuperación post-disturbio. En términos de resiliencia y degradación, la pérdida más grave en los suelos se da cuando éstos pierden su estructura (Lal, 1997; Neary *et al.*, 1999; Griffiths & Philippot, 2013). La evaluación de los efectos de los regímenes de incendios sobre el suelo debe seguir encaminada en este sentido.

Para los lugares asociados a carreteras y huertas, donde impera la presencia de remanentes forestales con incendios reincidentes, se pueden tener actividades que frenen y empiecen a revertir el daño del deterioro. Lo primero sería evaluar si estos remanentes están funcionando como bosques o como plantaciones forestales. Tras ello será importante cuantificar el estado de la estructura del suelo y de la vegetación. Para evitar el crecimiento de las cárcavas existen ejemplos de revegetación controlada, donde se pretende incrementar la infiltración del agua reduciendo la escorrentía y evitando la remoción en masas, con lo que se protege el sustrato presente (ya sea suelo o regolito) y se da lugar a la formación de nuevo suelo, reduciendo así la capacidad erosiva del agua (Rivera, 2004; Rivera et al., 2007; Gómez et al., 2011; Mora et al., 2013).

Los Andosols son suelos resilientes ante los incendios, sobre todo con regímenes de baja reincidencia. El tipo de mantillo que presentan determina la presencia o ausencia de combustión latente. Los incendios subterráneos se presentaron en humus de tipo *moder* y seguramente también existirán en humus tipo *mor*. La humedad remanente del suelo mineral debajo de los horizontes orgánicos, así como los macroporos en la memoria edáfica, son cruciales en la difusión del calor del incendio en la profundidad del suelo.

En este trabajo se caracterizaron incendios medianamente frecuentes, un escenario poco común en remanentes forestales cercanos a caminos y huertas de aguacate en la franja aguacatera. No obstante, incendios muy frecuentes e intensos podrían generar condiciones más difíciles de las que las especies están adaptadas para soportar y más degradativas para erosionar irreversiblemente los suelos (Martínez-Torres et al., 2015; Smith et al., 2017). Comenzar con regímenes menos severos permitirá entender los umbrales que llevan a los ecosistemas a un estado estable degradado.

Existen casos donde hay un manejo activo de los incendios, con alta frecuencia de incendios, tanto naturales como provocados en ecosistemas que no se han visto comprometidos en su estructura y funcionalidad. Un ejemplo es el caso de comunidades Rarámuri en las sierras de Chihuahua al norte de México (Fulé et al., 2011), donde se producen incendios para actividades agrícolas, pastoriles, de colecta de plantas y caza de animales desde hace cientos de años en bosques de pino que se han mantenido sanos todo este tiempo. A nivel regional, la presencia de regímenes de disturbios puede generar una matriz de parches que generen arreglos más diversos y resilientes (Pickett & White, 1985; Martínez-Ramos et al., 1988; Agee, 1993).

Generar estrategias para el manejo adecuado de los suelos es necesario para regenerar su calidad y salud, para restablecer parte de la diversidad de los ecosistemas que sostiene y para mejorar las condiciones económicas, de seguridad y de salud de las poblaciones para quienes dicho suelo articula su territorio. Es necesario entender la ecología de los sistemas forestales donde ocurren incendios como la de los remanentes forestales de la franja aguacatera; un manejo sostenible de estos recursos debería garantizar la estabilidad del recurso bosque, así como la conservación del recurso suelo.

Las ganancias económicas de todo cultivo, como el aguacate, dependen de la productividad de sus tierras. Si se pierde suelo, el daño es irreversible y en escalas humanas ya no se podrán volver a ver jamás las ganancias y beneficios de los tiempos de bonanza. Se deben generar estrategias integrales para la conservación y restauración del suelo al tiempo que se indaga en la forma de habilitar regolitos de sitios altamente degradados o de pedogénesis muy incipiente para su aprovechamiento.

Estudiar disturbios ecológicos en suelos no es trivial. El suelo es el componente que da resistencia a los ecosistemas ante perturbaciones fuertes. Son el subsistema de soporte y brindan una amplia variedad de servicios ambientales (Blum, 2005; Bouma, 2014). Si se restaura la estructura del suelo se puede garantizar una correcta infiltración del agua, la cual evitaría el encharcamiento y la pérdida del mismo por escurrimiento, así como una distribución adecuada de las raíces (Martínez-Ramos y García-Orth, 2007). Si se promueve un pH equilibrado se permitiría el desarrollo de las plantas, así como un contenido de nitrógeno y microorganismos adecuado (Allen *et al.*, 2003; Izquierdo *et al.*, 2005 Griffiths & Philippot, 2013; Fultz *et al.*, 2016).

Al integrarse el enfoque de ecología de disturbios con el manejo integral de suelos es posible generar estrategias de manejo que se posicionen como una respuesta ante las necesidades de alimentación, de un ambiente sano y de mejora de las condiciones de vida de las poblaciones. La diversidad de formas en las que se puede presentar un régimen de incendios y los efectos diferenciados que tienen en los ecosistemas son aspectos poco investigados, pero necesarios para generar estrategias de manejo que mejoren fehacientemente las condiciones de los ecosistemas (Rodríguez-Trejo y Fulé, 2003). Es necesario desechar ya el prejuicio de que toda actividad humana conlleva necesariamente sólo efectos negativos sobre nuestro entorno. La influencia humana puede tener impactos positivos en la recuperación de ecosistemas, incluso puede mitigar los efectos colaterales tras disturbios (Chazdon, 2003).

Conclusiones

Con este estudio se lograron caracterizar los regímenes de incendios presentes en la franja aguacatera michoacana. Se encontraron factores controladores de incendios sociales y climáticos para la ocurrencia y reincidencia de incendios. La ocurrencia de incendios está asociada a parcelas agrícolas, huertas de aguacate, caminos y zonas habitadas. La reincidencia está relacionada a la distancia a caminos y huertas con un intervalo de retorno de dos años y medio. El clima juega un papel importante como potenciador o menguador de la extensión de los incendios, esto último especialmente si el invierno tuvo influencia del ENSO.

En cuatro sitios con incendios poco frecuentes fue posible caracterizar las asociaciones entre sus variables ecológicas, tanto de la parte dasométrica como de la parte hidrofísica, química y morfológica del suelo. La vegetación de los cuatro sitios fue una asociación codominante entre varias especies de *Pinus* y de *Quercus.*, al igual que la vegetación más afectada por incendios en la región.

Se constataron relaciones entre variables del régimen del disturbio y de la respuesta de los ecosistemas. Asimismo, se encontraron algunas asociaciones importantes para entender la duración y severidad de los incendios.

Se evaluó el efecto de incendios superficiales y subterráneos en las propiedades hidrofísicas del suelo relacionadas con la infiltración, porosidad e hidrofobicidad. Asimismo, se encontraron relaciones consistentes entre los parámetros hidrofísicos y se descartaron algunas posibles relaciones entre variables.

La hidrofobicidad mostró efectos importantes según la profundidad del suelo en los primeros 5 cm. En el caso de la conductividad hidráulica no se pudieron obtener resultados concluyentes en este sentido debido a un reducido número de repeticiones por piso de profundidad.

Los Andosols de bosques de *Pinus-Quercus* son resilientes ante incendios intensos y poco frecuentes, tanto superficiales como subterráneos, en ecosistemas montanos de la franja aguacatera.

Referencias

- Agee, J. K. (1993). Fire ecology of Pacific Northwest forests. Island press.
- Agee, J. K. (1996, January). The influence of forest structure on fire behavior. In Proceedings of the 17th annual forest vegetation management conference (pp. 52-68). Redding, CA: University of California, Shasta County Cooperative Extension.
- Alaoui, A., Caduff, U., Gerke, H. H., & Weingartner, R. (2011). A preferential flow effects on infiltration and runoff in grassland and forest soils. *Vadose Zone Journal*, 10(1), 367-377.
- Allen, E. B., Allen, M. F., Egerton Warburton, L., Corkidi, L., & Gómez-Pompa, A. (2003). Impacts of Early- and Late-Seral Mycorrhizae During Restoration in Seasonal Tropical Forest , Mexico. *America*, 13(6), 1701-1717.
- Álvarez, Juan Luis & Jurgenson, Gayou (2012). Cómo hacer investigación cualitativa. Paidós Educador. México.
- Alvarez, A., Gracia, M., Castellnou, M., & Retana, J. (2013). Variables that influence changes in fire severity and their relationship with changes between surface and crown fires in a wind-driven wildfire. *Forest Science*, 59(2), 139-150.
- Apfelbaum, S. I., y Haney, A. W. (2010). Restoring ecological health to your land. Washington, DC: Island Press.
- Bán, S., Wolfram, E., & Rohrsetzer, S. (1987). The condition of starting of liquid imbibition in powders. *Colloids and surfaces*, 22(2), 291-300.
- Barsimantov, J., & Navia Antezana, J. (2012). Forest cover change and land tenure change in Mexico's avocado region: Is community forestry related to reduced deforestation for high value crops? *Applied Geography*, 32, 844-853.
- Bates, R. G. (1983). Determination of pH. New York, EUA: Wiley.
- Blake, G. R., & Hartge, K. H. (1986). Bulk Density. En A. Klute (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods* (Vol. SSSA Book Series 5.1, págs. 363-375). Madison, Wisconsin, EUA: Soil Science Society of America, American Society of Agronomy.
- Blum, W. E. H. (2005). Functions of soil for society and the environment. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 4(3), 75-79.
- Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., Úbeda, X., & Martin, D. (2012). Fire and soils : Key concepts and recent advances. *Geoderma*, 191, 3-13.
- Bouma, Johan (2014). Soil science contributions towards Sustainable Development Goals and their implementation: linking soil functions with ecosystem services. Review article. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, 177: 111-120 DOI: 10.1002/jpln.201300646 111
- Bouyoucos, G. J. (1951). A recalibration of the Hydrometer Method for Making Mechanical Analysis of Soils. *Agronomy*, 43(9), 464-465.
- Brenner, L. (2006). Áreas naturales protegidas y ecoturismo: el caso de la Reserva de la Biosfera Mariposa Monarca, México. *Relaciones. Estudios*

de historia y sociedad, XXVII (105), 237-265.

- Buades, J., Cañada, E., & Gascón, J. (2012). Apuntes para un análisis crítico del turismo. En *El turismo en el inicio del milenio: una lectura crítica a tres voces* (Foro de Turismo Responsable, Red de Consumo Solidario, Picu Rabicu y Espacio por un Comercio Justo ed., p. 11). Madrid: Colección thesis.
- Buol, S., F.D., H., & McCracken, R. (1990). *Génesis y clasificación de suelos* (2da edición ed.). México: Trillas.
- Bushell, R., & Eagles, P. (2007). *Turismo y Áreas Protegidas. Beneficios más allá de los límites*. Reino Unido: Athenaeum Press, Gateshead.
- Calderón-Aguilera L.E., Rivera-Monroy, V.H., Porter-Bolland, L.P., Martínez-Yrizar, A., Ladah, Lydia B., Martínez-Ramos, M., Alcocer, J., Santiago-Pérez, A.L., Hernández-Arana, H.A., Reyes-Gómez, V.M., Pérez-Salicrup, D.R., Díaz-Nuñez, V., Sosa-Ramírez, J., Herrera-Silveira, J., Búrquez, A. (2012). An assessment of natural and human disturbance effects on Mexican ecosystems: current trends and research gaps. *Biodivers Conserv* 21:589-617 DOI 10.1007/s10531-011-0218-6
- Cantrell D. C. 1996. Paradigmas alternativos para la investigación sobre Educación Ambiental. Pp. 97-123. En: Mrazek, R. (eds.) *Paradigmas alternativos de investigación en educación ambiental*. Universidad de Guadalajara, SEMARNAP. México.
- Capulín Grande, J., Mohedano Caballero, L., & Razo Zarate, R. (2010). Cambios en el suelo y vegetación de un Bosque de Pino afectado por incendio. *Terra Latinoamericana*, 28(1), 79-87.
- Carrillo, M. L. K., Yates, S. R., & Letey, J. (1999). Measurement of initial soil-water contact angle of water repellent soils. *Soil Science Society of America Journal*, 63(3), 433-436.
- Certini, G. (2005). Effects of fire on properties of forest soils: a review. *Oecologia*, 143(1), 1-10.
- Chapman, H. D. (1965). Cation-Exchange Capacity. En A. G. Norman (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (Vol. Agronomy Monograph 9.2, págs. 891-901). Madison, Wisconsin, EUA: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Chapman, H. D. (1965). Total Exchangeable Bases. En A. G. Norman (Ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties* (Vol. Agronomy Monograph 9.2, págs. 902-904). Madison, Wisconsin, EUA: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Chazdon, R.L. (2003). Tropical forest recovery: legacies of human impact and natural disturbances. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics* 6, 51-71
- Choromanska, U., DeLuca, T.H. (2001). Prescribed fire alters the impact of wildfire on soil biochemical properties in a ponderosa pine forest. *Soil Science Society of America Journal* 65: 232-238.
- Conafor (2010). *Incendios forestales. Guía práctica para comunicadores*. 3ra edición. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México.
- CONAGUA (2020, 17 de abril). *Estaciones climatológicas (Estación 16146)*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Comisión Nacional

del Agua. <https://bit.ly/3hqSxGd>

- Coquet, Y., Vachier, P., & Labat, C. (2005). Vertical variation of near-saturated hydraulic conductivity in three soil profiles. *Geoderma*, 126, 181-191.
- Covington W. W., Moore M. M. (1994). Post settlement changes in natural fire regimes and forest structure: ecological restoration of old-growth ponderosa pine forests. *J. Sustain. For.* 2: 153-181.
- Cruz, M. G., Alexander, M. E., & Wakimoto, R. H. (2005). Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. *Canadian Journal of Forest Research*, 35(7), 1626-1639.
- Daily, G. C. (1995). Restoring Value to the World's Degraded Lands. *Science*, 269(5222), 350-354.
- DeBano LF (2000) Water repellency in soils: a historical overview. *Journal of Hydrology* 231-232, 4-32.
- Dobson, A.P., Bradshaw, A.D., Baker, A.J.M. (1997). Hopes for the Future: Restoration Ecology and Conservation Biology. *Science* 277: 515-522.
- Doerr, S.H. 1998. On standardising the "Water Drop Penetration Time" and the "Molarity of an Ethanol Droplet" techniques to classify soil hydrophobicity: a case study using medium textured soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23: 663-668.
- Doerr, S. H., Shakesby R. A., Walsh, R. P. D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51: 33-65.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & MacDonald, L. H. (2009). Soil water repellency: a key factor in post-fire erosion. In Cerdà, A., Robichaud, P. R. (Eds.). *Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 213-240). India: Science Publishers.
- Elmes, M. C., Thompson, D. K., & Price, J. S. (2019). Changes to the hydrophysical properties of upland and riparian soils in a burned fen watershed in the Athabasca Oil Sands Region, northern Alberta, Canada. *CATENA*, 181, 104077.
- Elrick, D. A., Reynolds, W. D. (1992). Infiltration from Constant-Head Well Permeameters and Infiltrimeters. In Topp, G. C., Reynolds, W. D., & Green, R. E. (Eds.) *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. Soil Science Society of America SSSA Special Publication 30, 1-24.
- FAO. (2006). *Guía para la descripción de suelos*. Roma: FAO.
- Fernández, I., Cabaneiro, A., Carballas, T. (2001). Thermal resistance to high temperatures of different organic fractions from soils under pine forest. *Geoderma* 104: 281-298.
- Filipović, L., Mešić, M., Weninger, T., Schwen, A., Novosel, A., Maretić, M., & Filipović, V. (2019). Effect of fire induced water repellency on soil hydraulic properties and water flow. *Agriculturae Conspectus Scientificus*, 84(2), 143-150.
- Forman, R.T.T. & Gordon, M. (1986). *Landscape Ecology*. Wiley. Chichester.
- Foster, David R. and Boose, Emery R. (1992). *Patterns of Forest Damage*

Resulting from Catastrophic Wind in Central New England, USA. *Journal of Ecology* 80, 79-98.

- Fulé, P.Z., Ramos-Gómez, M., Cortés-Montaño, C., Miller A.M. (2011). Fire regime in a Mexican forest under indigenous resource management. *Ecological Applications* 21(3): 764-775.
- Fultz, L. M., Moore-Kucera, J., Dathe, J., Davinic, M., Perry, G., Wester, D., ... & Rideout-Hanzak, S. (2016). Forest wildfire and grassland prescribed fire effects on soil biogeochemical processes and microbial communities: Two case studies in the semi-arid Southwest. *Applied soil ecology*, 99, 118-128.
- Gallardo, J. F., Bravo, M., Prat, C., Medina, L., Fragoso, L., Serrato, B., & Etchevers, J. D. (2005). Recuperación de agrosistemas degradados en la cuenca del lago de Cuitzeo (Michoacán, México): I. Manejo de suelos.
- Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil science*, 85(4), 228-232.
- Gee, G. W., & Bauder, J. W. (1986). Particle-size analysis. En A. Klute, *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods* (págs. 383-411). Madison, Wisconsin, EUA: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America.
- Gliński, J., Horabik, J., & Lipiec, J. (Eds.). (2011). *Encyclopedia of agrophysics* (pp. 264-267). Heidelberg: Springer.
- Gómez Calero, J. A., Taguas, E. V., Vanwalleghem, T., Giráldez, J. V., Sánchez, F., Ayuso, J. L., ... & Mora, J. (2011). Criterios técnicos para el control de cárcavas, diseño de muros de retención y revegetación de paisajes agrarios. *Manual del operador en inversiones no productivas*.
- Gómez-Tagle, A. (2009). Linking hydrogeology and ecosystem services: differential controls of surface field saturated hydraulic conductivity in a volcanic setting in central Mexico. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 6:2499-2536.
- Gómez-Tagle, A., Geissert, D., Enríquez Fernández, E. (2014). *Manual de infiltrometría. Infiltrómetro de tensión INDI*. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz. 85 p.
- Gómez-Tagle, A.; Geissert, D.; Pérez-Maqueo, O.M.; Marin-Castro, B.E.; Rendon-Lopez, M.B. (2011). Saturated hydraulic conductivity and land use change, new insights to the payments for ecosystem services programs: a case study from a Tropical montane cloud forest watershed in eastern central Mexico. En: Dikinya, O. (Ed.). *Developments in hydraulic conductivity research*. InTech Publisher (Open Access Publisher). pp. 225-248.
- González-Pérez, J. A., González-Vila, F. J., Almendros, G., & Knicker, H. (2004). The effect of fire on soil organic matter—a review. *Environment international*, 30(6), 855-870.
- Griffiths, B. S., & Philippot, L. (2013). Insights into the resistance and resilience of the soil microbial community. *FEMS microbiology reviews*, 37(2), 112-129.
- Gupta, S., Hengl, T., Lehmann, P., Bonetti, S., & Or, D. (2020). SoilKsatDB: global soil saturated hydraulic conductivity measurements

for geoscience applications. *Earth System Science Data Discussions*, 1-26.

- Holl, K. D., E. E. Crone, y C. B. Schultz. (2003). Landscape restoration: moving from generalities to methodologies. *BioScience* 53:491-502.
- HwanSuk, C. C., & Ercan, S. (2005). Sustainability indicators for managing community tourism. University of Guelph, Guelph, Ont., Canada y Texas A&M University, College Station, USA: Elsevier.
- INEGI. (1985a). Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Fisiográfica [mapa]. Escala 1:1 000 000. Serie I (Continuo Nacional). México.
- INEGI. (1985b). Conjunto de Datos Geográficos de la Carta Geológica [mapa]. Escala 1:250 000. serie I (Continuo Nacional). México.
- INEGI. (1985c). Conjunto de Datos Geográficos de las Cartas de Climas, Precipitación Total Anual y Temperatura Media Anual [mapa]. Escala 1:1 000 000. Serie I (Continuo Nacional).
- INEGI. (1993). Conjunto de Datos Vectoriales Edafológico [mapa]. Escala 1:250 000. Serie II (Continuo Nacional). México.
- INEGI (2013). Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM) [raster:TIF]. Obtenido de: <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- INEGI (2017). Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación serie VI. Conjunto Nacional [formato electrónico: SHP]. Escala 1:250,000. México.
- INEGI (2018). Conjunto de Datos Geográficos de las Cartas Topográficas [formato electrónico: SHP]. Escala 1:20,000. México.
- ISO 11265. (01 de 10 de 1994). Soil quality - Determination of the specific electrical conductivity, 1ra edición.
- ISRIC (2020, mayo). SOILGRIDS™. (versión 2.0) [mapa web]. <https://soilgrids.org/>
- IUSS Working Group WRB. (2015). World reference base for soil resources 2014, update 2015: International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports* No. 106, 192.
- Izquierdo, I., Caravaca, F., Alguacil, M. M., Hernández, G., & Roldán, A. (2005). Use of microbiological indicators for evaluating success in soil restoration after revegetation of a mining area under subtropical conditions. *Applied Soil Ecology*, 30(1), 3-10. doi:10.1016/j.apsoil.2005.02.004
- Jiménez-Pinilla, P., Doerr, S. H., Ahn, S., Lozano, E., Mataix-Solera, J., Jordán, A., ... & Arcenegui, V. (2016). Effects of relative humidity on the water repellency of fire-affected soils. *Catena*, 138, 68-76.
- Jurin, J. (1718). II. An account of some experiments shown before the Royal Society; with an enquiry into the cause of the ascent and suspension of water in capillary tubes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 30(355), 739-747.
- Jordán, A., Zavala, L. M., Mataix-Solera, J., & Doerr, S. H. (2013). Soil water repellency: Origin, assessment and geomorphological consequences. *Catena*, 108, 1-5.
- Jordán, A., Zavala, L. M., Mataix-Solera, J., Nava, A. L., & Alanís, N.

- (2011). Effect of fire severity on water repellency and aggregate stability on Mexican volcanic soils. *Catena*, 84(3), 136-147.
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116-126.
 - Kennard, D. K., & Gholz, H. L. (2001). *Effects of high-and low-intensity fires on soil properties and plant growth in a Bolivian dry forest*. *Plant and Soil*, 234(1), 119-129.
 - Klute, A. (1986). Water retention: laboratory methods. En A. Klute, *Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods* (págs. 635-662). Madison, EUA: American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, Inc.
 - Kutiel, P., & Naveh, Z. (1987). The effect of fire on nutrients in a pine forest soil. *Plant and Soil*, 104(2), 269-274.
 - Landres, P.B., Morgan, P., Swanson, F.J. (1999). Overview of the use of natural variability concepts in managing ecological systems. *Ecological Applications* 9 (4): 1179-1188.
 - Lenihan, Hunter S. and Oliver, John S. (1995). Anthropogenic and Natural Disturbances to Marine Benthic Communities in Antarctica. *Ecological Applications* 5 (2): 311-326.
 - Letey, J., Carrillo, M.L.K., and Pang, X.P.. 2000. Approaches to characterize the degree of water repellency. *Journal of Hydrology*, 231-232: 61-65.
 - Letey, J., Osborn, J., Pelishek, R.E. (1962). Measurement of liquid-solid contact angles in soil and sand. *Soil Sci.* 93, 149-153.
 - Lin, H. S., McInnes, K. J., Wilding, L. P., & Hallmark, C. T. (1996). Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a well-structured subsoil. *Transactions of the ASAE*, 39(1), 131-135.
 - Lindenmayer, David, McCarthy, Michael A. (2002). Congruence between natural and human forest disturbance: a case study from Australian montane ash forests. *Forest Ecology and Management* 155: 319-335.
 - Linding, R., & Casas, A. (2013). Experiencias docentes en integración de conocimientos ambientales en comunidades rurales. En A. Camou Guerrero, A. Castillo, & E. García-Frapolli, *Procesos de formación educativa interdisciplinaria: miradas desde las ciencias ambientales* (1ra edición ed., pág. 352). México: UNAM.
 - Liu, Jianguo, Dietz, Thomas, Carpenter, Stephen R., Folke, Carl, Alberti, Marina, Redman, Charles L., Schneider, Stephen H., Ostrom, Elinor, Pell, Alice N., Lubchenco, Jane, Taylor, William W., Ouyang, Zhiyun, Deadman, Peter, Kratz, Timothy and Provencher, William (2007). *Coupled Human and Natural Systems*. *Ambio* 36 (8): 639-648.
 - Logsdon, S. D., & Jaynes, D. B. (1993). Methodology for Determining Hydraulic Conductivity with Tension Infiltrimeters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 57, 1426-1431.
 - Luxmoore, R.J. 1981. Micro-, meso- and macroporosity of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 671-67
 - Loucks, O. L. (1975). Analysis of perturbations in ecosystems. *The Study*

of Species Transients, their Characteristics and Significance of Natural Resource Systems'. Inst. Ecol., Indianapolis, Indiana, 4-7.

- Magaña Rueda, V., Pérez, J.L., Conde, C. (1998). El fenómeno de El Niño y la oscilación del sur. Sus impactos en México. *Ciencias* 51: 14-18. [online]
- Maranhão de Melo, D.V., Gomes de Almeida, B., Rocha Andrade, K., Rodrigues de Souza, E., da Silva Souza, W.L., Duarte Guedes Cabral de Almeida, C. (2016). Pore size distribution and hydro-physical properties of cohesive horizons treated with anionic polymer. *African Journal of Agricultural Research*, 11(44), 4444-4453.
- Marín-Castro, B. E., Geissert, D., Negrete-Yankelevich, S., & Chávez, A. G. T. (2016). Spatial distribution of hydraulic conductivity in soils of secondary tropical montane cloud forests and shade coffee agroecosystems. *Geoderma*, 283, 57-67.
- Martínez-Ramos, Miguel, Álvarez-Buylla Elena, Sarukhán, José & Piñero, Daniel (1988). Treefall age determination and gap dynamics in a tropical forest. *Journal of Ecology* 76, 700-716.
- Martínez-Ramos, M., & García-Orth, X. (2007). Sucesión ecológica y restauración de las selvas húmedas. *Boletín de la Sociedad Botánica de México*, 80, 69-84.
- Martínez-Torres, H., Cantú-Fernández, M., Ramírez, M. I., Pérez-Salicrup, D. R. (2015). Fires and Fire Management in the Monarch Butterfly Biosphere Reserve. En *Monarchs in a changing world: biology and conservation of an iconic insect* (págs. Oberhauser K.S., Nail K.R., Altizer S.M. (eds.) 179-189). Cornell University Press.
- Mataix-Solera, J., Guerrero, C., Úbeda, X., Outerio, L., Torres P., Cerdà, A., Bodí, M. B., Arcenegui, V., Zornoza, R., Gómez, I., Mataix-Beneyto, J. (2007). Incendios forestales, suelos y erosión hídrica. *Caja Mediterráneo*. Mataix-Solera, J. (Ed.). ISBN 84-7599-194-7.
- Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Zavala, L.M., Pérez-Bejarano, A., Jordán, A., Morugán-Coronado, A., Bárcenas-Moreno, G., Lozano, E., Granged, A. J., Gil-Torres, J. (2014). Small variations of soil properties control fire-induced water repellency. *Spanish Journal of Soil Science*, 4(1).
- Matin, M. A., Chitale, V. S., Murthy, M. S., Uddin, K., Bajracharya, B., Pradhan, S. (2017). Understanding forest fire patterns and risk in Nepal using remote sensing, geographic information system and historical fire data. *International journal of wildland fire*, 26(4), 276-286.
- Melo Gallegos, Carlos, & López García, José. (1989). Contribución geográfica al programa integral de desarrollo mariposa monarca. *Investigaciones geográficas*, (19), 9-26. Recuperado en 25 de octubre de 2017, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111989000100001&lng=es&tlng=es
- Miyazaki, T. (1988). Water flow in unsaturated soil in layered slopes. *Journal of Hydrology*, 102(1-4): 201-214.
- Mora Jordano, J., Lora González, A., Castillo Rodríguez, C., Muñoz Macías, F., Rojo Aranda, M., & Gómez Calero, J. (2013, June). Técnicas de control de cárcavas mediante el uso de vegetación forestal y diques de retención en explotaciones agrícolas. El caso de la finca "La

Veguilla". In Congresos-CARGA FINAL.

- Morales Manilla, L. M., Cuevas García, G. (2011). Informe Final: "Inventarios 1974-2007, e impacto ambiental regional del cultivo del aguacate en el estado de Michoacán (Etapa I)". CIGA, UNAM -Fundación Produce Michoacán. Abril, 2011, 138 pp.
- Mori, Akira S. (2011). Ecosystem management based on natural disturbances: hierarchical context and non-equilibrium paradigm. *Journal of Applied Ecology* 48: 280-292 DOI: 10.1111/j.1365-2664.2010.01956.x
- Munsell Color. (2000). Munsell soil color chart (2000 rev. washable ed. ed.). Grand Rapids, Michigan, EUA.
- Neary, D. G., Klopatek, C. C., DeBano, L. F., & Ffolliott, P. F. (1999). Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest ecology and management*, 122(1-2), 51-71.
- Neilson, R.P. & Wullstein, L.H. (1983). Biogeography of two southwest American oaks in relation to atmospheric dynamics. *Journal of Biogeography* 10: 275-297.
- Oldeman, L. R. (1998). Soil degradation: a threat to food security. PS Bindraban et Al Food Security at Different Scales.
- Olsen, S. R., & Sommers, L. E. (1982). Phosphorus. En A. L. Page (Ed.), *Methods of Soil Analysis* (Vol. Agronomy 9 part 2, págs. 420-422). Madison, Wisconsin, EUA: American Society of Agronomy.
- Ostrom, Elinor, et al. (2009). A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Science* 325: 419-422. DOI: 10.1126/science.1172133
- Paone, J., P. Struthers & W. Johnson (1978). Extent of disturbed lands and major reclamation problems in the United States. En: Schaller, F.W., y P. Sutton (co-eds.) *Reclamation of drastically disturbed lands*. Am. Soc. of Agron., Madison. pp. 11-22
- Parr, C. L., & Andersen, A. N. (2006). Patch mosaic burning for biodiversity conservation: A critique of the pyrodiversity paradigm. *Conservation Biology*, 20(6), 1610-1619. <http://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00492.x>
- Pérez-Ramírez, Silvia, Ramírez, M. Isabel, Jaramillo-López, Pablo F., & Bautista, Francisco. (2013). Contenido de carbono orgánico en el suelo bajo diferentes condiciones forestales: reserva de la biosfera mariposa monarca, México. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 19(1), 157-173. <https://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.09.062>
- Peroux, K.M., White, I. (1988). Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America*, J. 52, 1205-1215.
- Phillips, J. D., & Marion, D. A. (2004). Pedological memory in forest soil development. *Forest Ecology and Management*, 188(1-3), 363-380.
- Pickett, S. T. A. y P. S. White (eds.). 1985. *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics*. Academic Press, U.S.A., 472 pp.
- Pickett, S. T. A., Cadenasso, M. L. and Grove, J. M. (2005). Biocomplexity in Coupled Natural-Human Systems: A Multidimensional Framework. *Ecosystems* 8: 225-232. DOI: 10.1007/s10021-004-0098-7
- R Core Team (2018). R: A language and environment for statistical

computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>

- Rein, Guillermo (2015). Smoldering-Peat Megafires. En Stracher, G. B., Prakash, A., & Rein, G. (Eds.). Coal and peat fires: a global perspective: volume 4: peat-geology, combustion, and case studies. Elsevier.
- Reyes González, Alejandro (2014). Análisis comparativo de los patrones espaciales de la deforestación en una zona tropical y una templada de Michoacán [tesis de maestría]. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Filosofía y Letras. México, DF.
- Rivera P., J.H. (2004). Manejo Integrado de Arvenses con criterios de Sostenibilidad In: XI Congreso Venezolano de Malezas. Manejo de Malezas con Visión Ecológica, 2004. San Cristóbal. Memorias XI Congreso Venezolano de Malezas, San Cristóbal. Universidad Nacional Experimental del Táchira, Venezuela. P 9 - 41.
- Rivera, J. H., Sinisterra, J., & Calle, Z. (2007). Restauración ecológica de suelos degradados por erosión en cárcavas en el enclave xerofítico de Dagua, Valle del Cauca, Colombia. Cali, Colombia, CIPAV.
- Robichaud, P. R., Lewis, S. A., & Ashmun, L. E. (2008). New procedure for sampling infiltration to assess post-fire soil water repellency. Res. Note. RMRS-RN-33. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 14 p., 33.
- Robinson, G.R., Handel, S.N. (1993). Forest Restoration on a Closed Landfill: Rapid Addition of New Species by Bird Dispersal. Conservation Biology 7 (2): 271-278.
- Rodríguez Rodríguez, J. (2014). "Procesos y factores del flujo de infiltración edáfica en una disturboscuencia de bosque de pino-encino del sur de la cuenca de Cuitzeo, Michoacán". Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Rodríguez Trejo, D. A. (2014). Ecología del fuego. Su Ecología, Manejo e Historia. Ed. Colegio de Postgraduados, Universidad Autónoma Chapingo, Semarnat, Programa de Prevención y Combate de Incendios Forestales, Conafor, Conanp, Parque Nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl, ANCF, AMPF. México. 891 p.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Fulé, P. Z. (2003). Fire ecology of Mexican pines and a fire management proposal. International Journal of Wildland Fire 12, 23-27.
- Rossiter, D. G. (2000). Metodologías para el levantamiento del recurso suelo (2da ed.). (D. Vargas Rojas, Trad.) International Institute for Geo-information Science & Earth Observation (ITC).
- Russell-Smith, Jeremy, Cook, Garry D., Cooke, Peter M., Edwards, Andrew C., Lendrum, Mitchell Meyer, CP (Mick) and Whitehead, Peter J (2013). Managing fire regimes in north Australian savannas: applying Aboriginal approaches to contemporary global problems. Front Ecol Environ; 11 (Online Issue 1): e55-e63 DOI:10.1890/120251
- Sarmiento, F.O. (1997). Landscape Regeneration by Seeds and Successional Pathways to Restore Fragile Tropandean Slopes. Mountain Research and Development 17 (3): 239-252.
- Saura, S. & J. Torné. 2009. Conefor Sensinode 2.2: a software package

for quantifying the importance of habitat patches for landscape connectivity. *Environmental Modelling & Software* 24: 135-139.

- Scoones, I (1999) *New Ecology and the Social Sciences: What Prospects for a Fruitful Engagement?* *Annual Review of Anthropology*, Vol. 28 , pp. 479-507
- SEMARNAT y CP (2003). *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la república mexicana escala 1:250,000*. Memoria nacional 2001-2002. México.
- SER (Society for Ecological Restoration International). 2004. *The SER International Primer on Ecological Restoration*. Society for Ecological Restoration International, Tucson, AZ. EE.UU.
- Servicio Geológico Mexicano. (agosto de 2005). *Carta geológico-minera Campeche E15-3*. (E. A. Cardoso Vázquez, E. Sánchez Garrido, J. A. Rafael Fernández, & L. Mata Hernández, Edits.) Campeche, México.
- Shannon, C. and Weaver, W. (1949). *The Mathematical Theory of Communication*. Univ. Illinois Press, Urbana, 1L, 117 pp.
- SIAP (s.f.). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. [online] Disponible en: <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> [Consultado el 16 Dic. 2018].
- SIAP (2019). *SIACON-NG [software]*. Obtenido de: <https://www.gob.mx/siap/documentos/siacon-ng-161430>
- SIAP (2020). *Balanza Comercial Agropecuaria y Agroindustrial noviembre 2019* [online]. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <https://bit.ly/2L3CqAr> [Consultado el 02 de abril del 2020].
- Siebe, C., Jahn, R., Stahr K.. (1996). *Manual para la descripción y evaluación ecológica de suelos en el campo*. Publicación Especial 4. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Universidad Autónoma Chapingo, México. 57 p.
- Shirtcliffe, N. J., McHale, G., Newton, M. I., Pyatt, F. B., & Doerr, S. H. (2006). *Critical conditions for the wetting of soils*. *Applied Physics Letters*, 89(9), 094101.
- Simpson, E.H. (1949). *Measurement of diversity*. *Nature (London)*, 163: 688.
- Smith, J.E., Kluber, L.A., Jennings, T.N., McKay, D., Brenner, G., Sulzman, E.W.(2017). *Does the presence of large down wood at the time of a forest fire impact soil recovery?*. *Forest Ecology and Management* 391: 52-62.
- Soil Science Division Staff (2018). *Soil Survey Manual*. Agriculture Handbook 18. USDA.
- Sojka, R. E. (2000). *Physical aspects of soils of disturbed ground*. En Walker, Lawrence R. (Edit.), *Ecosystems of disturbed ground* (págs. 503-519). *Ecosystems of the world* 16. Elsevier.
- Soltani, I., Fouad, Y., Michot, D., Pichelin, P., & Cudennec, C. (2019). *Relevance of a near infrared spectral index for assessing tillage and fertilization effects on soil water retention*. *Soil and Tillage Research*, 194, 104345.
- Sousa, W.P. 1984. *The role of disturbance in natural communities*. *Annual Review of Ecology and Systematics* 15: 353-391.

- Spongrová, K., Kechavarzi, C., Dresser, M., Matula, S., Godwin, R.J. (2009). Development of an automated tension infiltrometer for field use. *Vadose Zone J.* 8, 810-817.
- Targulian, V. O., & Goryachkin, S. V. (2004). Soil memory: Types of record, carriers, hierarchy and diversity. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 21(1), 1-8.
- Taylor, S. J., & Bogdan, R. (1987). *Introducción a los métodos cualitativos de investigación* (Vol. 1). Barcelona: Paidós.
- Thompson, K., & Grime, J. P. (1979). Seasonal variation in the seed banks of herbaceous species in ten contrasting habitats. *The Journal of Ecology*, 893-921.
- Van Lynden, G., & Oldeman, L. (1997). *Soil degradation in south and southeast Asia*. International Soil Reference and Information Centre for the United Nations Environment Programme, Wageningen.
- Van't Woudt, B.D. (1959). Particle coatings affecting the wettability of soils. *Journal of Geophysical Research* 64: 263-267. Citado en Doerr, S. H., Shakesby R. A., Walsh, R. P. D. (2000). Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51: 33-65.
- Varner III, J. M., Gordon, D. R., Putz, F. E., & Hiers, J. K. (2005). Restoring fire to long-unburned *Pinus palustris* ecosystems: novel fire effects and consequences for long-unburned ecosystems. *Restoration Ecology*, 13(3), 536-544.
- Vega, Ernesto & Peters, Eduardo (s.f.). *Conceptos generales sobre el disturbio y sus efectos negativos en los ecosistemas*. Instituto Nacional de Ecología. México, D.F.
- Wang, Q., Zhong, M., & Wang, S. (2012). A meta-analysis on the response of microbial biomass, dissolved organic matter, respiration, and N mineralization in mineral soil to fire in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 271, 91-97.
- Walkey, A., & Black, I. A. (1934). An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 29-38.
- Watson, K. W., & Luxmoore, R. J. (1986). Estimating Macroporosity in a Forest Watershed by use of a Tension Infiltrometer 1. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 578-582.
- White, I., Sully M.J., Perroux, K.M. (1992). Measurement of Surface-Soil Hydraulic Properties: Disk Permeameters, Tension Infiltrometers, and Other Techniques. En Topp, G. C., Reynolds, W. D., & Green, R. E. (Eds.) *Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice*. Soil Science Society of America SSSA Special Publication 30, 69-103.
- White, I., Perroux, K. M. (1987). Use of Sorptivity to Determine Field Soil Hydraulic Properties 1. *Soil Science Society of America Journal*, 51(5), 1093-1101.
- Wooding, R. A. (1968). Steady infiltration from a shallow circular pond. *Water Resources Research* 4(6): 1259-1273.
- Wösten, J. H. M., Van Den Berg, J., Van Eijk, P., Gevers, G. J. M.,

Giesen, W. B. J. T., Hooijer, A., ... & Silvius, M. J. (2006). Interrelationships between hydrology and ecology in fire degraded tropical peat swamp forests. *Water Resources Development*, 22(1), 157-174.

- Wu, J., & Loucks, O. L. (1995). From balance of nature to hierarchical patch dynamics: a paradigm shift in ecology. *The Quarterly review of biology*, 70(4), 439-466.
- Wunderle Jr., J.M. (1997). The role of animal seed dispersal in accelerating native forest regeneration on degraded tropical lands. *Forestry Ecology and Management* 99: 223-235.
- Young, P.T. (2000). Restoration ecology and conservation biology. *Biological Conservation* 92: 73-83.
- Yusiharni, E., & Gilkes, R. J. (2012). Changes in the mineralogy and chemistry of a lateritic soil due to a bushfire at Wundowie, Darling Range, Western Australia. *Geoderma*, 191, 140-150.
- Zinck, J. A. (2012). *Geopedología*. Enschede, Países Bajos: ITC.

Anexos

- 1 Estaciones climáticas de CNA cuyos datos fueron minados.**
- 2 Estaciones climáticas de APEAM cuyos datos fueron minados.**
- 3 Ficha técnica de Santa Rita.**
- 4 Ficha técnica de La Yácata.**
- 5 Ficha técnica de Pinera Miguel.**
- 6 Ficha técnica de Crucitas.**
- 7 Valores de porosidad e hidrofobicidad en los 3 pisos de infiltración.**

Estaciones climáticas de CNA cuyos datos fueron minados.

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	Estatus	Estado	Thiessen-Voronoi	Distancia mínima
16146	ZIRAHUEN	19.4542	-101.7319	2090	Operando	Michoacán	315	243
16156	CHARAPENDO	19.2667	-102.0667	1013	Suspendida	Michoacán	160	64
16253	TANACO	19.7375	-102.0792	2140	Operando	Michoacán	137	19
16162	ORANDINO	19.9667	-102.325	1580	Operando	Michoacán	112	14
16012	CAJONES	19.21	-101.9117	480	Operando	Michoacán	109	12
16087	PATZCUARO	19.5164	-101.6097	2140	Operando	Michoacán	101	6
16515	LA SANDIA	19.2633	-101.6753	2180	Operando	Michoacán	89	10
16047	EL ZAPOTE	18.9142	-101.7178	520	Operando	Michoacán	78	23
16001	ACUITZIO DEL CANJE	19.4989	-101.3447	2200	Operando	Michoacán	71	2
16240	EL PUEBLITO	19.8222	-101.9292	2371	Operando	Michoacán	66	7
16194	E.T.A. 039 TOCUMBO	19.7019	-102.5203	1600	Suspendida	Michoacán	65	65
16125	TANGANCICUARO	19.8889	-102.205	1710	Operando	Michoacán	57	22
16085	PARACUARO	19.15	-102.225	597	Operando	Michoacán	35	47
16192	LA ENCARNACION	19.4128	-100.3939	1720	Operando	Michoacán	34	62
15197	CUESTA DEL CARMEN	19.4628	-100.1978	2750	Operando	México	33	83
16251	PATAMBAN	19.8025	-102.2889	2140	Operando	Michoacán	29	15
16123	TACAMBARO	19.2356	-101.4569	1640	Operando	Michoacán	23	0
16230	LAS CRUCES	19.0653	-101.4278	800	Operando	Michoacán	22	67
16043	EL PUERTO	19.8011	-102.6703	1640	Operando	Michoacán	18	100
16114	SAN MIGUEL DEL MONTE	19.6203	-101.1342	1965	Operando	Michoacán	12	0

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	Estatus	Estado	Thiessen-Voronoi	Distancia mínima
16258	PRESA TUXPAN	19.5397	-100.4822	1747	Operando	Michoacán	7	42
15378	SAN PABLO MALACATEPEC	19.3703	-100.1569	2383	Operando	México	7	1
16095	PRESA JARIPO	19.9583	-102.6	1587	Suspendida	Michoacán	5	17
16109	SAN DIEGO CURUPATZEO	19.3333	-101.1833	1444	Operando	Michoacán	2	14
16121	SENGUIO	19.7328	-100.3522	2260	Operando	Michoacán	2	2
16514	JARIPEO	19.6511	-100.4828	1880	Operando	Michoacán	2	1
16014	CAMECUARO	19.9167	-102.2125	1708	Operando	Michoacán	2	0
16178	E.N.G.F. URUAPAN	19.3833	-102.0333	2193	Operando	Michoacán	1	41
16142	ZACAPU (DGE)	19.8053	-101.795	1986	Operando	Michoacán	1	1
16118	SANTA FE	19.6731	-101.5561	2203	Operando	Michoacán	1	0
16120	SANTIAGO UNDAMEO	19.6028	-101.32	2130	Operando	Michoacán	0	150
16036	PRESA EL BOSQUE (CFE)	19.3833	-100.3833	1909	Operando	Michoacán	0	43
16137	UREPETIRO	19.975	-102.1269	1753	Operando	Michoacán	0	30
16058	JUNGAPEO	19.4583	-100.4942	1248	Suspendida	Michoacán	0	11
16098	PRESA SABANETA	19.6106	-100.6692	2510	Operando	Michoacán	0	11
16122	SUSUPUATO DE GUERRERO	19.2147	-100.4067	1260	Operando	Michoacán	0	9
16002	AGOSTITLAN (CFE)	19.5369	-100.6183	2520	Operando	Michoacán	0	7
16015	CARAPAN	19.8603	-102.0372	1940	Operando	Michoacán	0	4
16241	TAFETAN	19.4239	-100.9072	913	Operando	Michoacán	0	3
15391	E. T. A. 026 VILLA VICTORIA	19.4561	-100.0694	2580	Operando	México	0	3

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	Estatus	Estado	Thiessen-Voronoi	Distancia mínima
16094	PRESA GUARACHA	19.9606	-102.5844	1580	Suspendida	Michoacán	0	2
16228	ACAHUATO	19.1478	-102.3325	227	Operando	Michoacán	0	2
16007	APATZINGAN (SMN)	19.0886	-102.3508	320	Operando	Michoacán	0	2
16133	TURICATO	19.0536	-101.4206	740	Operando	Michoacán	0	1
16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	19.6917	-100.5536	2060	Operando	Michoacán	0	1
14124	SAN DIEGO	19.8886	-102.8344	1620	Suspendida	Jalisco	0	0
15035	IXTAPAN DEL ORO	19.2664	-100.2661	1719	Suspendida	México	0	0
15046	PRESA COLORINES (CFE)	19.1764	-100.2164	1645	Operando	México	0	0
15066	PALIZADA	19.5075	-100.0978	2635	Operando	México	0	0
15107	SANTA BARBARA (CFE)	19.2061	-100.3247	1346	Suspendida	México	0	0
15130	PRESA VALLE DEL BRAVO (CFE)	19.2333	-100.1333	1942	Suspendida	México	0	0
15131	VILLA DE ALLENDE	19.3667	-100.0833	2550	Suspendida	México	0	0
15133	PRESA VILLA VICTORIA	19.4572	-99.9919	2577	Operando	México	0	0
15140	PRESA CHILESDO	19.3475	-100.1519	2365	Operando	México	0	0
15165	VALLE DEL BRAVO	19.1925	-100.1306	1948	Operando	México	0	0
15178	IXTAPANTONGO	19.1731	-100.2417	1377	Suspendida	México	0	0
15230	PALO AMARILLO	19.65	-100.2167	3080	Suspendida	México	0	0
15265	CAMPAMENTO LOS BERROS	19.3894	-100.0758	2541	Operando	México	0	0
15322	ASUNCION DONATO GUERRA	19.3089	-100.1511	2183	Suspendida	México	0	0
15334	PALO SECO	19.5272	-100.1597	2925	Suspendida	México	0	0

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	Estatus	Estado	Thiessen-Voronoi	Distancia mínima
16006	ANTUNEZ	19.0125	-102.2	360	Operando	Michoacán	0	0
16010	BARTOLINAS (CFE)	19.2	-101.4333	1400	Suspendida	Michoacán	0	0
16011	BUENAVISTA I	19.2089	-102.5864	450	Suspendida	Michoacán	0	0
16019	CERRITO PELON	19.9667	-102.7	1754	Suspendida	Michoacán	0	0
16022	COINTZIO	19.625	-101.2811	2096	Operando	Michoacán	0	0
16025	COTIJA	19.7167	-102.6667	2341	Suspendida	Michoacán	0	0
16026	CUATRO CAMINOS	18.9881	-102.1031	672	Operando	Michoacán	0	0
16031	CHAPARACO	19.9736	-102.2653	1589	Operando	Michoacán	0	0
16032	CHARAPAN	19.7	-102.2	2407	Suspendida	Michoacán	0	0
16037	EL CAJON (CFE)	18.9667	-102.75	321	Suspendida	Michoacán	0	0
16045	EL TEMAZCAL	19.6506	-100.955	2220	Operando	Michoacán	0	0
16048	ZAMORA (DGE)	19.9856	-102.2831	1580	Operando	Michoacán	0	0
16049	ETUCUARO	19.3833	-101.2167	1690	Suspendida	Michoacán	0	0
16053	SAN SEBASTIAN	19.5719	-102.4817	1300	Suspendida	Michoacán	0	0
16055	JESUS DEL MONTE	19.6517	-101.1514	2180	Operando	Michoacán	0	0
16056	JICALAN (CFE)	19.3936	-102.07	1610	Suspendida	Michoacán	0	0
16062	LA HUACANA	18.9622	-101.8064	651	Suspendida	Michoacán	0	0
16064	LA PASTORIA (CFE)	18.9303	-102.0567	221	Suspendida	Michoacán	0	0
16072	LOS CHORROS DEL VARAL (CFE)	19.52	-102.5703	930	Suspendida	Michoacán	0	0
16073	LOS LIMONES (CFE)	19.6017	-102.5281	1175	Suspendida	Michoacán	0	0
16074	LOS PANCHES (CFE)	18.8486	-102.1333	207	Suspendida	Michoacán	0	0
16077	LOS REYES	19.5833	-102.4833	1280	Suspendida	Michoacán	0	0

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	Estatus	Estado	Thiessen-Voronoi	Distancia mínima
16079	MELCHOR OCAMPO	19.5833	-100.3333	2300	Suspendida	Michoacán	0	0
16080	MORELIA (OBS)	19.7	-101.1833	1912.7	Operando	Michoacán	0	0
16081	MORELIA	19.6886	-101.1761	1908	Operando	Michoacán	0	0
16082	NUEVA ITALIA (CFE)	19.0656	-102.0864	391	Suspendida	Michoacán	0	0
16088	PERIBAN	19.5211	-102.415	1640	Suspendida	Michoacán	0	0
16089	PLANTA EL COBANO (CFE)	19.1594	-102.0106	643	Suspendida	Michoacán	0	0
16092	PRESA AGOSTITLAN	19.5667	-100.6	2443	Suspendida	Michoacán	0	0
16097	PRESA PUCUATO	19.6222	-100.6856	2490	Operando	Michoacán	0	0
16099	PRESA TUXPAN (CFE)	19.5628	-100.4761	1750	Suspendida	Michoacán	0	0
16103	PUREPERO	19.915	-102.0178	2083	Suspendida	Michoacán	0	0
16106	SAN ANGEL	19.86	-102.5486	1840	Suspendida	Michoacán	0	0
16107	SAN CARLOS I	19.2456	-100.79	799	Suspendida	Michoacán	0	0
16127	TARETAN (CFE)	19.3356	-101.9181	1147	Suspendida	Michoacán	0	0
16134	TUXPAN	19.5667	-100.45	1800	Suspendida	Michoacán	0	0
16135	TUZANTLA (SMN)	19.2167	-100.5833	666	Operando	Michoacán	0	0
16136	TZITZIO	19.5825	-100.9239	1565	Operando	Michoacán	0	0
16138	URUAPAN (DGE)	19.3847	-102.0583	1578	Suspendida	Michoacán	0	0
16139	VILLA MADERO	19.4	-101.2667	2097	Suspendida	Michoacán	0	0
16140	VILLA MADERO (CFE)	19.39	-101.2775	2182	Suspendida	Michoacán	0	0
16143	ZAMORA (OBS)	20.0111	-102.2806	1564	Operando	Michoacán	0	0
16144	ZAMORA (SMN)	19.985	-102.2831	1580	Suspendida	Michoacán	0	0
16148	ZITACUARO	19.4333	-100.3667	1870	Suspendida	Michoacán	0	0

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	Estatus	Estado	Thiessen-Voronoi	Distancia mínima
16149	APATZINGAN (DGE)	19.0833	-102.35	332	Suspendida	Michoacán	0	0
16150	APATZINGAN (CFE)	19.0917	-102.35	334	Suspendida	Michoacán	0	0
16152	CIUDAD HIDALGO (SMN)	19.7167	-100.55	2327	Suspendida	Michoacán	0	0
16157	CHILA	18.9333	-102.6167	278	Suspendida	Michoacán	0	0
16158	EL CAJON	18.9708	-102.75	296	Operando	Michoacán	0	0
16160	LAS CRUCES (CFE)	18.8144	-102.1075	180	Suspendida	Michoacán	0	0
16163	TUZANTLA (DGE)	19.2058	-100.5747	600	Suspendida	Michoacán	0	0
16164	URUAPAN (SMN)	19.4167	-102.0667	1634	Suspendida	Michoacán	0	0
16165	URUAPAN (CFE)	19.395	-102.0519	1611	Suspendida	Michoacán	0	0
16166	EL LLANO	20.0331	-102.3781	1561	Suspendida	Michoacán	0	0
16168	ARIO DE ROSALES	19.2	-101.7333	1840	Suspendida	Michoacán	0	0
16171	ZACAPU (SMN)	19.8167	-101.7833	1994	Suspendida	Michoacán	0	0
16186	EMILIANO ZAPATA	19.9919	-102.6186	1540	Suspendida	Michoacán	0	0
16187	E.T.A. 139 CARACUARO	19	-101.1167	604	Suspendida	Michoacán	0	0
16188	TIRINDARO	19.7667	-101.7417	2002	Suspendida	Michoacán	0	0
16189	C.R.E.D.F.F.A.	19.5333	-100.2333	3090	Suspendida	Michoacán	0	0
16190	ARCEO	18.72	-102.2689	320	Suspendida	Michoacán	0	0
16193	E.T.A. 036 LA HUACANA	18.9625	-101.8061	480	Suspendida	Michoacán	0	0
16203	ESCUELA SECUNDARIA FEDERAL	19.5083	-101.8583	1387	Suspendida	Michoacán	0	0
16206	SAN JOSE PURUA	19.4833	-100.4833	1572	Suspendida	Michoacán	0	0
16212	BARRANCA DE CUPATITZIO	19.4667	-102.0833	2078	Suspendida	Michoacán	0	0

Clave	Nombre	Latitud	Longitud	Altitud	Estatus	Estado	Thiessen-Voronoi	Distancia mínima
16213	IRIMBO	19.6992	-100.4783	2180	Operando	Michoacán	0	0
16216	BUENAVISTA II	19.2094	-102.5864	450	Suspendida	Michoacán	0	0
16222	LA RINCONADA	20.0433	-102.2872	1580	Suspendida	Michoacán	0	0
16223	LA ESPERANZA	20.0536	-102.4111	1550	Suspendida	Michoacán	0	0
16229	ADJUNTAS	19.9133	-102.2039	1680	Suspendida	Michoacán	0	0
16232	EL DEVANADOR	19.3842	-100.8247	1060	Operando	Michoacán	0	0
16235	HUAJUMBARO	19.6792	-100.7417	2285	Operando	Michoacán	0	0
16245	SAN CARLOS II	19.2417	-100.7897	651	Suspendida	Michoacán	0	0
16247	CAPULA	19.675	-101.3917	2097	Operando	Michoacán	0	0
16248	CAURIO DE GUADALUPE	19.9203	-101.8583	2064	Operando	Michoacán	0	0
16257	SANTA ISABEL DE AJUNO	19.5	-101.5833	2250	Suspendida	Michoacán	0	0
16259	TZINDIO	19.4031	-102.1089	1778	Suspendida	Michoacán	0	0
16260	POTURO (CFE)	18.8289	-101.6131	520	Suspendida	Michoacán	0	0
16265	RIO CELIO	19.9631	-102.3028	1578	Operando	Michoacán	0	0
16266	TANCITARO	19.3311	-102.3628	2063	Operando	Michoacán	0	0
16267	TAREJERO	19.8219	-101.7192	1987	Operando	Michoacán	0	0

Estaciones climáticas de APEAM cuyos datos fueron minados.

Estación	Latitud	Longitud	Cantidad de Incendios asociados	Método de asociación
Tingambato-La Escondida	-101.8523	19.47623	94	Thiessen-Voronoi
Tinguindin Ojo de Bagre	-102.42575	19.76023	84	Thiessen-Voronoi
Los Reyes Nte-Atapan	-102.43233	19.69047	79	Thiessen-Voronoi
Ario Nte-Ejido Ario	-101.70879	19.2407	64	Thiessen-Voronoi
S. Escalante Este-Cuitzitan	-101.65399	19.366	59	Thiessen-Voronoi
Turicato Sur-Lagunillas	-101.58286	19.02772	29	Thiessen-Voronoi
Uruapan Nte-Cherangueran	-102.08446	19.46231	21	Thiessen-Voronoi
Ziracuaretiro-San Angel Z.	-101.89667	19.46489	18	Thiessen-Voronoi
V. Madero Acuitzio-El Castillo	-101.30735	19.41476	12	Thiessen-Voronoi
Taretan-Meza de Cazares	-101.85633	19.3834	11	Thiessen-Voronoi
Tingambato Sur-Jujucato	-101.81006	19.40218	10	Thiessen-Voronoi
San Juan-El Volcan	-102.26917	19.53994	7	Thiessen-Voronoi
Tancítaro Sur-El Cuate	-102.27978	19.21399	5	Thiessen-Voronoi
Periban-Encino Gacho	-102.42245	19.49337	3	Thiessen-Voronoi
S. Escalante Oeste-La Cienega	-101.83905	19.36481	3	Thiessen-Voronoi
Uruapan Sur-Jucutacato	-102.07886	19.3636	3	Thiessen-Voronoi
S. Escalante Sur-Caratzitumbio	-101.73668	19.32908	2	Thiessen-Voronoi
Tacambaro Nte-Los Jacales	-101.48398	19.28962	2	Thiessen-Voronoi
Tacambaro Nte-El Durazno	-101.43938	19.29474	1	Thiessen-Voronoi
Tacambaro Oeste-Hoyo del Aire	-101.5595	19.25146	1	Thiessen-Voronoi
Tancítaro Sureste-Pucuaró	-102.27356	19.28212	1	Thiessen-Voronoi
Uruapan Nte-Nuevo Zirosto	-102.34009	19.56008	1	Thiessen-Voronoi
Uruapan Suroeste-Cutzato	-102.11407	19.36163	1	Thiessen-Voronoi

Valores de porosidad e hidrofobicidad en los 3 pisos de infiltración.

id	Sitio	Piso	Ks	α	Ks	N _{Macroporos}	N _{Mesoporos}	θ _{Macroporos}	θ _{Mesoporos}	PF	PF	PF
			ms^{-1}	m^{-1}	$mmhr^{-1}$	m^{-2}	m^{-2}	m^3/m^3	m^3/m^3	Macroporos	Mesoporos	Microporos
										%	%	%
2.0.0.Pin	Pinera Miguel	1	4.80E-07	3.1	1.73	0.13	1.87E+08	1.04E-07	0.015	6.6	93.25	0.11
4.0.0.Pin	Pinera Miguel	1	1.66E-06	8.0	5.96	1.11	5.80E+08	8.71E-07	0.046	16.1	83.93	0.01
1 ELLP4.0.0.Pin	Pinera Miguel	1	4.14E-06	49.6	14.90	11.41	5.84E+08	8.96E-06	0.046	66.1	33.86	0.02
3.1.2.Pin	Pinera Miguel	2	3.99E-07	1.0	1.43	0.04	1.45E+08	2.94E-08	0.011	2.3	87.51	10.23
F.1.5.Pin	Pinera Miguel	3	2.97E-06	4.7	10.69	1.20	1.12E+09	9.44E-07	0.088	9.7	90.28	0.01
1 ELLP7.2.5.Pin	Pinera Miguel	3	3.60E-06	5.6	12.96	1.73	1.33E+09	1.36E-06	0.104	11.5	88.48	0.01
2.2.0.Pin	Pinera Miguel	1	7.25E-07	2.9	2.61	0.18	2.83E+08	1.44E-07	0.022	6.1	93.75	0.20
3.2.5.Pin	Pinera Miguel	3	5.03E-07	6.9	1.81	0.29	1.81E+08	2.30E-07	0.014	13.9	86.05	0.01
F.0.0.Cru	Crucitas	1	4.41E-06	10.5	15.87	3.77	1.46E+09	2.96E-06	0.115	20.5	79.47	0.01
4.0.0.Cru	Crucitas	1	9.36E-07	5.7	3.37	0.45	3.45E+08	3.56E-07	0.027	11.6	88.39	0.01
2.0.0.Cru	Crucitas	1	4.88E-07	1.7	1.76	0.07	1.91E+08	5.89E-08	0.015	3.7	93.97	2.35
3.0.0.Cru	Crucitas	1	6.00E-07	2.1	2.16	0.11	2.36E+08	8.76E-08	0.019	4.5	94.49	1.05
7.0.5.Cru	Crucitas	3	6.28E-06	10.0	22.62	5.12	2.11E+09	4.02E-06	0.166	19.6	80.44	0.01
F.1.2.Cru	Crucitas	2	1.10E-05	16.9	39.51	14.09	3.17E+09	1.11E-05	0.249	30.8	69.20	0.02
4.1.5.Cru	Crucitas	3	3.26E-06	15.8	11.72	3.95	9.61E+08	3.11E-06	0.076	29.1	70.85	0.01
1 ELLP7.2.2.Cru	Crucitas	2	1.45E-06	1.8	5.23	0.23	5.71E+08	1.82E-07	0.045	3.8	94.16	2.01
3.1.2.Cru	Crucitas	2	7.09E-07	5.0	2.55	0.31	2.65E+08	2.41E-07	0.021	10.4	89.61	0.01
1 ELLP4.0.2.Cru	Crucitas	2	3.12E-06	12.2	11.21	3.04	9.94E+08	2.39E-06	0.078	23.4	76.56	0.01
F.2.5.Cru	Crucitas	3	1.82E-06	3.2	6.54	0.52	7.05E+08	4.05E-07	0.055	6.8	93.10	0.09

id	Sitio	Piso	Ks	α	Ks	N _{Macroporos}	N _{Mesoporos}	θ _{Macroporos}	θ _{Mesoporos}	PF	PF	PF
			ms^{-1}	m^{-1}	$mmhr^{-1}$	m^2	m^2	m^3/m^3	m^3/m^3	Macroporos	Mesoporos	Microporos
										%	%	%
4.2.2.Cru	Crucitas	2	1.02E-06	5.4	3.66	0.47	3.76E+08	3.71E-07	0.030	11.2	88.82	0.01
1.1.3.StR	Santa Rita	3	2.95E-06	4.7	10.60	1.19	1.11E+09	9.35E-07	0.087	9.7	90.30	0.01
2.1.0.StR	Santa Rita	1	1.71E-06	11.6	6.16	1.60	5.54E+08	1.25E-06	0.044	22.4	77.63	0.01
4.1.0.StR	Santa Rita	1	4.03E-06	9.3	14.49	3.09	1.37E+09	2.43E-06	0.108	18.4	81.59	0.01
4.2.0.StR	Santa Rita	1	1.46E-06	11.7	5.25	1.37	4.71E+08	1.08E-06	0.037	22.6	77.41	0.01
5.1.1.StR	Santa Rita	2	4.17E-06	9.8	15.00	3.35	1.40E+09	2.63E-06	0.110	19.3	80.69	0.01
7.1.0.StR	Santa Rita	1	7.45E-07	6.5	2.68	0.41	2.69E+08	3.23E-07	0.021	13.3	86.74	0.01
7.1.1.StR	Santa Rita	2	7.10E-07	4.1	2.55	0.34	2.62E+08	2.67E-07	0.021	11.5	88.48	0.01
9.1.0.StR	Santa Rita	1	6.75E-06	44.8	24.31	17.56	1.06E+09	1.38E-05	0.083	62.4	37.62	0.02
1 ELLP7.1.1.StR	Santa Rita	2	2.03E-06	10.9	7.30	2.34	6.12E+08	1.84E-06	0.048	27.7	72.32	0.01
1 ELLP7.1.3.StR	Santa Rita	3	8.76E-06	27.7	31.54	16.55	2.00E+09	1.30E-05	0.157	45.3	54.68	0.02
A.1.1.StR	Santa Rita	2	1.49E-06	6.3	5.35	1.06	5.14E+08	8.33E-07	0.040	17.1	82.89	0.01
A.1.3.StR	Santa Rita	3	5.90E-06	10.9	21.23	5.19	1.94E+09	4.07E-06	0.152	21.1	78.89	0.01
B.1.1.StR	Santa Rita	2	2.39E-06	5.0	8.62	1.03	8.95E+08	8.11E-07	0.070	10.4	89.64	0.01
B.1.3.StR	Santa Rita	3	1.13E-06	2.5	4.05	0.25	4.42E+08	1.97E-07	0.035	5.3	94.24	0.41
DIPER .1.3.StR	Santa Rita	3	7.24E-06	13.2	26.05	7.54	2.26E+09	5.92E-06	0.178	25.0	74.99	0.01
7.0.0.Yac	La Yácata	1	3.49E-06	15.9	12.57	4.27	1.03E+09	3.35E-06	0.081	29.3	70.67	0.01
B.0.0.Yac	La Yácata	1	6.25E-07	3.5	2.25	0.19	2.41E+08	1.51E-07	0.019	7.4	92.58	0.05
4.0.0.Yac	La Yácata	1	8.21E-06	43.9	29.57	21.10	1.31E+09	1.66E-05	0.103	61.6	38.36	0.02
4.1.1.Yac	La Yácata	2	1.53E-05	62.0	54.93	47.17	1.64E+09	3.70E-05	0.129	74.1	25.83	0.02
7.1.1.Yac	La Yácata	2	2.22E-06	13.0	7.98	2.28	6.96E+08	1.79E-06	0.055	24.7	75.33	0.01

id	Sitio	Piso	Ks	α	Ks	N _{Macroporos}	N _{Mesoporos}	θ _{Macroporos}	θ _{Mesoporos}	PF	PF	PF
			ms^{-1}	m^{-1}	$mmhr^{-1}$	m^2	m^2	m^3/m^3	m^3/m^3	Macroporos	Mesoporos	Microporos
										%	%	%
B.1.1.Yac	La Yácata	2	3.80E-06	14.0	13.69	4.16	1.17E+09	3.27E-06	0.092	26.3	73.73	0.01
9.0.0.Yac	La Yácata	1	2.34E-06	21.5	8.43	3.65	6.11E+08	2.87E-06	0.048	37.4	62.59	0.02
5.0.0.Yac	La Yácata	1	1.65E-05	73.3	59.57	55.03	1.39E+09	4.32E-05	0.110	79.8	20.22	0.02
1.0.1.Yac	La Yácata	2	1.01E-06	6.8	3.62	0.57	3.62E+08	4.52E-07	0.028	13.7	86.29	0.01
9.1.2.Yac	La Yácata	2	3.26E-06	18.3	11.75	4.49	9.12E+08	3.52E-06	0.072	33.0	67.01	0.02
5.1.5.Yac	La Yácata	3	6.15E-06	10.1	22.12	5.08	2.05E+09	3.99E-06	0.161	19.8	80.14	0.01
E.0.5.Yac	La Yácata	3	3.07E-06	7.3	11.05	1.88	1.09E+09	1.48E-06	0.086	14.7	85.29	0.01
5.2.5.Yac	La Yácata	3	2.60E-06	8.3	9.37	1.79	9.06E+08	1.41E-06	0.071	16.5	83.47	0.01

Ficha técnica de Santa Rita.

Perfil: 1

Santa Rita

Descrito por Olivares Martínez, Luis Daniel

17/06/2019



Condiciones meteorológicas: Parcialmente nublado

Temperatura:

Coordenadas: 19°23.504", -101°42.527" Datum: WGS84

Ubicado en un paisaje de Domo en Domos y valles volcánicos.

Altitud: msnm Exposición de ladera: 70°

Pendiente: 19°, simple con forma vertical recta y lateral convexa

Posición en ladera: ladera media Complejidad de la pendiente: simple

Estado de humedad: Fresco Cobertura y uso: Bosque de pino

Drenaje del sitio: Alto Característica antrópica: quema y desmonte

Degradación: Hídrica laminar ligero en un 80 del terreno con una tasa positiva

Material parental: tefra, ceniza y escoria volcánica WRB 2015: **Andosol**

Ah

De 0 a 3 cm.

Horizonte Franco de color gris muy oscuro (5 YR 3/1) cuando está seco y negro (5 YR 2.5/1) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.5 g·cm⁻³, un 18.72% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 1500 µS/m y un pH de 5.74 (en potenciómetro).

Estructura de grado alto, los agregados en migajón de 0.3 cm; raíces finas comunes y raíces gruesas pocas; poros comunes, comunes de tamaños muy finos, finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

Presencia de carbón de 2 cm y negro en un 2% del perfil; húmedo (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte abrupta y recta.

2AB

De 3 a 25 cm.

Horizonte Franco de color marrón (7.5 YR 4/4) cuando está seco y marrón muy oscuro (7.5 YR 2.5/3) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.5 g·cm⁻³, un 7.18% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 264 μS/m y un pH de 6.01 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en bloques subangulares de 2 cm; raíces finas comunes y raíces gruesas comunes; poros comunes, pocos de tamaños muy finos, finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

Húmedo (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte clara y recta.

3ABb

De 25 a 55 cm.

Horizonte Franco de color marrón (7.5 YR 5/4) cuando está seco y marrón muy oscuro (7.5 YR 3/3) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.5 g·cm⁻³, un 4.29% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 170 μS/m y un pH de 6.03 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en granular de 4 cm; raíces finas pocas y raíces gruesas comunes; poros muy pocos, muy pocos de tamaños muy finos, finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

Fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte gradual y recta.

3BCw

De 55 a 70 cm.

Horizonte Franco Limoso de color marrón (7.5 YR 5/4) cuando está seco y marrón muy oscuro (7.5 YR 3/4) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.6 g·cm⁻³, un 3.90% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 208 μS/m y un pH de 6.05 (en potenciómetro).

Estructura de grado bajo, los agregados en bloques subangulares de 2 cm; raíces finas comunes y raíces gruesas comunes; poros pocos, pocos, comunes de tamaños muy finos, finos, grandes con formas tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente.

Presencia de vidrios volcánicos en un 1% de los agregados; fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte gradual y ondulada.

3CBw

De 70 a 95 cm.

Horizonte Franco de color marrón fuerte (7.5 YR 5/6) cuando está seco y marrón muy oscuro (7.5 YR 3/4) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.6 g·cm⁻³, un 3.12% de carbono orgánico, una

conductividad eléctrica de 201 $\mu\text{S/m}$ y un pH de 5.89 (en potenciómetro).

Estructura de grado bajo, los agregados en bloques subangulares de 3 cm; raíces finas muy pocas y raíces gruesas comunes; poros comunes, pocos de tamaños finos, muy finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

Presencia de vidrios volcánicos en un 1% de los agregados; fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte abrupto y ondulado.

4Btb

De 95 a 105 cm.

Horizonte Franco Limoso de color marrón fuerte (7.5 YR 4/6) cuando está seco y marrón muy oscuro (5 YR 3/4) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.7 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, un 2.34% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 190 $\mu\text{S/m}$ y un pH de 5.87 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en bloques subangulares de 4 cm; raíces finas muy pocas y raíces gruesas comunes; poros comunes de tamaños muy finos con formas tubulares, respectivamente.

Motas en un 5%, de 1 mm con color negro y forma cara de peds al cara de peds. También se presentan motas de forma circular; **presencia de cutanes en un 3% de los agregados**, conformados de arcilla de color marrón dentro de poros con un límite claro; fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte gradual y recta.

4Bt

De 105 a 120 cm.

Horizonte Franco Arcilloso de color marrón rojizo (5 YR 4/4) cuando está seco y marrón muy oscuro (5 YR 3/4) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.9 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, un 2.34% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 230 $\mu\text{S/m}$ y un pH de 5.83 (en potenciómetro).

Estructura de grado alto, los agregados en bloques angulares de 5 cm; raíces finas muy pocas y raíces gruesas pocas; poros pocos, comunes de tamaños finos, muy finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

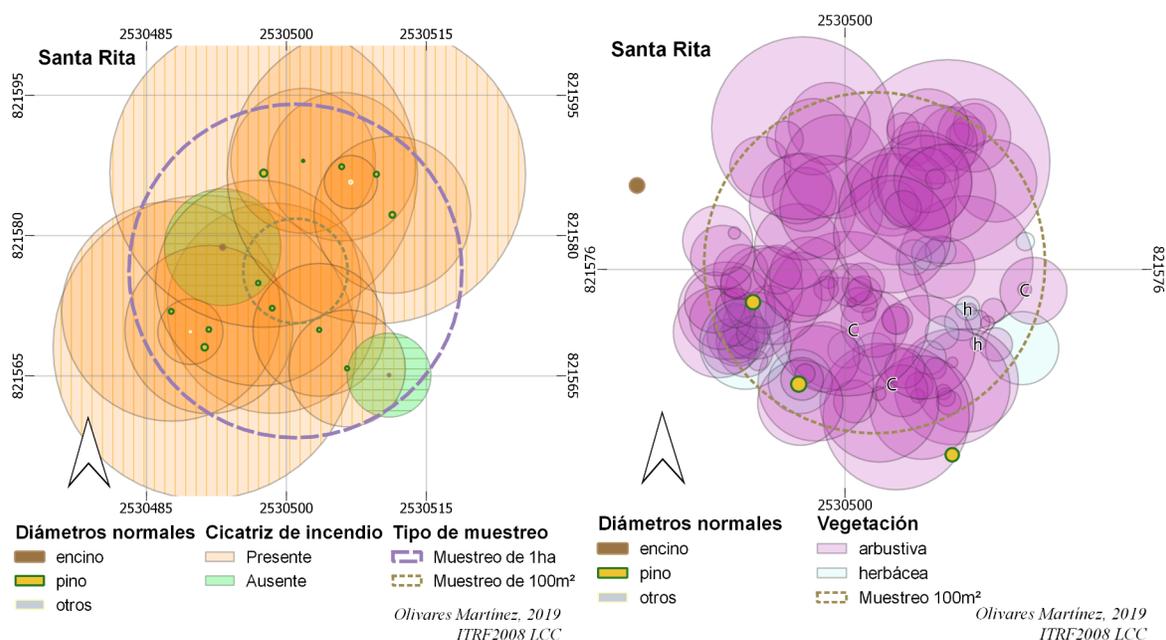
Motas en un 2%, de 1.5 mm con color negro y forma interior de peds al interior de peds. También se presentan motas de forma circular; **presencia de cutanes en un 7% de los agregados**, conformados de arcilla de color marrón dentro de poros con un límite claro; fresco (humedad); con propiedades ándicas.

Sitio	Horizonte	Lim. i. cm	pH	CE mS	da g/cm^3	dr g/cm^3	COS kg/m^2	MO %	Clase textural
1	Oa/A	3	5.7	1.5	0.5	1.8	2.9	32.3	Franco
1	2AB	25	6.0	0.3	0.5	2.1	8.6	12.4	Franco
1	3ABb	55	6.0	0.2	0.5	2.1	6.6	7.4	Franco

Sitio	Horizonte	Lim. i. cm	pH	CE mS	da g/cm ³	dr g/cm ³	COS kg/m ²	MO %	Clase textural
1	3BCw	70	6.1	0.2	0.6	2.1	3.2	6.7	Franco Limoso
1	3CBw	95	5.9	0.2	0.6	2.1	4.4	5.4	Franco
1	4Btb	105	5.9	0.2	0.7	2.3	1.7	4.0	Franco Limoso
1	4Bt	120	5.8	0.2	0.9	2.3	3.3	4.0	Franco Arcilloso

Vegetación en Santa Rita

Los árboles de este sitio cuentan con una altura promedio de 12.91 m que cubren un 98.1% del dosel y tienen una densidad de **440 árboles por hectárea**. Los pinos presentan un diámetro normal de 46.93, el resto de especies arbóreas son latifoliadas con un diámetro normal de 27.28. La dominancia de Simpson en los árboles es de $D=0.27$.



Distribución de los árboles y sus copas (izquierda) y estratos inferiores con diámetros normales de árboles (derecha).

Los arbustos muestran una altura media de 1.54 m, cubriendo un 96.6% de la superficie de muestreo. Su índice de dominancia es de $D=0.33$. Las herbáceas cubren 20.2% de los 100m², presentan una altura media de 1.87 m y un índice de $D=0.29$. La densidad de arbustos y árboles es de 21100 individuos por hectárea.

La diversidad de Shannon de todas las especies vegetales del sitio es de $H=2.27$.

Ficha técnica de La Yácata.

Perfil: 2

Santa Rita La Yácata

Descrito por Olivares Martínez, Luis Daniel

04/07/2019



Condiciones meteorológicas: Parcialmente nublado

Temperatura:

Coordenadas: 19°23.532", -101°43.638" Datum: WGS84

Ubicado en un paisaje de Domo en Domos y valles volcánicos.

Altitud: msnm Exposición de ladera: 115°

Pendiente: 23°, simple con forma vertical convexa y lateral convexa

Posición en ladera: hombro de ladera Complejidad de la pendiente: simple

Estado de humedad: Fresco Cobertura y uso: Bosque de pino encino

Drenaje del sitio: Alto Característica antrópica: quema agrícola

Degradación: NA NA en un 0 del terreno con una tasa NA

Material parental: ceniza y bombas WRB 2015: **Andosol**

Oi

De 0 a 2 cm.

Horizonte - de color gris muy oscuro (7.5 YR 3/1) cuando está seco y negro (7.5 YR 2.5/1) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.5 g·cm⁻³, un 70.00% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de - μS/m y un pH de - (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en migajón de 0.2 cm; poros abundantes, abundantes de tamaños muy finos, finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

Presencia de carbón de 0.2 cm y negro en un 10% del perfil; fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte clara y recta.

Oe

De 2 a 2.5 cm.

Horizonte - de color marrón (7.5 YR 3/1) cuando está seco y negro (7.5 YR 2.5/1) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.5 g·cm⁻³, un 60.00% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de - μS/m y un pH de - (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en migajón de 0.2 cm; poros abundantes, abundantes de tamaños muy finos, finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

Presencia de carbón de 0.3 cm y negro en un 5% del perfil; fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte abrupta y recta.

Oa/A

De 2.5 a 4 cm.

Horizonte Franco Arenoso de color marrón (7.5 YR 3/1) cuando está seco y negro (7.5 YR 2.5/1) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.6 g·cm⁻³, un 18.33% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 1002 μS/m y un pH de 6.2 (en potenciómetro).

Estructura de grado alto, los agregados en migajón de 0.2 cm; raíces finas muy pocas y raíces gruesas abundantes; poros abundantes, abundantes de tamaños muy finos, finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

Presencia de carbón de 0.5 cm y negro en un 15% del perfil; fresco (humedad); con propiedades ándicas; presencia de Se ve como tierra revuelta y con un límite con el siguiente horizonte abrupta y recta.

2Ah

De 4 a 32 cm.

Horizonte Franco de color marrón (7.5 YR 4/2) cuando está seco y marrón muy oscuro (7.5 YR 2.5/2) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.5 g·cm⁻³, un 7.02% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 293 μS/m y un pH de 5.8 (en potenciómetro).

Estructura de grado alto, los agregados en bloques subangulares de 3 cm; raíces finas abundantes y raíces gruesas abundantes; poros comunes, comunes de tamaños muy finos, finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

Presencia de carbón de 1 cm y negro en un 5% del perfil; fresco (humedad); con propiedades ándicas; presencia de carbones hasta 15 cm y con un límite con el siguiente horizonte clara y recta.

2Bw

De 32 a 53 cm.

Horizonte Franco de color marrón (7.5 YR 4/3) cuando está seco y marrón muy oscuro (7.5 YR 2.5/2) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.5 g·cm⁻³, un 6.71% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 258 µS/m y un pH de 5.94 (en potenciómetro).

Estructura de grado bajo, los agregados en bloques subangulares de 4 cm; raíces finas comunes y raíces gruesas abundantes; poros abundantes, comunes, comunes de tamaños finos, muy finos, medianos con formas tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente.

Fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte gradual y recta.

2C

De 53 a 88 cm.

Horizonte Franco de color marrón (7.5 YR 4/2) cuando está seco y marrón muy oscuro (7.5 YR 2.5/2) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.6 g·cm⁻³, un 5.46% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 160 µS/m y un pH de 5.75 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en bloques angulares de 4 cm; raíces finas pocas y raíces gruesas abundantes; poros pocos, comunes, muy pocos de tamaños muy finos, finos, medianos con formas tubulares, vesiculares, tubulares, respectivamente.

Concentraciones en un 5%, de 2 mm con color naranja y forma interior de peds al interior de peds. También se presentan concentraciones de forma irregular; fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte gradual y ondulada.

3CBb

De 88 a 110 cm.

Horizonte Franco de color marrón (7.5 YR 4/3) cuando está seco y marrón muy oscuro (7.5 YR 2.5/2) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.5 g·cm⁻³, un 5.15% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 180 µS/m y un pH de 5.77 (en potenciómetro).

Estructura de grado bajo, los agregados en bloques subangulares de 5 cm; raíces finas muy pocas y raíces gruesas comunes; poros comunes, pocos de tamaños finos, muy finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

Fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte clara y recta.

3C

De 110 a 120 cm.

Horizonte Franco Arenoso de color marrón (10 YR 4/3) cuando está seco y marrón muy oscuro (10 YR 2/2) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.4 g·cm⁻³, un 4.91% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 97 µS/m y un pH de 5.96 (en potenciómetro).

Estructura de grado alto, los agregados en bloques angulares de 4 cm; raíces finas muy pocas y raíces

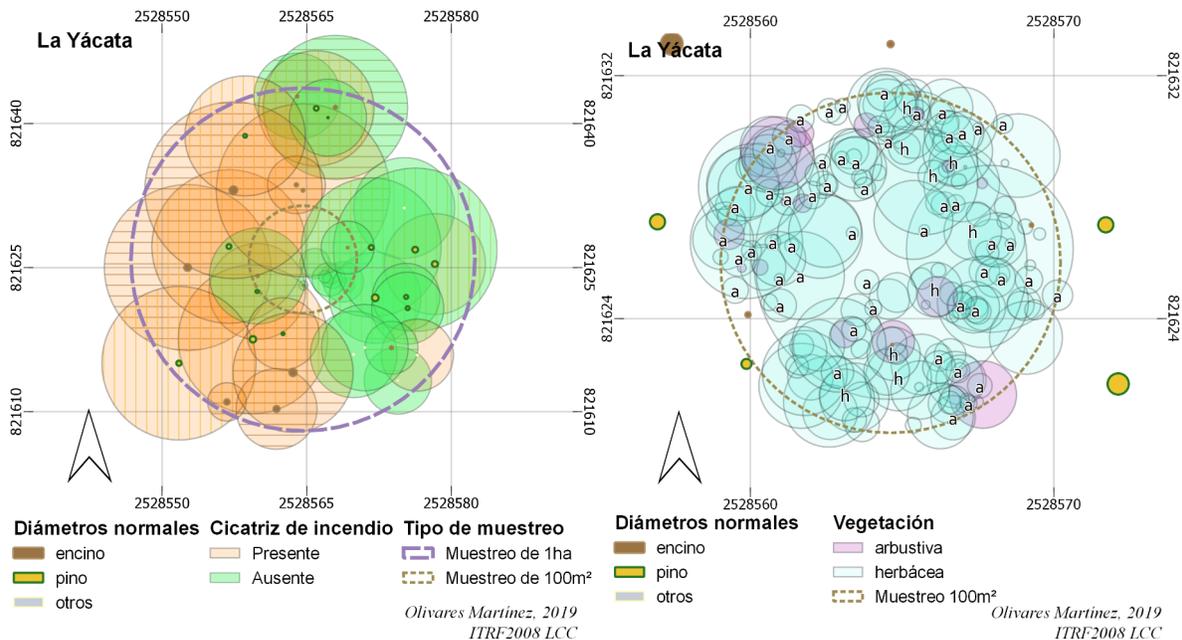
gruesas pocas; poros pocos, muy pocos de tamaños finos, muy finos con formas tubulares, tubulares, respectivamente.

Concentraciones en un 10%, de 3 mm con color naranja y forma interior de peds al interior de peds. También se presentan concentraciones de forma irregular; fresco (humedad); con propiedades ándicas; presencia de regolito muy intemperizado.

Sitio	Horizonte	Lim. i. <i>cm</i>	pH	CE <i>mS</i>	da <i>g/cm³</i>	dr <i>g/cm³</i>	COS <i>kg/m²</i>	MO <i>%</i>	Clase textural
2	Oi	2	-	-	0.5	-	6.0	100.0*	-
2	Oe	2.5	-	-	0.5	-	1.4	100.0*	-
2	Oa/A	4	6.2	1.0	0.6	1.9	1.4	31.6	Franco Arenoso
2	2Ah	32	5.8	0.3	0.5	1.9	9.1	12.1	Franco
2	2Bw	53	5.9	0.3	0.5	2.1	7.4	11.6	Franco
2	2C	88	5.8	0.2	0.6	2.1	11.1	9.4	Franco
2	3CBb	110	5.8	0.2	0.5	1.9	5.6	8.9	Franco
2	3C	120	6.0	0.1	0.4	2.1	2.2	8.5	Franco Arenoso

Vegetación en La Yácata

Los árboles de este sitio cuentan con una altura promedio de 21.97 m que cubren un 97.3% del dosel y tienen una densidad de **170 árboles por hectárea**. Los pinos presentan un diámetro normal de 50.13, el resto de especies arbóreas son latifoliadas con un diámetro normal de 30.75. La dominancia de Simpson en los árboles es de $D=0.61$.



Distribución de los árboles y sus copas (izquierda) y estratos inferiores con diámetros normales de árboles (derecha).

Los arbustos muestran una altura media de 2.22 m, cubriendo un 11.5% de la superficie de muestreo. Su índice de dominancia es de $D=0.3$. Las herbáceas cubren 94.4% de los 100m², presentan una altura media de 1.26 m y un índice de $D=0.26$. La densidad de arbustos y árboles es de 11900 individuos por hectárea.

La diversidad de Shannon de todas las especies vegetales del sitio es de $H=02.05$.

Ficha técnica de Pinera Miguel.

Perfil: 3

Pinera Miguel

Descrito por Olivares Martínez, Luis Daniel

18/07/2019



Condiciones meteorológicas: Nublado Temperatura:
Coordenadas: 19°23.281", -102°13.234" Datum: WGS84

Ubicado en un paisaje de Domo en Domos y valles volcánicos.
Altitud: msnm Exposición de ladera: 112°
Pendiente: 24°, simple con forma vertical recta y lateral convexa
Posición en ladera: ladera media Complejidad de la pendiente:
simple
Estado de humedad: Húmedo Cobertura y uso: Bosque de pino
encino / resinación
Drenaje del sitio: Alto Característica antrópica: resinación
Degradación: NA NA en un 0 del terreno con una tasa NA
Material parental: cenizas y escoria volcánica WRB 2015: **Andosol**

Oe

De 0 a 4 cm.

Horizonte - de color gris muy oscuro (7.5 YR 3/1) cuando está seco y negro (7.5 YR 2.5/1) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.6 g-cm⁻³, un 80.00% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de - μS/m y un pH de - (en potenciómetro).

Estructura de grado bajo, los agregados en migajón de 0.2 cm; raíces finas muy pocas y raíces gruesas nulas; poros abundantes de tamaños muy finos con formas tubulares, respectivamente.

Presencia de carbón de 0.5 cm y negro en un 10% del perfil; húmedo (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte abrupta y ondulada.

Oa

De 4 a 12 cm.

Horizonte Franco Arenoso de color gris muy oscuro (7.5 YR 3/1) cuando está seco y negro (7.5 YR 2.5/1) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.4 g·cm⁻³, un 19.50% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 1630 μS/m y un pH de 5.32 (en potenciómetro).

Estructura de grado alto, los agregados en migajón de 0.2 cm; raíces finas comunes y raíces gruesas abundantes; poros abundantes, abundantes, abundantes de tamaños muy finos, finos, medianos con formas tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente.

Presencia de carbón de 1.5 cm y negro en un 10% del perfil; húmedo (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte abrupta y ondulada.

Ah

De 12 a 22 cm.

Horizonte Franco Arenoso de color gris oscuro (7.5 YR 4/1) cuando está seco y negro (7.5 YR 2.5/1) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.9 g·cm⁻³, un 5.77% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 451 μS/m y un pH de 5.62 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en bloques angulares de 3 cm; raíces finas abundantes y raíces gruesas muy pocas; poros comunes, comunes, comunes de tamaños finos, muy finos, medianos con formas tubulares, tubulares, vesiculares, respectivamente.

Presencia de carbón de 0.7 cm y negro en un 5% del perfil; húmedo (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte abrupta y recta.

2Bw1

De 22 a 50 cm.

Horizonte Franco Arenoso de color marrón (7.5 YR 5/4) cuando está seco y marrón muy oscuro (7.5 YR 2.5/3) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.6 g·cm⁻³, un 4.45% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 232 μS/m y un pH de 5.99 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en bloques subangulares de 4 cm; raíces finas comunes y raíces gruesas comunes; poros comunes, comunes, comunes de tamaños medianos, muy finos, finos con formas tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente; fragmentos gruesos a manera de volcánico en un 5% con un tamaño promedio de 5.

Húmedo (humedad); con propiedades ándicas; presencia de algunas raíces recubiertas de carbón (3%) y con un límite con el siguiente horizonte clara y recta.

2Bw2

De 50 a 78 cm.

Horizonte Franco de color marrón amarillento (10 YR 5/4) cuando está seco y marrón muy oscuro (10 YR 2/2) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.6 g·cm⁻³, un 4.21% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 217 µS/m y un pH de 6.05 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en bloques subangulares de 3 cm; raíces finas abundantes y raíces gruesas muy pocas; poros comunes, comunes, comunes de tamaños medianos, muy finos, finos con formas tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente; fragmentos gruesos a manera de volcánico en un 5% con un tamaño promedio de 5.

Húmedo (humedad); con propiedades ándicas; presencia de algunas raíces recubiertas de carbón (3%) y con un límite con el siguiente horizonte clara y recta.

2BCt

De 78 a 120 cm.

Horizonte Franco de color marrón amarillento (10 YR 5/4) cuando está seco y marrón oscuro (7.5 YR 3/3) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.6 g·cm⁻³, un 3.90% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 161 µS/m y un pH de 6.1 (en potenciómetro).

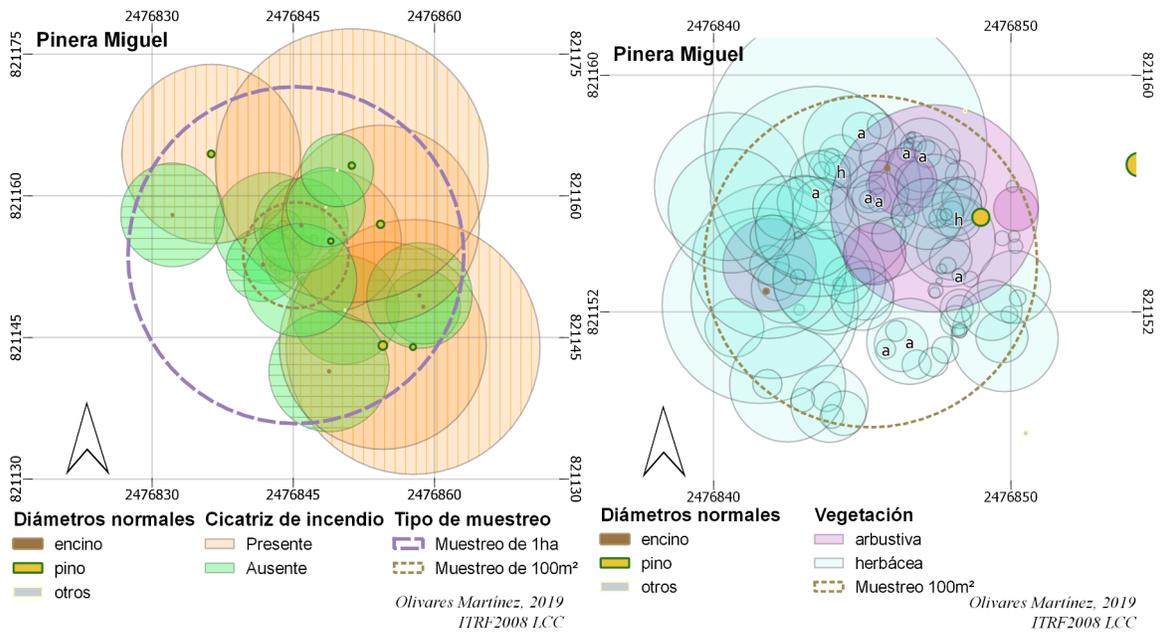
Estructura de grado alto, los agregados en bloques angulares de 5 cm; raíces finas pocas y raíces gruesas muy pocas; poros pocos, pocos, pocos de tamaños grandes, medianos, muy finos con formas Tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente; fragmentos gruesos a manera de volcánico en un 5% con un tamaño promedio de 5.

Concentraciones en un 3%, de 1 mm con color marrón y forma interior de peds al interior de peds. También se presentan concentraciones de forma circular; húmedo (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte gradual y recta.

Sitio	Horizonte	Lim. i. cm	pH	CE mS	da g/cm ³	dr g/cm ³	COS kg/m ²	MO %	Clase textural
3	Oe	4	-	-	0.6	-	16.4	100.0*	-
3	Oa	12	5.3	1.6	0.4	1.9	5.9	33.6	Franco Arenoso
3	Ah	22	5.6	0.5	0.9	2.5	4.7	10.0	Franco Arenoso
3	2Bw1	50	6.0	0.2	0.6	2.1	7.7	7.7	Franco Arenoso
3	2Bw2	78	6.1	0.2	0.6	1.9	6.3	7.3	Franco
3	2BCt	120	6.1	0.2	0.6	1.9	8.7	6.7	Franco

Vegetación en Pinera Miguel

Los árboles de este sitio cuentan con una altura promedio de 11.53 m que cubren un 81.3% del dosel y tienen una densidad de **290 árboles por hectárea**. Los pinos presentan un diámetro normal de 74.86, el resto de especies arbóreas son latifoliadas con un diámetro normal de 13.79. La dominancia de Simpson en los árboles es de $D=0.2$.



Distribución de los árboles (izquierda) y estratos inferiores (derecha).

Los arbustos muestran una altura media de 1.16 m, cubriendo un 43.5% de la superficie de muestreo. Su índice de dominancia es de $D=0.28$. Las herbáceas cubren 88.0% de los 100m², presentan una altura media de 1.23 m y un índice de $D=0.15$. La densidad de arbustos y árboles es de 11500 individuos por hectárea.

La diversidad de Shannon de todas las especies vegetales del sitio es de $H=2.7$.

Ficha técnica de Crucitas.

Perfil: 4

Crucitas

Descrito por Olivares Martínez, Luis Daniel

19/07/2019



Condiciones meteorológicas: Nublado Temperatura:
Coordenadas: 19°21.636", -102°14.401" Datum: WGS84

Ubicado en un paisaje de Valle en Domos y valles volcánicos.

Altitud: msnm Exposición de ladera: 204°

Pendiente: 27°, simple con forma vertical recta y lateral recta

Posición en ladera: hombro de ladera Complejidad de la
pendiente: simple

Estado de humedad: Fresco Cobertura y uso: Bosque de pino
encino /

Drenaje del sitio: Alto Característica antrópica: huertas

Degradación: Hídrica laminar moderado en un 100 del terreno con una tasa positiva

Material parental: tefra, ceniza y escoria volcánica WRB 2015: **Andic Alisol**

A

De 0 a 19.5 cm.

Horizonte Franco Limoso de color marrón amarillento (10 YR 5/6) cuando está seco y marrón amarillento oscuro (10 YR 3/6) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.7 g·cm⁻³, un 6.08% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 110 μS/m y un pH de 5.7 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en bloques angulares de 3 cm; raíces finas abundantes y raíces gruesas comunes; poros comunes, comunes, comunes, comunes, comunes de tamaños medianos, grandes, finos, muy finos con formas tubulares, tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente.

Presencia de carbón de 0.5 cm y negro en un 3% del perfil; fresco (humedad); con propiedades ándicas; presencia de Revuelto con huinumo y con un límite con el siguiente horizonte clara y irregular.

2Ab

De 19.5 a 42 cm.

Horizonte Franco Limoso de color marrón amarillento (10 YR 5/6) cuando está seco y marrón amarillento oscuro (10 YR 3/6) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.7 g·cm⁻³, un 5.46% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 81 μS/m y un pH de 5.73 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en bloques subangulares de 2 cm; raíces finas comunes y raíces gruesas comunes; poros comunes, comunes, comunes, comunes de tamaños medianos, grandes, finos, muy finos con formas tubulares, tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente.

Fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte difusa y ondulada.

2Bw

De 42 a 61 cm.

Horizonte Franco Limoso de color marrón fuerte (7.5 YR 5/6) cuando está seco y marrón oscuro (7.5 YR 3/3) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.7 g·cm⁻³, un 4.37% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 90 μS/m y un pH de 5.76 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en bloques angulares de 2 cm; raíces finas pocas y raíces gruesas pocas; poros comunes, comunes, comunes de tamaños medianos, finos, muy finos con formas tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente.

Fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte gradual e irregular.

2Bt

De 61 a 79 cm.

Horizonte Franco limoso arcilloso de color marrón amarillento (10 YR 5/4) cuando está seco y marrón oscuro (7.5 YR 3/3) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.8 g·cm⁻³, un 3.59% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 340 μS/m y un pH de 5.73 (en potenciómetro).

Estructura de grado medio, los agregados en bloques angulares de 1.5 cm; raíces finas pocas y raíces gruesas muy pocas; poros comunes, comunes, comunes de tamaños muy finos, finos, medianos con formas tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente; fragmentos gruesos a manera de volcánico en un 15% con un tamaño promedio de 0.2.

Presencia de cutanes en un 5% de los agregados, conformados de arcilla de color marrón dentro de poros con un límite claro; fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte clara y recta.

2Btg1

De 79 a 106 cm.

Horizonte Arcilloso de color marrón amarillento (10 YR 5/4) cuando está seco y marrón muy oscuro (7.5 YR 2.5/3) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 0.9 g·cm⁻³, un 2.34% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 215 µS/m y un pH de 5.71 (en potenciómetro).

Estructura de grado alto, los agregados en bloques angulares de 3 cm; raíces finas muy pocas y raíces gruesas muy pocas; poros comunes, comunes, comunes, comunes de tamaños medianos, muy finos, finos, grandes con formas tubulares, tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente; fragmentos gruesos a manera de volcánico en un 10% con un tamaño promedio de 0.2.

Reductimorfismo en forma de reducción ocupando 2 mm con manganeso en forma vesicular de color negro; **presencia de cutanes en un 25% de los agregados**, conformados de arcilla de color marrón dentro de poros, cara con un límite claro; fresco (humedad); con propiedades ándicas; con un límite con el siguiente horizonte gradual y recta.

2Btg2

De 106 a 120 cm.

Horizonte Arcilloso de color marrón amarillento (10 YR 5/4) cuando está seco y marrón oscuro (7.5 YR 3/3) en húmedo. Presenta una densidad aparente de 1.0 g·cm⁻³, un 2.18% de carbono orgánico, una conductividad eléctrica de 149 µS/m y un pH de 5.93 (en potenciómetro).

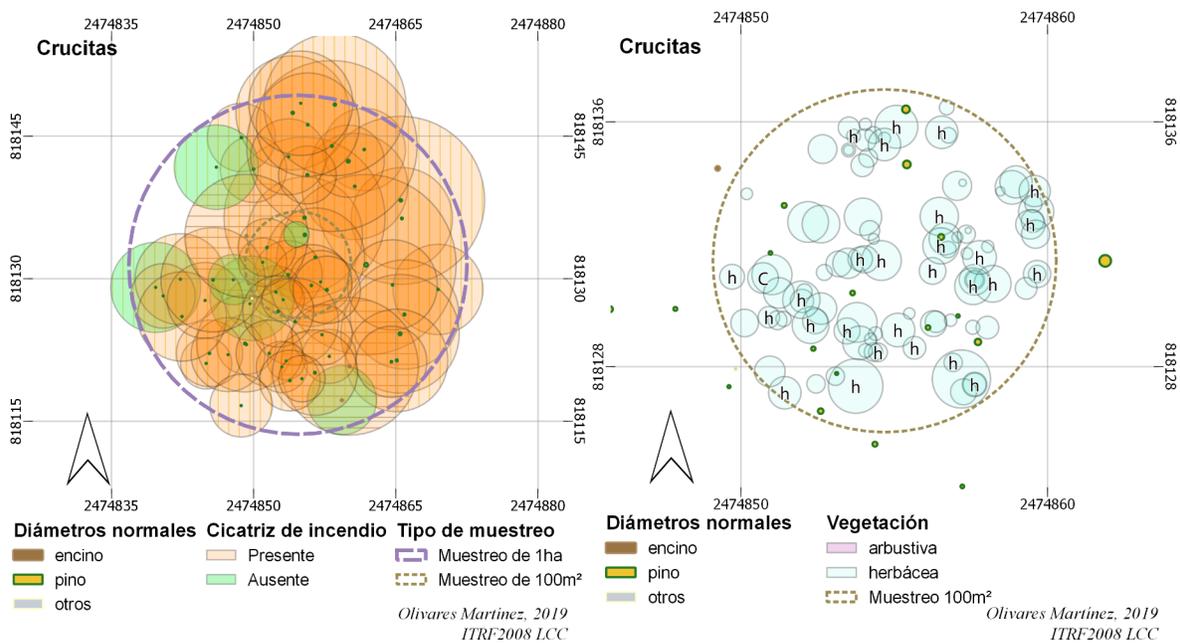
Estructura de grado medio, los agregados en bloques subangulares de 3 cm; poros comunes, comunes, comunes, comunes de tamaños muy finos, finos, medianos, grandes con formas tubulares, tubulares, tubulares, tubulares, respectivamente; fragmentos gruesos a manera de volcánico en un 10% con un tamaño promedio de 0.2.

Reductimorfismo en forma de reducción ocupando 4 mm con manganeso en forma vesicular de color negro; **presencia de cutanes en un 30% de los agregados**, conformados de arcilla de color marrón dentro de poros, cara con un límite claro; fresco (humedad); con propiedades ándicas.

Sitio	Horizonte	Lim. i. cm	pH	CE mS	da g/cm ³	dr g/cm ³	COS kg/m ²	MO %	Clase textural
4	A	19.5	5.7	0.1	0.7	2.1	7.8	10.5	Franco Limoso
4	2Ab	42	5.7	0.1	0.7	2.1	8.2	9.4	Franco Limoso
4	2Bw	61	5.8	0.1	0.7	2.1	5.7	7.5	Franco Limoso
4	2Bt	79	5.7	0.3	0.8	2.3	4.5	6.2	Franco limoso arcilloso
4	2Btg1	106	5.7	0.2	0.9	2.3	5.4	4.0	Arcilloso
4	2Btg2	120	5.9	0.1	1.0	2.5	2.8	3.8	Arcilloso

Vegetación en Crucitas

Los árboles de este sitio cuentan con una altura promedio de 13.51 m que cubren un 94.7% del dosel y tienen una densidad de **620 árboles por hectárea**. Los pinos presentan un diámetro normal de 17, el resto de especies arbóreas son latifoliadas con un diámetro normal de 13.06. La dominancia de Simpson en los árboles es de $D=0.85$.



Distribución de los árboles (izquierda) y estratos inferiores (derecha).

No se encontraron arbustos dentro de la superficie de muestreo. Las herbáceas cubren 39.5% de los 100m², presentan una altura media de 0.73 m y un índice de $D=0.27$. La densidad de arbustos y árboles es de 9800 individuos por hectárea.

La diversidad de Shannon de todas las especies vegetales del sitio es de $H=1.78$.