



Universidad Autónoma del
Estado de México



Facultad de Planeación Urbana y Regional

Tesis:

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales
por medio de teledetección y sistemas de información
geográfica en la subcuenca "Rio Verdiguél"

Presenta:

Pedro Antonio Alarcón Fabela

Que para obtener el grado de:

Licenciado en Ciencias Ambientales

Director de tesis:

M. En C.A. Isidro Colindres Jardón

Toluca de Lerdo, Estado de México, 30 de agosto del 2024

Índice

Resumen	12
Introducción	13
Planteamiento del problema	15
Objetivo general	16
Objetivos específicos	16
Justificación	17
Capítulo 1. Marco teórico-conceptual	19
1.1. . Incendio forestal	19
1.2. Tipos de incendios forestales	20
1.2.1. Superficiales.....	20
1.2.2. Subterráneo	20
1.2.3. De copa o aéreos.....	21
1.3. Efectos de primer y segundo orden de los incendios forestales	21
1.4. El triángulo del fuego	21
1.5. Causas de origen de incendios forestales	22
1.6. Causas principales de incendios forestales	23
1.7. Causas de los incendios forestales	23
1.8. Variables de un incendio forestal.....	25
1.8.1. Meteorología	25
1.8.1.1. Temperatura.....	25
1.8.1.2. Humedad	26
1.8.1.3. Viento.....	26

1.8.1.4. Precipitación.....	27
1.8.2. Topografía.....	27
1.8.2.1. Altura.....	28
1.8.2.2. Pendiente.....	28
1.8.2.3. Relieve.....	28
1.8.3. Combustibles.....	29
1.8.3.1 Combustibles forestales.....	29
1.8.3.2 Ubicación, forma y tamaño.....	29
1.8.3.3 Continuidad.....	29
1.9. Vulnerabilidad.....	30
1.10. Fuego.....	30
1.11. Bosque.....	30
1.12. Sistemas de Información Geográfica.....	31
1.12.1. Función de un SIG.....	31
1.13. Análisis espacial.....	32
1.14. Teledetección.....	32
1.15. Imágenes satelitales.....	33
1.15.1. Análisis de imágenes de satélite.....	33
Capítulo 2. Antecedentes.....	35
Capítulo 3. Caracterización.....	47
3.1. Topografía.....	47
3.2. Geología.....	49
3.3. Edafología.....	52

3.4. Clima	56
3.5. Uso de suelo y vegetación.....	59
Capítulo 4. Metodología	63
4.1. Fuentes de información	65
4.1.1. WorldClim	65
4.1.2. INEGI	66
4.1.3. LandViewer	67
4.1.4. Servicio Meteorológico Nacional	68
4.2. Variables	69
4.2.1. Vegetación	69
4.2.1.1. Bandas espectrales.....	71
4.2.1.2. NDVI	72
4.2.2. Localidades, caminos y carreteras	75
4.2.3. Velocidad del viento	78
4.2.4. Temperatura máxima	80
4.2.5. Radiación solar	82
4.2.6. Precipitación.....	84
4.2.7. Evaporación	86
4.2.8. Vapor de agua.....	88
4.2.9. Hidrología.....	90
4.2.10. Pendientes	92
4.3. Evaluación Multicriterio.....	94
4.3.1. Método de las Jerarquías Analíticas (MJA) de Saaty (Analytical Hierarchy Process, AHP)	95
4.3.2. Organización de la EMC	96

4.3.3. IDRISI Selva	98
4.3.4. Calculadora ráster.....	100
4.3.5. Asignación de pesos y suma de variables.....	102
Capítulo 5. Resultados	105
Conclusiones	121
Recomendaciones	125
Bibliografía.....	127

Índice de mapas

1. Mapa topográfico	48
2. Mapa geológico	51
3. Mapa edafológico	55
4. Mapa climatológico	58
5. Mapa de uso de suelo y vegetación.....	62
6. Mapa de Índice de vegetación de diferencia normalizada	74
7. Mapa de caminos y carreteras.....	77
8. Mapa de velocidad del viento	79
9. Mapa de temperatura máxima.....	81
10. Mapa de radiación solar.....	83

11. Mapa de precipitaciones	85
12. Mapa de evaporación	87
13. Mapa de vapor de agua.....	89
14. Mapa de hidrología	91
15. Mapa de pendientes.....	93
16. Mapa de zonas propensas a incendios forestales	104
17. Mapa de sitios de muestreo (CEPANAF)	118

Índice de imágenes

Imagen 1	106
Imagen 2	107
Imagen 3	108
Imagen 4	109
Imagen 5	110
Imagen 6	111
Imagen 7	113
Imagen 8	114
Imagen 9	114
Imagen 10.....	115
Imagen 11.....	116
Imagen 12.....	119
Imagen 13.....	119
Imagen 14.....	120

Índice de tablas

Tabla 1. Matriz metodológica.....	64
Tabla 2. Bandas espectrales de imágenes satelitales Landsat 8.....	70
Tabla 3. Matriz de prioridad de variables	96
Tabla 4. Matriz procedimental de IDRISI Selva	99
Tabla 5. Asignación de pesos a variables.....	100
Tabla 6. Sitios de muestreo	105

Índice de formulas

Formula 1. índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.....	72
Formula 2. Estandarización	101
Formula 3. Estandarización invertida.....	101
Formula 4. Ecuación ráster de variables.....	102

Resumen

La zona de estudio denominada como subcuenca “Rio Verdiguel” se encuentra ubicada entre los municipios de Zinacantepec y Toluca, en lo que se denomina como la región décimo séptima del Estado de México (Región XVII), a su vez que forma parte del Área de Protección de Flora y Fauna “Nevado de Toluca”, esto implica que, a pesar de que la mayor parte del territorio son zonas urbanizadas, o cuando menos, donde se llevan a cabo actividades de carácter agropecuario, la zona que engloba parte del “Nevado de Toluca” cuenta con una basta vegetación, ya sea que estemos hablando de especies arborícolas o vegetación baja. La cercanía del área natural protegida con zonas de carácter antrópico, el turismo, así como otros factores de carácter natural, suponen a la zona a un riesgo por incendio forestal.

La finalidad del presente trabajo fue la de identificar aquellas zonas con un mayor índice de susceptibilidad a sufrir un siniestro de este tipo, sin embargo, considerando la extensión del territorio, las condiciones del clima, el tiempo, recursos, y los propios incendios que se llevaron a cabo durante la realización de este trabajo suponían una dificultad y un riesgo para llevar a cabo una evaluación presencial de la zona, por lo que la metodología se basó principalmente en la teledetección o detección remota, la cual implicó usar las bandas espectrales de las imágenes satelitales del satélite “Landsat 8”, las cuales al trabajar con diferentes magnitudes de onda, y al eliminar o combinar dichas bandas de manera adecuada, lograron resaltar elementos en concreto en el entorno, como lo fue en el caso de la vegetación (vegetación alta, baja, vigorosa y seca).

Por otro lado, también se trabajó con fuentes de información como WorldClim, el cual manejaba imágenes satelitales ya depuradas y específicas sobre factores en el entorno como temperatura, precipitaciones, radiación solar, entre algunos otros; así como también datos estadísticos de CONAGUA (Servicio Meteorológico Nacional) e INEGI, cuya información (al igual que aquella proveniente de las imágenes satelitales del Landsat 8) fue procesada y trabajada en los sistemas de información geográfica “QGis” y “ArcGis”. Por otro lado, la metodología utilizada

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

para poder identificar aquellas zonas susceptibles a incendios forestales con respecto a las variables consideradas, fue la Evaluación Multicriterio con la metodología de Jerarquías Analíticas de Saaty”, en donde, para asignar un valor y orden correcto a las variables utilizadas (vegetación, localidades, carreteras, caminos, temperatura máxima, radiación solar, precipitaciones, evaporación, vapor de agua, cuerpos de agua, corrientes de agua, velocidad del viento, pendientes), se les integro en una matriz por orden de importancia, para posteriormente colocar dicha matriz en el software IDRISI Selva, en el cual se calcularon los pesos de cada variable como prioridad dentro de la probabilidad para generar un incendio; una vez teniendo los pesos de las variables, se integró cada una de estas a la calculadora ráster de ArcGis, no sin antes haber estandarizado cada variable en la escala del 1 al 100, para posteriormente efectuar una ecuación en donde cada variable se multiplico por su peso asignado y se sumó en conjunto con las demás, dado como resultado un mapa de zonas con mayor probabilidad de sufrir un incendio forestal.

Como parte final del trabajo, se realizó un trabajo de campo en donde se visitaron aquellas zonas con un índice de probabilidad del 90%, consolidando la información arrojada por el mapa al visitar zonas marcadas con riesgo las cuales habían tenido recientes incidentes con el fuego, reconociendo que aquellas zonas con mayor índice de probabilidad contaban con un alto porcentaje de combustibles forestales, así como también una relativa o completa cercanía con zonas de carácter antrópico, teniendo como principal causa de estos fenómenos más allá del factor natural, la falta de vigilancia en la zona, así como la falta de conocimiento y educación por parte de los visitantes y turistas del “Nevado de Toluca”.

Introducción

Los bosques son los ecosistemas terrestres más extensos, ocupando el 30% de la superficie emergida del planeta, (FAO, 2007). Los ecosistemas forestales, se estima, albergan al menos el 75% de las especies continentales y una parte importante de la biomasa terrestre. Igualmente, el papel de los bosques y

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

plantaciones como depósito de carbono que contribuya a disminuir el calentamiento global puede verse en parte contrarrestado por los cambios en el albedo y la mayor capacidad de absorción de radiación, especialmente en latitudes altas. (Ruiz Pérez, García Fernández, & Sayer, 2007)

Hablando en un aspecto más local, México es uno de los 10 países con mayor superficie de bosques primarios y en su territorio se registran todos los tipos de vegetación natural conocidos.

A diferencia de los bosques secundarios donde la mano del hombre intervino para crearlos o alterarlos, decir bosques primarios es referirnos a la superficie terrestre que constituye un gran reservorio de genes, mantiene la mayor biodiversidad y variedad de ecosistemas, es hábitat de pueblos y comunidades indígenas, reúne belleza paisajística, regula el clima, realiza una acción depuradora y es una verdadera farmacia natural. Por eso aún podemos celebrar que existan bosques primarios en México, ya que al menos 76 países han perdido ya todos sus bosques primarios, a consecuencia de la tala indiscriminada para la fabricación de papel, el cambio de uso del suelo para la ganadería y la agricultura y la explotación petrolera, todo lo cual ha reducido a sólo el 20% los bosques primarios que existieron en el mundo. (SEMARNAT, Bosques de México, riqueza forestal y biodiversidad, 2021)

Por otro lado, podemos definir un incendio forestal como un fenómeno donde el fuego se propaga en alguna zona con masa forestal (entre algunos otros elementos como), de forma desmedida, impulsado principalmente por el viento, oxígeno, y el más importante, el combustible que tenga a su alcance.

Se calcula que las actividades humanas ocasionan el 99% de estos incendios y sólo el 1% tienen como causas fenómenos naturales como descargas eléctricas o erupciones volcánicas. De acuerdo con el promedio de los últimos años, casi la mitad de estos incendios se producen por actividades agropecuarias y de urbanización, junto con las acciones intencionadas y los descuidos de personas que no apagan bien sus cigarrillos o fogatas. También algunas prácticas de los cazadores

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

furtivos y de quienes llevan a cabo cultivos ilícitos pueden causar un siniestro. (SEMARNAT, Incendios Forestales, 2018)

De los casi cinco mil incendios forestales registrados en todo el país, en lo que va de 2017, sólo en el territorio mexiquense se han contabilizado mil 180, lo que significa una cuarta parte del total de los incendios a nivel nacional. Para inicios del año 2021, ya se habían combatido 219 incendios en zonas forestales, con una afectación de 2 mil 494.22 hectáreas, y en el Estado de México, el 14 de febrero del año 2021, se produjo un incendio forestal en las faldas del volcán Xinantecátl, mejor conocido como el “Nevado de Toluca”, en el área del “Parque de los Venados”. (EDOMEX, 2024)

Planteamiento del problema

Los bosques son un recurso valioso en el entorno, no solamente desde el punto de vista económico, en el cual podemos ver a los árboles como fuentes de biomasa para combustible, materia prima para la elaboración de papel, o para la cosecha y venta de alimentos como frutas, sino también nos proveen de grandes servicios ambientales como bóvedas de carbono, refugio y hogar para la biodiversidad a nuestro alrededor, ayudar a mantener fresco el entorno, ayudar a la recarga de acuíferos, evitar la erosión temprana, entre algunos otros aspectos.

En cuanto a los incendios forestales, estos se consideran una gran amenaza, no por su increíble número de incidencias los cuales han ido en aumento a través de los años, sino más bien, debido a que muchos de esos incendios se pudieron haber evitado, o cuando menos, se pudo a ver reducido su impacto, debido a que gracias a una mala planificación de la infraestructura, falta de conocimiento en algunos recursos, o incluso, la mala regulación en el libre tránsito en zonas con abundante vegetación, han propiciado a la afectación de estos ecosistemas, siendo su principal causa aquellos factores de carácter antrópico, más allá de ser causados por algún factor natural.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Por otro lado, la falta de regulación e investigación con respecto al tema muchas veces puede deberse a la falta de disponibilidad de recursos, tiempo, equipo, o simplemente las condiciones del entorno no son las adecuadas para poder llevar a cabo un trabajo de manera presencial. Sin embargo, las aplicaciones de sistemas de información geográfica en conjunto con teledetección, con el paso de los años, han demostrado ser una herramienta eficaz a la hora de trabajar una zona de estudio en modalidad remota, de manera que se puede agilizar, indagar más específicamente, y precisar aquellas zonas de mayor interés para alguna investigación de interés, o como lo sería en el caso del presente trabajo, señalara de manera más precisa y remota aquellas zonas con una mayor susceptibilidad a sufrir un siniestro como lo sería un incendio forestal.

Objetivo general

Detectar por medio de SIG's y teledetección aquellas zonas propensas y vulnerables a incendios forestales dentro de la zona forestal perteneciente al Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, ubicada dentro del área de la subcuenca “Rio Verdiguél”.

Objetivos específicos

- Identificar variables que inciden en un incendio forestal
- Buscar y seleccionar fuentes de información actualizadas
- Estructurar una metodología no reglamentaria para la identificación de zonas propensas a incendios
- Elaboración de cartografía y procesamiento de la información
- Determinar aquellas zonas más susceptibles a incendiarse
- Evaluación de la precisión de la metodología utilizada

Justificación

Los bosques son ecosistemas que nos proveen de valiosos recursos, así como también, de diversos servicios ambientales, los cuales van desde la captación y almacenamiento de carbono, regular la temperatura, combatir al cambio climático, ayudar a la filtración de agua hacia los mantos freáticos, favorecer a la humedad, evitar la erosión, servir de hogar a miles de especies animales y vegetales, proveer de materias primas a los humanos, por nombrar algunas de sus funciones más importantes.

Son diversos los motivos por los cuales, la implementación de estrategias para su protección y conservación son de suma importancia, aun mas considerando factores como el aumento de actividades agropecuarias, la urbanización o incluso el turismo, las cuales no solamente se han encargado de hacer retroceder a la masa forestal, sino también, propiciar a fenómenos como lo son los incendios forestales.

Los Sistemas de Información Geográfica juegan un papel muy importante en este trabajo debido que estos nos ayudan a realizar procesos complejos y extensos casi sin tener que estar presentes en la zona de estudio, como lo son el procesamiento de bases de datos o el análisis espacial, y en el caso de la zona de estudio, delimitada por medio de una subcuenca (debido a que esta cuenta con una barrera natural formada por las pendientes), abarca un extenso territorio, que va desde el municipio de Toluca, hasta parte del territorio de Zinacantepec.

Por otro lado, la importancia de los SIG radica en el procesamiento de imágenes satelitales, las cuales se requieren para poder identificar de forma más precisa y actualizada elementos en el entorno en constante cambio como lo es la masa forestal, temperatura, humedad, entre otros factores importantes a considerar.

Por último, cabe mencionar que ya se han realizado trabajos de identificación de zonas propensas a incendios forestales tanto dentro como fuera del “Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca”, donde el principal aspecto a considerar es el tamaño de la escala que se utilizó en dichos trabajos (1:250,000),

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

la cual era un tanto grande como para identificar de forma precisa aquellas zonas susceptibles a dicho fenómeno (véase como un ejemplo el “Atlas nacional de Riesgos”, donde destaca todo este territorio como una zona completamente susceptible a incendios forestales, incluyendo aquellas zonas que ni siquiera tienen masa forestal). Este trabajo pretende trabajar a una escala más pequeña (1:50,000), considerando a su vez variables cuya participación no siempre es tomada a consideración como detonante o principal partícipe en un incendio forestal, de forma que se puedan identificar de forma más precisa aquellas zonas, con la intención de formar estrategias dedicadas a combatir y prevenir estos siniestros en el Nevado de Toluca.

Capítulo 1. Marco teórico-conceptual.

El campo de los sistema de información geográfica, así como de la propia teledetección es bastante amplio, siendo incluso que las herramientas utilizadas en el presente trabajo tienen un desarrollo importante no solo para el presente trabajo, sino también, tienen un largo contexto histórico. Por otro lado, y de igual manera, la temática de los incendios forestales abarca un campo considerable, no solo en lo que respecta de sus variables, sino también en el comportamiento y las fuentes de origen de estos, por lo que, y en conjunto con todo lo anterior mencionado, es importante explorar algunos conceptos requeridos para ayudar a formar una estrategia que nos ayude a entender el comportamientos de estos fenómenos, así como de las herramientas a utilizar en su análisis.

1.1. Incendio forestal.

De acuerdo con la (CONAFOR, Manejo del fuego, 2023), un Incendio forestal ocurre cuando el fuego se extiende de manera descontrolada y afecta los bosques, las selvas o la vegetación de zonas áridas y semiáridas.

Además de ser parte fundamental en los ciclos de producción y distribución del agua, purifican el aire que respiramos al capturar bióxido de carbono y liberar oxígeno. También regulan la temperatura y la humedad, con lo que se equilibra el clima; proporcionan alimento, medicina y refugio a los seres vivos; y son fuente de materia prima en muchas actividades humanas.

El fuego puede tener una influencia positiva en la Naturaleza, pues ayuda a mantener la biodiversidad. Pero cuando se utiliza de forma irresponsable o se produce por alguna negligencia, puede convertirse en un incendio forestal de consecuencias devastadoras para el medio ambiente, incluso para la salud y seguridad de las personas, (SEMARNAT, Incendios forestales, 2018).

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

1.2. Tipos de incendios forestales

Debemos saber que existen tres maneras como un incendio se propaga:

Los incendios pueden ser superficiales, subterráneos, de copa o aéreos y mixtos (superficiales y de copa o subterráneos y superficiales). (CONAFOR, Manejo del fuego, 2023)

1.2.1. Superficiales:

Sucede cuando el fuego se propaga en forma horizontal sobre la superficie del terreno y alcanza hasta metro y medio de altura. Estos afectan combustibles vivos y muertos como pastizales, hojas, ramas, ramillas, arbustos pequeños, arboles de regeneración natural o plantación, troncos, humus, entre otros. (CONAFOR, Manejo del fuego, 2023). Incendio superficial: se propaga sobre material como pasto y vegetación, hojas de árbol, pasto, leña pequeña, troncos caídos y arbustos bajos, de la superficie del suelo hasta 1.5 metros de altura.

1.2.2. Subterráneo:

Sucede cuando un incendio superficial se propaga bajo el suelo. En este caso llega a quemarse la materia orgánica acumulada y las raíces, e incluso puede alcanzar los afloramientos rocosos. Generalmente estos no producen llamas y emiten poco humo. (CONAFOR, Manejo del fuego, 2023). Incendio subterráneo: se propaga en material ubicado debajo de la superficie del suelo; como raíces, troncos podridos y otros materiales orgánicos, no producen llamas y generan poco humo. (CENAPRED, ¿Por qué ocurren los incendios forestales?, 2021)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

1.2.3. De copa o aéreos:

Son los más destructivos, peligrosos y difíciles de controlar debido a que el fuego consume toda la vegetación. También comienzan en forma superficial, pero en este caso, las llamas avanzan primero sobre el nivel del suelo y se propagan por continuidad vertical, es decir, escalan vegetación dispuesta hacia arriba que sirve de combustible en escalera hacia las copas de los árboles. (CONAFOR, Manejo del fuego, 2023). Incendio aéreo: se propaga por la parte alta de los árboles o matorrales, arriba de 1.5 metros de la superficie del suelo, como ramas de árboles, copas, árboles secos y arbustos altos, producen la mayor generación de humo y puede observarse a largas distancias. (CENAPRED, ¿Por qué ocurren los incendios forestales?, 2021)

1.3. Efectos de primer y segundo orden de los incendios forestales.

Los efectos de primer orden se refieren al impacto inmediato sobre los componentes del ecosistema. Los efectos de segundo orden están relacionados con la respuesta post-incendio del ecosistema, asociado a los procesos de sucesión ecológica.

El fuego y los ecosistemas han establecido relaciones, donde incluso, algunos ecosistemas han desarrollado adaptaciones para depender de sus efectos, como la reducción de competencia por malezas, el saneamiento y/o control de enfermedades entre las plantas, la liberación e incorporación de nutrientes y en algunos casos, la germinación de algunas semillas.

1.4. El triángulo del fuego.

Para que se origine un incendio forestal se necesitan tres elementos: calor + oxígeno + combustibles, el llamado triángulo del fuego. (CONAFOR, Manejo del fuego, 2023)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Calor: Es la energía que se necesita para iniciar un incendio. El calor puede provenir de una vela, una cerilla, una estufa, un rayo, entre otros. Sin una fuente de calor, no se puede producir un incendio. (Medical Assistant, 2023)

Combustible: Es el material que se quema para producir un incendio. El combustible puede ser cualquier cosa que queme, como madera, papel, gasolina, entre otros. Sin combustible, no hay nada para quemar y, por lo tanto, no hay incendio. (Medical Assistant, 2023). A la vez puede clasificarse como inflamable (cuando su punto de ignición es menor a 38°C), combustible (cuando el punto de ignición es mayor a 38°C) y pirofórico (cuando arde espontáneamente). (Seguridad Minera, 2013)

Oxígeno: Es el elemento necesario para que el combustible pueda quemar. El oxígeno es el elemento en el aire que permite la combustión. Sin oxígeno, el combustible no puede quemar, así que no hay incendio. (Medical Assistant, 2023)

1.5. Causas de origen de incendios forestales.

De acuerdo con el promedio de los últimos años, casi la mitad de estos incendios se produce por actividades agrícolas junto con las acciones intencionadas y los descuidos de personas que no apagan bien sus cigarrillos o fogatas. También algunas prácticas de los cazadores furtivos y de quienes llevan a cabo cultivos ilícitos pueden causar un siniestro. (CONAFOR, Manejo del fuego, 2023)

Los incendios forestales pueden ocurrir en cualquier época del año, esto depende principalmente de la cantidad de materia combustible existente en el lugar y de su contenido de humedad, así como de las condiciones meteorológicas como la temperatura, pero sobre todo depende de las actividades humanas. Por lo que para evitar que se produzcan es posible adoptar medidas preventivas y todos debemos hacer algo para evitarlos, debido a que las afectaciones son diversas, entre ellas la devastación ambiental, contaminación, pérdidas económicas y afectaciones a la salud de la población. (CENAPRED, ¿Por qué ocurren los incendios forestales?, 2021)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

Se calcula que las actividades humanas ocasionan el 99% de estos incendios y sólo el resto tiene como causa fenómenos naturales como descargas eléctricas y la erupción de volcanes. De acuerdo con el promedio de los últimos años, casi la mitad de estos incendios se producen por actividades agropecuarias y de urbanización, junto con las acciones intencionadas y los descuidos de personas que no apagan bien sus cigarrillos o fogatas. También se sabe que algunas prácticas de los cazadores furtivos y de quienes llevan a cabo cultivos ilícitos pueden causar un siniestro. (SEMARNAT, Incendios forestales, 2018)

1.6. Causas principales de incendios forestales.

Accidentales: Rupturas de líneas eléctricas, accidentes automovilísticos, ferroviarios y aéreos.

Negligencias: Quemados agropecuarios no controlados, fogatas de excursionistas, fumadores, quema de basura, limpieza de vías en carreteras y uso del fuego en otras actividades productivas dentro de áreas forestales.

Intencionales: Quemados por conflictos entre personas o comunidades, tala ilegal o litigios.

Naturales: Caída de rayos o erupciones volcánicas.

(SEMARNAT, Incendios forestales, 2018)

1.7. Causas de los incendios forestales.

El inicio y desarrollo de un incendio forestal depende en parte del clima, de la topografía, la forma del combustible y el nivel de humedad de éste. Mientras mayor cantidad de combustible exista en un área, más intenso será el fuego.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Las causas pueden dividirse en dos grupos:

Causas naturales de los incendios forestales

Aunque los seres humanos son los principales responsables de los incendios forestales, no significa que la naturaleza no incida en su desarrollo. Un hombre puede arrojar un cigarrillo encendido a un bosque y si éste contiene vegetación seca, probablemente se desarrolle un incendio forestal.

Rayos: la caída de un rayo de larga duración a la Tierra trae consigo chispas, suficientes para encender un combustible.

Sequía: la sequía favorece las condiciones para el desarrollo de un incendio forestal pues estimula la combustión.

Calor del sol: el calor intenso, aunado a una sequía, puede secar la vegetación y ésta ser un potencial combustible.

En todos los casos, un factor es determinante: una temperatura o temperaturas altas. En adición, los fuertes vientos pueden ayudar a propagar las chispas y acrecentar el fuego.

Causas antropogénicas de los incendios forestales

Se necesita muy poco para iniciar un incendio forestal. Incluso, se sabe que el movimiento de las ruedas de un tren sobre las vías produce chispas que, si alcanzan un material combustible, producen fuego.

Las causas antropogénicas se refieren a las actividades humanas. La mayoría de estas causas tienen que ver con el descuido y la irresponsabilidad. Algunas de éstas son las fogatas, los cigarrillos que se tiran sin estar apagados, las quemas agrícolas que se salen de control, los fuegos artificiales e incluso incendios provocados.

En otras ocasiones, el desecho inadecuado de los residuos provoca incendios; esto es, la quema de basura. Además de producir contaminación del aire y del suelo, si se pierde su control es proclive de crecer, avanzar y consumir grandes hectáreas de terreno. (Geoenciclopedia, 2022)

1.8. Variables de un incendio forestal.

Dentro de los factores que más influyen en un incendio forestal, aquellos que tienen mayor relevancia, principalmente para determinar el comportamiento de estos, son las variables meteorológicas, la topografía del terreno y los combustibles que se encuentren en la zona. (Servicio Nacional de Manejo del Fuego, 2023)

1.8.1. Meteorología.

Los diversos fenómenos meteorológicos en el entorno, a pesar de llegar a mantenerse en variables relativamente constantes, tienden a cambiar constantemente, llegando a afectar las circunstancias del terreno y la vegetación donde se dé lugar. Aplicando estas variables a un análisis de riesgo por incendio forestales, se tomaron en cuenta las siguientes variables:

1.8.1.1. Temperatura.

La temperatura es el mayor o menor grado de calor o de frío que hay en un lugar. Ella es el agente fundamental tanto para la evaporación (calor), como para la condensación (frío) del elemento líquido de la superficie terrestre, lo mismo que para el desplazamiento del aire o de los vientos. (López & Vaca, 2015). Este es uno de los factores más importantes a considerar debido a que, por todo el impacto que tiene en el resto de las variables climatológicas, puede derivar en el comportamiento del fuego, como lo es la fuerza, dirección y velocidad de este, así como en su intensidad.

1.8.1.2. Humedad.

La humedad es la cantidad de vapor de agua que existe en el ambiente atmosférico de un lugar determinado y en un tiempo dado. Esto varía de acuerdo con el grado de frío o de calor, siendo el máximo posible el 100% de humedad, que nos indica la presencia de un aire completamente acuoso. Puede existir, también, un aire seco, con bajo porcentaje de humedad, debido a la poca presencia de vapor de agua. (López & Vaca, 2015). Los combustibles vivos absorben agua del suelo por sus raíces y la transpiran por unas cavidades llamadas estomas, para mantener sus células vivas y con un elevado contenido de humedad, que es la cantidad de agua generalmente expresada en el peso del combustible con respecto a su peso anhidro seco. Cuando un combustible puede arder por su bajo contenido de humedad se dice que está disponible para la combustión. Los combustibles muertos tienen propiedad higroscópica, su contenido de humedad está determinado por la humedad del ambiente. (Ruíz, 2009)

1.8.1.3. Viento

El viento es el aire en movimiento. Este desplazamiento del aire se realiza en forma horizontal y paralela a la superficie terrestre y dentro de la troposfera. Los vientos se originan por:

- a) La Diferencia de la Presión Atmosférica: Esto es el movimiento que se da en sentido direccional de las zonas de alta presión (frío) a las zonas de baja presión (calor).
- b) La Acción de la Temperatura: Es decir la acción de los rayos solares calienta áreas de nuestra superficie generando alta temperatura, por lo que se constituye en un centro de baja presión. El aire caliente se dilata y tiende a elevarse, su lugar, entonces, es ocupado por masas de aire frío provenientes de centros de alta presión o baja temperatura. De este modo, el aire se desplaza de las zonas frías a las zonas cálidas.

c) La Alternancia de los Días y las Noches: Esto es, durante el día la masa continental (superficie terrestre) se calienta más rápido que la masa oceánica, entonces el aire sopla del mar a la tierra. Durante la noche la masa oceánica almacena el calor recibido durante el día, en tanto que la superficie se enfría con mayor rapidez, dando lugar a que el aire sople de la tierra al mar. (López & Vaca, 2015)

El viento puede ser un gran aliado del fuego y factor de riesgo importante en la labor de propagación de este fenómeno debido a que puede ser el principal motor de un incendio al impulsar el fuego inicial, proveerle de oxígeno y ayudarlo a expandirse y propagarse por la zona donde ocurra el fenómeno, aunque el viento también puede estar limitado dependiendo de las condiciones topográficas de la zona donde tenga lugar el fenómeno.

1.8.1.4. Precipitación.

Las precipitaciones o lluvias constituyen un elemento fundamental del clima. Se da por la condensación del vapor de agua, formado por las nubes y luego estos se precipitan al suelo en forma de agua líquida. (López & Vaca, 2015). La presencia o ausencia de precipitaciones influye mucho en el índice de probabilidades de riesgo por incendios forestales. En el caso de México, se tienen identificadas dos temporadas de incendios forestales: De enero a junio en las zonas centro, norte, noreste, sur y sureste; y de mayo a septiembre en el noroeste del país. Ambas coinciden con la época de mayor estiaje (sequía) en el territorio nacional (SEMARNAT, Temporadas de incendios forestales en México, 2023), por lo que podemos denotar la importancia de las precipitaciones como variable a considerar.

1.8.2. Topografía.

La variación del terreno puede, tanto propiciar a la expansión de un incendio forestal, así como ayudar a contenerlo, donde también, debemos de considerar el

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

hecho de que, variables como la temperatura o los vientos se rigen por la configuración del terreno.

1.8.2.1. Altura.

Es la distancia vertical que existe entre un punto de la tierra y el nivel del mar. El término también se utiliza como sinónimo de altura en referencia a una distancia respecto a la tierra, a la región del aire a una cierta elevación sobre la superficie o a la dimensión de un cuerpo perpendicular a su base. (Gardey, Altitud - Qué es, definición y concepto., 2014). Ya sea por el hecho de que, entre más altitud se tenga, menos vegetación encontraremos, la escasez de oxígeno y otros factores como la humedad y la temperatura, la altitud juega un papel fundamental en cuanto a la propagación de un incendio forestal.

1.8.2.2. Pendiente.

La pendiente es un concepto que permite medir el grado de inclinación del terreno. Es la relación entre el espacio que recorreremos verticalmente y el espacio que recorreremos horizontalmente cuando subimos una rampa. (Comino & Brzezinski, 2023). Dependiendo de la pendiente, podemos tener una mayor recepción de calor y radiación solar, así como también, encontrar un terreno más expuesto a los vientos, nubosidad, entre otros.

1.8.2.3. Relieve.

Se llama así al conjunto de las diversas formas que adquiere la corteza terrestre, como consecuencia de los movimientos de las placas tectónicas o el modelado de agentes externos como la lluvia, el viento y las olas del mar. Un grupo de formas o accidentes geográficos conforma un terreno. (GeoEnciclopedia, 2023)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

1.8.3. Combustibles.

Necesarios para poder producir un incendio, los combustibles pueden dividirse en muchas variables, que van desde la densidad, el tipo de vegetación, la cercanía entre estos, etc.

1.8.3.1 Combustibles forestales.

Por su condición, los combustibles pueden dividirse en vivos y muertos. Los primeros son hierbas, arbustos y árboles, o plantas que se encuentran por debajo de dosel; la velocidad de propagación del fuego sobre plantas vivas depende de su humedad, con lo que pueden retardarla. Los segundos son los troncos, las ramas y las hojas que normalmente se encuentran sobre el suelo, su cantidad y posición generalmente determina su inflamabilidad y que tan fácil puede iniciarse y dispersarse el fuego. (Ruíz, 2009)

1.8.3.2 Ubicación, forma y tamaño.

La condición, el tamaño, la cantidad, el arreglo y el contenido de humedad de los combustibles son componentes indispensables para saber cómo se queman. Entre los combustibles se incluye el mantillo, cuya presencia y función ecológica es muy importante (contribuye poco con la biomasa total del combustible, pero puede consumirse rápidamente por el fuego en períodos secos), y la hojarasca que generalmente es muy inflamable porque en períodos secos su humedad desciende rápidamente, muchos incendios superficiales comienzan por este combustible. (Ruíz, 2009)

1.8.3.3 Continuidad.

Es la cercanía que podemos encontrar entre uno y otro combustible, su cercanía y lejanía pueden determinar qué tan rápido puede avanzar o no el fuego. Este está

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

determinado por otras variables como la densidad de la vegetación, así como las circunstancias del terreno como lo son el relieve, pendiente, etc.,

1.9. Vulnerabilidad.

Se define siempre en relación con algún tipo de amenaza, sean eventos de origen físico como sequías, terremotos, inundaciones o enfermedades, o amenazas antropogénicas como contaminación, accidentes, hambrunas o pérdida del empleo. (Rivera, 2011)

1.10. Fuego.

Es el calor y la luz producidos por la combustión. El fuego nace a partir de una reacción química de oxidación y supone la generación de llamas y la emanación de vapor de agua y dióxido de carbono. Se conoce como punto de ignición a la temperatura en la cual un material se prende fuego. Al comenzar la reacción de oxidación, el calor que se desprende permite mantener el fuego durante un cierto periodo de tiempo. La temperatura y el color de la llama dependen del tipo de gases desprendidos durante el proceso de combustión. La madera, al arder, genera llamas anaranjadas, rojas y amarillas.

(Merino, 2021)

1.11. Bosque.

Los bosques son espacios delimitados conformados por variedad de vegetación y otros elementos (agua, suelos, temperatura, entre otros) que conceden un ecosistema con hábitat adecuado para albergar gran cantidad de animales silvestres, insectos, hongos, microorganismos, etc. (Grudemi, 2022)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Los bosques son los ecosistemas terrestres más extensos, ocupando el 30% de la superficie emergida del planeta.

Los ecosistemas forestales, se estima, albergan al menos el 75% de las especies continentales y una parte importante de la biomasa terrestre.

Igualmente, el papel de los bosques y plantaciones como depósito de carbono que contribuya a disminuir el calentamiento global puede verse en parte contrarrestado por los cambios en el albedo y la mayor capacidad de absorción de radiación, especialmente en latitudes altas. (CEAPE, 2017)

1.12. Sistemas de Información Geográfica.

De acuerdo al (Servicio Geológico Mexicano, 2017), podemos definir un SIG (Sistema de Información Geográfica) como un software específico que permite a los usuarios la obtención de datos relacionados con el espacio físico, además de permitir el crear consultas interactivas, integrar, analizar y representar de una forma eficiente cualquier tipo de información geográfica referenciada asociada a un territorio, conectando mapas con bases de datos.

El uso de este tipo de sistemas facilita la visualización de los datos obtenidos en un mapa, con el fin de reflejar y relacionar fenómenos geográficos de cualquier tipo, desde mapas de carreteras hasta sistemas de identificación de parcelas agrícolas o de densidad de población. Además, permiten realizar las consultas y representar los resultados en entornos web y dispositivos móviles de un modo ágil e intuitivo, resolviendo problemas de planificación y gestión geográfica.

1.12.1. Función de un SIG.

El SIG funciona como una base de datos geográfica (datos alfanuméricos) asociada a los objetos existentes en un mapa digital y dan respuesta a las consultas interactivas de los usuarios, analizando y relacionando diferentes tipos de

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

información con una sola localización geográfica. Esto es, conectando mapas con bases de datos. De esta forma, señalando un objeto se conocen sus atributos, e inversamente, preguntando por un registro de la base de datos se puede saber su localización en la cartografía.

El sistema permite separar la información en diferentes capas temáticas y las almacena independientemente, permitiendo trabajar con ellas de manera rápida y sencilla, y facilitando la posibilidad de relacionar la información existente para la obtención de resultados.

(Servicio Geológico Mexicano, 2017)

1.13. Análisis espacial.

El análisis geoespacial geográfico es un proceso de interpretación, exploración y modelización de datos SIG, desde su adquisición hasta el entendimiento del resultado obtenido. La información obtenida se procesa por medio de software específico para análisis espacial, y dependiendo de la finalidad que se quiera obtener, puede ser más o menos complejo. La función más simple sería la de visualización de los datos, mientras que obtener conocimiento útil requiere un análisis exhaustivo de ellos.

En general, un análisis espacial completo consta de cinco etapas clave: definir el objetivo, preparar los datos, elegir las herramientas y técnicas adecuadas, realizar la investigación y evaluar los resultados. Algunos ejemplos de análisis espacial sería la medición de distancias, la selección de rutas o el establecimiento de correlación entre diferentes objetos o lugares en función de su posición geográfica actual o histórica. (EOS, 2022)

1.14. Teledetección.

La percepción remota o teledetección puede definirse como la ciencia de obtener información acerca de un objeto, utilizando luz visible o invisible, por medio del

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

análisis automatizado de datos obtenidos a distancia por un sensor remoto. Actualmente, la percepción remota tiene aplicaciones muy amplias en diferentes disciplinas de nuestra vida cotidiana. Como ejemplo, en la agricultura mediante la luz visible que reflejan los cultivos, el uso de la percepción remota permite identificar no solo las áreas sino también los tipos de cultivo y el estado de salud en el cual se encuentran. (CENAPRED, Tecnología espacial y percepción remota en la prevención de desastres, 2021)

1.15. Imágenes satelitales.

Por medio de sensores montados en plataformas que se encuentran en el espacio exterior se pueden obtener fotografías de la superficie terrestre mediante el reflejo de la luz visible que emite una fuente natural como el sol o el de la luz no visible emitida por fuentes artificiales montadas en las mismas plataformas espaciales. Las imágenes obtenidas mediante la detección de la luz visible de la superficie terrestre se denominan imágenes satelitales ópticas mientras las que se obtienen mediante la detección no visible se denominan imágenes satelitales de radar. (CENAPRED, Tecnología espacial y percepción remota en la prevención de desastres, 2021)

1.15.1. Análisis de imágenes de satélite.

A partir del procesamiento de imágenes satelitales ópticas o de radar (percepción remota) es posible monitorear la evolución de diferentes fenómenos perturbadores de origen natural tales como ciclones tropicales, inundaciones, hundimientos, erupciones volcánicas, sismos, deslizamientos de laderas, así como la evolución y la distribución de los daños en el territorio posterior a que estos ocurren, para que las autoridades encargadas de la Protección Civil tomen las decisiones oportunas y adecuadas para proteger la vida de las personas y sus bienes. Las imágenes satelitales tienen gran utilidad en el monitoreo de fenómenos naturales con fines de alertamiento, como herramienta en la prevención de desastres e identificación de

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

daños por el impacto de fenómenos perturbadores. (CENAPRED, Tecnología espacial y percepción remota en la prevención de desastres, 2021)

Capítulo 2. Antecedentes.

Para la realización de este trabajo, se llevó a cabo una investigación documental que ayudara a los procedimientos que se verán más adelante, considerando una serie de metodologías, variables, softwares, entre otros; así como indagando en el ámbito internacional, nacional y local.

En el ámbito internacional, nos topamos con un gran número de documentos que se enfocan en la teledetección aplicada al análisis espacial, aunque, por otro lado, tenemos que algunos de estos documentos, o bien, no se enfocan de manera precisa al ámbito forestal, o la metodología vista es muy propia del país, es decir, tanto la metodología que se utiliza, así como las variables a considerar, tratan temas propios de la zona como bien lo podría ser en el caso de Canadá, donde sus metodologías están aplicadas a zonas con temperaturas bajas, a comparación de México que tiene (por mucho) temperaturas más cálidas. A continuación, se muestran aquellos documentos que, o bien, modificaron dichas metodologías para adaptarlas a sus respectivos países, o hicieron uso de metodologías más generales para poder abarcar, por decirlo de otra forma, “variables universales”, o que pudiesen ser usadas de una forma más diversa.

De acuerdo con (Murcia, 2016), considera que los sensores remotos como lo son las imágenes satelitales en este caso le pueden brindar de información valiosa a las autoridades a la hora de tratar con alguna problemática como lo vienen siendo los incendios forestales, y, en este caso, se llevó a cabo un procedimiento en conjunto con diversas variables y herramientas como lo son los datos satelitales y también de estaciones meteorológicas, procesando esta información a través de un SIG; se incluyen variables y componentes físicos como precipitación, temperatura, pendientes y combustibles, como elementos ya anteriormente considerados en metodologías parecidas, pero añadiendo nuevos componentes como antecedentes de incendios, radiación solar, solana – umbría y vientos. Para un correcto análisis, dichas variables se calcularon y ponderaron con ayuda de un SIG a partir de imágenes satelitales, o a partir de datos estadísticos y formulas sobre estas.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Los resultados nos dejan un mapa de incendios forestales, donde existe una clasificación de estas zonas, que va desde “muy baja”, “baja”, “moderada”, “alta”, y “muy alta”, todo dependiendo de que tan propensas sean a tener uno de estos fenómenos. La metodología empleada también nos demuestra varios puntos a considerar, pero uno de los principales, vendrían siendo la falta de información y las metodologías “generales” no aplicables para todo el mundo.

Para esto podemos considerar el hecho de que en Canadá y Estados Unidos hay metodologías establecidas para tratar el tema de los incendios forestales, sin embargo, los parámetros de estas metodologías consideran únicamente las condiciones climáticas y de vegetación de dichas zonas, por lo cual, estas metodologías no sirven o se deben de modificar (como lo fue en este caso) para poder adaptarlas a otras partes del mundo y tener un análisis más preciso de lo que se quiere trabajar. Por otro lado, está la falta de información, esta radica principalmente en que no se tienen antecedentes o registros de incendios forestales de la zona de estudio, más que el conocimiento empírico de poblaciones cercanas, por lo que al momento de introducir los antecedentes como una variable a considerar, esta queda incompleta; por otro lado, existe una falta de datos climatológicos, los cuales también eran pertinentes para este trabajo, los cuales no se obtuvieron porque los mismos datos de las estaciones climatológicas estaban incompletos, o simplemente no había una estación como tal en dicha zona o algo que pudiese llevar un registro de estos datos.

Pasando al ámbito nacional, se tomaron en cuenta principalmente documentos de la UNAM, o bien, de documentos que fueron aplicados a zonas de todo el país (hablando de Querétaro, Oaxaca, Ciudad de México, etc.), en los cuales podemos obtener los siguientes trabajos.

De acuerdo con (Flores Rodríguez, y otros, 2021), y a su artículo sobre el “Análisis comparativo de índices espectrales para ubicar y dimensionar niveles de severidad de incendios forestales”, los fenómenos conocidos como incendios forestales han aumentado su severidad y frecuencia en los últimos años, por lo cual es necesario

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

evaluar estos fenómenos, debido a que estos generan un importante impacto en los recursos naturales, sin embargo, la evaluación tradicional, o por decirlo de otra manera, en campo, o simplemente la evaluación de manera presencial genera un gran consumo de tiempo y recursos, ya sea por la gran extensión del terreno o sus caminos accidentados que no permiten la tan sencilla accesibilidad a estos.

Es por ello por lo que se implementó el uso de índices de firmas espectrales provenientes de sensores remotos como lo son las imágenes satelitales.

Los autores consideraron el hecho de que existe una amplia variedad de estas firmas espectrales, así que llevaron a cabo una comparativa de diversos índices de imágenes satelitales provenientes de Landsat 8, donde, de igual manera, se dividió el estudio en dos tipos de imágenes satelitales; las primeras imágenes serían monotemporales (es decir, que son de una sola fecha en concreto), por otro lado, están las imágenes bitemporales (donde se comparaban dos imágenes de fechas diferentes).

El resultado de este trabajo fue principalmente el destacar el hecho de que cada uno de los índices espectrales de las imágenes satelitales tiene un resultado diferente dependiendo de la temporalidad, esto se debe a que, por decirlo de una manera, todos los índices resaltan cierta severidad de incendios, pero no es lo mismo usar un índice en una época completamente despejada de nubes a una obtenida en épocas de lluvia. La conclusión nos deja como resultado la importancia de y facilidades que nos deja este tipo de técnicas, pues si se pudieron resaltar aspectos importantes con respecto a las zonas afectadas por incendios forestales, pero también se resalta la importancia del trabajo de campo, en consecuencia de que la información obtenida por medio de imágenes satelitales puede no ser tan precisa y siempre será necesario por lo menos el hecho de verificar los datos que nos arroja, por lo menos en zonas o puntos clave de la zona de estudio.

En el ámbito local, se tomaron en cuenta trabajos y documentos provenientes de la Universidad Autónoma del Estado de México, así como también de la Universidad Autónoma de Chapingo, en donde no solo la metodología estaba más aplicada a

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

situaciones o características más “familiares”, sino también la propia caracterización de las zonas de estudio, principalmente aquellas que se enfocaban principalmente en algún sector del Nevado de Toluca, hicieron denotar algunas características y limitantes a considerar en la elaboración de este trabajo, tanto en cuestión de accesibilidad a la información, organización de esta, o limitantes en algunas metodologías, así como en el trabajo de campo.

De acuerdo con (García, Visualizador web de las zonas susceptibles a incendios forestales en el área de protección de flora y fauna, 2018), se establece que los problemas con respecto a los recursos forestales se han ido incrementando en los últimos años, siendo que estos, no solamente sufren de considerables siniestros como lo son las plagas o los incendios forestales, sino también, que estos sufren una enorme presión por parte de las políticas y el mercado que demanda sus recursos, dando lugar, incluso a una falta de información sobre las mismas áreas boscosas, siendo que esta esta desactualizada, errónea, o inexacta, por lo que este trabajo se realizó con el objetivo central de implementar, diseñar y probar un visualizador que contenga la cartografía temática de las zonas susceptibles a incendios forestales en Área de Protección de Flora y Fauna Nevado de Toluca, de manera que se mantenga información actualizada de la zona y de fácil acceso.

Este trabajo se llevó a cabo haciendo uso de variables físico-geográficas, meteorológicas y antrópicas que se utilizaron para el desarrollo de esta temática planteada como lo son: Temperatura, precipitación, humedad relativa, viento, pendiente, altitud, exposición, configuración del terreno, combustibles forestales y abundancia de vegetación presente. Las variables anteriormente mencionadas se ponderaron de acuerdo con el nivel de riesgo que podían representar en cuanto a un incendio forestal; dicho método se llevó a cabo utilizando el software ArcGIS, en donde se llevó a cabo un procedimiento llamado “álgebra de mapas”, el cuál consistió en sumar cada una de las variables de acuerdo a la ponderación que se les otorgo y poder delimitar zonas propensas a incendio forestales y otros fenómenos de acuerdo a una escala de peligro.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

El resultado de este trabajo consiste en un visualizador web que nos muestra zonas susceptibles a incendios forestales, las cuales también incluyen las variables que se usaron para su elaboración, de manera que esta información pueda ser consultada para su aprovechamiento en planes de mitigación de estos fenómenos.

De acuerdo con (Millan, 2015), en el Distrito Federal (ahora Ciudad de México), se presenciaban constantemente fenómenos de incendios forestales, los cuales ocurrían por periodos de meses, semanas, e incluso hasta días, lo cual generaba grandes pérdidas en cuanto recursos forestales y generaba un riesgo ante la población. Es por ello que se realizó un estudio sobre las causas de estos fenómenos, en donde se llegó a la conclusión de que las actividades como el vandalismo, pastoreo, quema de material orgánico de forma descontrolada, y otras actividades de carácter antropogénico eran las principales causantes de este tipo de fenómenos, los cuales también se analizaron durante un periodo de tiempo de 1998 al 2012.

En este trabajo se utilizaron diversas variables, en conjunto con la metodología de “Copete” para obtener un mapa en concreto de las áreas más afectadas por los incendios forestales; dentro de las variables se encuentran: superficie quemada, número de incendios, causas de los incendios, combustible o biomasa, pendiente, y factores de presión y temperatura, todas con sus respectivas ecuaciones y descripciones del porque son un factor importante para considerar; todo esto en conjunto del uso y aplicaciones de softwares como Geoda y ArcGIS, y datos cartográficos y estadísticos obtenidos de diversas instituciones oficiales, así como de trabajo de campo.

Como resultado, se obtuvo un mapa de índice de frecuencia de incendios forestales del Distrito Federal, en donde podemos observar que el mayor número de incidencia se da entre los años del 2008 al 2012, además de que también se cuenta con información estadística de cuáles son las zonas más expuestas a un incendio forestal, el área en la que tendría lugar el fenómeno, e información necesaria para mantener a las autoridades alerta.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

De acuerdo con (Martínez, 2016) el Estado de México ocupa en lugar número 13 a nivel nacional de mayor índice de incendios forestales, teniendo una pérdida aproximada de 46 hectáreas al año; en el caso de este trabajo, se realizó un estudio para delimitar aquellas zonas propensas a incendios forestales dentro del municipio de Almoloya de Juárez, y aunque esta zona no tiene como tal un registro elevado de estos fenómenos, la investigación ayuda a delimitar zonas y prevenir este tipo de fenómenos en la zona del municipio que forma parte del área de Protección de Flora y Fauna del Nevado de Toluca, con el propósito de proteger sus recursos.

El procedimiento en este trabajo consta de la identificación de variables en bases de datos y elaboración cartográfica a partir de la ubicación geográfica, superficie y ecosistemas afectados, causas del siniestro, ocupación del suelo, y la distribución de los incendios anteriores; así como también un mapa de actividades económicas que podrían verse implicadas en la generación de estos fenómenos como lo son la proximidad a centros de población y vías de comunicación, cambios en la ocupación del suelo y actividades agropecuarias. También se hace uso de sistemas de información geográfica para sumar y calcular los valores de estas variables y así obtener un mapa de incendios forestales.

Como resultado obtenemos una serie de datos que indican aquellas áreas que son más propensas a incendios forestales dentro del municipio de Almoloya de Juárez, aunque, por otro lado, el mismo autor nos deja una serie de recomendaciones y problemas que se encontró a la hora de llevar a cabo este trabajo, pues algunos datos se dejan incompletos, como es en el caso de las características socio económicas, pues no se pudieron obtener debido a la poca disponibilidad de la población aledaña a la zona de estudio, así como de la propia inseguridad de esta región.

Por otro lado, tenemos el hecho de la foteointerpretación y la evaluación multicriterio, los cuales dificultaron el análisis espacial y la obtención de las zonas más propensas a incendios forestales, debido a que la zona en la que se trabajó era muy extensa y

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

la tarea era muy tardada, por lo cual se recomienda este tipo de análisis para zonas con una menor extensión del territorio.

De acuerdo con (Castañeda Rojas, Endara Agramont, Villers Ruiz, & Nava Bernal, 2015), se da a conocer la extensión (una tercera parte del territorio) e importancia del aspecto forestal en el Nevado de Toluca, donde lamentablemente se explica de forma breve que dicha cobertura forestal ha ido decreciendo con el pasar del tiempo debido a actividades agrícolas y ganaderas, pero, sobre todo, por culpa de los incendios forestales, ya sean de origen natural o antropogénico. Este trabajo pretende analizar los tipos de combustibles que se pueden encontrar en el Nevado de Toluca, como aceites, materia orgánica seca, entre otras cosas, y evaluar aspectos como el tiempo que pueden servir de combustibles, o que tanto pueden usarse para retener humedad y otras sustancias.

El trabajo se llevó a cabo principalmente de manera presencial, es decir, que la mayor parte fue de trabajo de campo, donde primero se llevó a cabo un estudio de las características fisiológicas de la zona como las pendientes, altitud, presión, temperatura, tipo de vegetación que se puede encontrar ahí, así como el empleamiento de sistema de coordenadas para saber específicamente que zonas buscar, esto en conjunto con la interpretación de imágenes de satélite para delimitar dichas zonas.

Como resultado, obtenemos una serie de mapas que nos señalan la ubicación de la vegetación y de los combustibles que se pueden encontrar en el Nevado de Toluca, donde se llegó a la conclusión de que las actividades de carácter antrópico son las principales causantes de una fragmentación en la continuidad del bosque, así como también, la mala aplicación de técnicas de aprovechamiento, han generado una cantidad excesiva de combustibles potencialmente peligrosos en caso de un incendio forestal, así como la degradación del bosque en sí y la afectación a individuos (árboles y plantas).

De acuerdo con (Castañeda Rojas, 2013), se llevó a cabo una investigación sobre el índice de incendios forestales en zonas de alta montaña, donde se llevó a cabo

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

una identificación de las zonas con mayor densidad de vegetación, combustibles, actividades de carácter antropogénico, de manera que se pueda generar información actualizada para poder combatir con estos fenómenos, aunque, por otro lado, no se descarta el hecho de que los incendios forestales son fenómenos importantes dentro de un bosque, debido a que estos ayudan a la regeneración de este, sin embargo, cuando el incendio es provocado de forma artificial, es decir, que se de carácter y procedencia antropogénica los daños pueden ser incluso mayores de lo que se podría prever de un incendio de carácter natural.

La metodología de esta investigación, además de utilizar variables y herramientas anteriormente vistas como lo son las fotointerpretación, o variables como densidad de la capa forestal, combustibles potenciales, variables antropogénicas o naturales como actividades agropecuarias, pendientes, elevación, temperatura, entre otras; aquí también se consideran variables más específicas con respecto a los individuos (árboles), como lo son el diámetro, altura, fuste, para evaluar que tanta capacidad de regeneración tiene la capa forestal dependiendo de la zona en la que se esté haciendo el muestreo.

Como resultado, se obtienen varias gráficas y mapas, donde se señalan aquellas zonas que se verían más afectadas en caso de un incendio forestal, así como también se muestran aquellas zonas del bosque que presentarían una mayor capacidad de regeneración.

De acuerdo con (Figueroa, 2020), el presente trabajo está enfocado a darle un seguimiento a los incendios forestales, de tal manera que se pueda tener un registro y seguimiento de estos. Este documento nos muestra las zonas con mayor nivel de incidencia de fenómenos por medio de gráficas, , así como también nos muestra el número de incendios que ocurren en dicha zona, las cuales se contabilizaron en un total de 15874 incendios forestales registrados en el Estado de México, habiendo afectado 73, 447, 015 hectáreas en total, en un periodo de tiempo de 10 años, que va desde el 2009 hasta el 2019. Por otro lado, se llevó a cabo un conteo del equipo disponible en la zona para poder combatir un incendio forestal, haciendo referencia

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

a la cantidad de equipos de protección, herramientas y servicios para este tipo de fenómenos.

Se depuro y organizo la información existente en las bases de datos de PROBOSQUE, de manera que se obtuvo información concreta y organizada, dejando de lado cualquier tipo de inconsistencia. Posteriormente, y por métodos estadísticos, se generaron tablas con contenido acerca de la tendencia de ciertas zonas en el Estado de México las cuales habían sufrido por algún incendio forestal, dando como resultado, escalas sobre cuáles eran las regiones del estado en cuestión que tendían a sufrir más por incendios forestales, así como un índice que señalaba toda la superficie afectada por estos en cada una de las regiones señaladas.

De acuerdo con (Romero, 2015), establece la importancia del recurso forestal, no solamente a nivel biológico, sino también, como un importante recurso dentro del comercio, haciendo uso del término “Plantaciones Forestales Comerciales” , en donde la problemática radica en que, por un lado, tenemos a los bosques como importantes factores contra la erosión del suelo, o para rehabilitar zonas que fueron destruidas por algún motivo de carácter antrópico o natural. Por otro lado, se entiende que los bosques constantemente son bombardeados por diversas problemáticas como incendios forestales, plagas, enfermedades, pasando incluso por problemáticas como la misma tala ilegal, por lo que la propuesta de este trabajo es hacer uso de las Plantaciones Forestales Comerciales, de manera que se pueda tener un correcto aprovechamiento de este recurso, y de esta forma, poder beneficiar a ambas partes, ayudado a la regeneración del bosque, al suelo, y a todos los procesos que se llevan dentro de este, así como también que se puedan aprovechar los recursos de manera sustentable.

Para la elaboración de este trabajo, se hizo uso de la Evaluación Multi Criterio, en conjunto con el uso de Sistemas de Información Geográfica, Aunque, principalmente, se llevó a cabo el procedimiento mediante un modelo sistemático llamado “Modelo de Concordancia”, donde se organizaron las ideas para,

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

posteriormente, darles un valor de acuerdo con un criterio establecido por el propio autor. Por otro lado, aquellas variables que se usaron se escogieron de acuerdo a información documental, como lo fue en el caso de factores como la altitud, pendientes, zonas con mayor masa forestal, entre algunas otras, las cuales se anexaron a bases de datos para su correcta organización.

Como resultado, obtenemos un mapa de aptitud para Plantaciones Forestales comerciales, en donde podemos observar, y además se anexan tablas, de aquellos municipios con un alta, media, y baja aptitud para poder llevar a cabo este tipo de actividades.

De acuerdo con (Rojas, 2021), en base a su trabajo, se requiere información precisa con respecto a nuestros recursos forestales, lo cual considera desde el cómo se aprovechan los recursos de estos, sus ecosistemas, hasta la cantidad de combustibles que podemos llegar a encontrar en estos, de manera que se pueda obtener información para evitar siniestros como incendios forestales, así como para darles un correcto aprovechamiento a sus recursos.

La metodología empleada involucra la evaluación multicriterio, y el uso de sistemas de información geográfica para poder administrar toda la información obtenida, así como la identificación de variables de tipo climatológico, topográfico, antrópicos, así como también una identificación de la vegetación vigente en la zona y la clasificación de esta por el riesgo que podría tener en cuanto a un incendio forestal. Por otro lado, tenemos la clasificación de las zonas de muestreo, las cuales se determinaron por dos características en específico, las cuales son: el tipo de vegetación predominante en ciertas zonas, las cuales pueden tener un riesgo elevado de servir como combustibles en caso de un siniestro; y por último, zonas que tengan un registro (de acuerdo a CONAFOR y PROBOSQUE) de haber sufrido por un incendio forestal, o por lo menos, de tener algún indicio de fuego, como lo sería en el caso de árboles, tocones, troncos, suelo, entre otros, quemados.

Como resultado obtenemos una serie de tablas, acompañadas de graficas elaboradas a partir de estas, las cuales nos muestran el nivel de riesgo de incendio

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

forestal por variable, así como también un mapa que nos indica la ubicación de aquellas zonas con una mayor aglomeración de estas variables y el riesgo que podrían representar.

El trabajo de (Bañuelos, 2021) nos señala el índice de vulnerabilidad que presentan los bosques en general a los diversos tipos de plagas, señalando que, si estos se identifican a tiempo, se pueden prevenir. En este caso, se hace un énfasis en el uso de teledetección como una alternativa al análisis espacial remoto, debido que, en el propio artículo, se destaca el hecho de que, regularmente, los trabajos de campo, así como los materiales requeridos para estos y las labores que se tengan que llevar a cabo en dicha zona, tienden a ser costosos, de manera que no siempre se pueden costear los gastos para llevar a cabo algunos proyectos.

La metodología de este trabajo consta de la combinación de bandas RGB de imágenes satelitales en un sistema de información geográfica, en las cuales se puede denotar apropiadamente una variable de vegetación específica conocida como *arceuthobium globosum*, la cual está catalogada como una especie de planta parasitaria dentro del Área de Protección de Flora y Fauna “Nevado de Toluca”, de manera que se puede calcular una extensión aproximada en hectáreas de esta planta, así como el delimitar las regiones donde se encuentran.

El autor resalta la importancia de la teledetección y el análisis remoto como una herramienta fundamental hoy en día para poder tratar situaciones complejas y “más modernas”, pero, sobre todo, la importancia del actuar de las autoridades correspondientes, de manera que todo trabajo de investigación no quede solamente en el escrito, sino que se puedan contemplar planes y acciones que conlleven a la resolución de dichas problemáticas.

La última referencia considerada para este trabajo, del autor (Iveth, 2021), consta de el uso de los sistemas de información geográfica en el análisis de áreas vulnerables al fuego, considerando una perspectiva donde las herramientas para el análisis de ecosistemas no están tan desarrolladas como bien lo están para otras áreas del sector humanitario. En este caso, planteando la idea principal de aquellos

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

métodos no tan desarrollados para llevar a cabo un correcto análisis del sector ambiental, se plantean algunos inconvenientes en los métodos comúnmente establecidos para estos como lo viene siendo el análisis multicriterio, el cual señala que no se es muy prudente utilizar en caso de que se cuenten con diversas variables a considerar.

La metodología utilizada se conoce como PROMETHEE, la cual es una versión del análisis multicriterio, con la diferencia de que promete el poder trabajar con un mayor número de variables de forma ordenada y sistémica para poder llegar a una resolución concreta. De esta manera, la metodología pudo cumplir con el señalamiento de áreas vulnerables a incendios forestales, incluso, teniendo como evidencia de la eficacia de PROMETHEE, un incendio forestal presente durante la realización de aquella investigación, donde dicha zona que sufrió el siniestro estaba señalada como una de las zonas con mayor vulnerabilidad ante un incendio forestal.

Capítulo 3. Caracterización.

3.1. Topografía

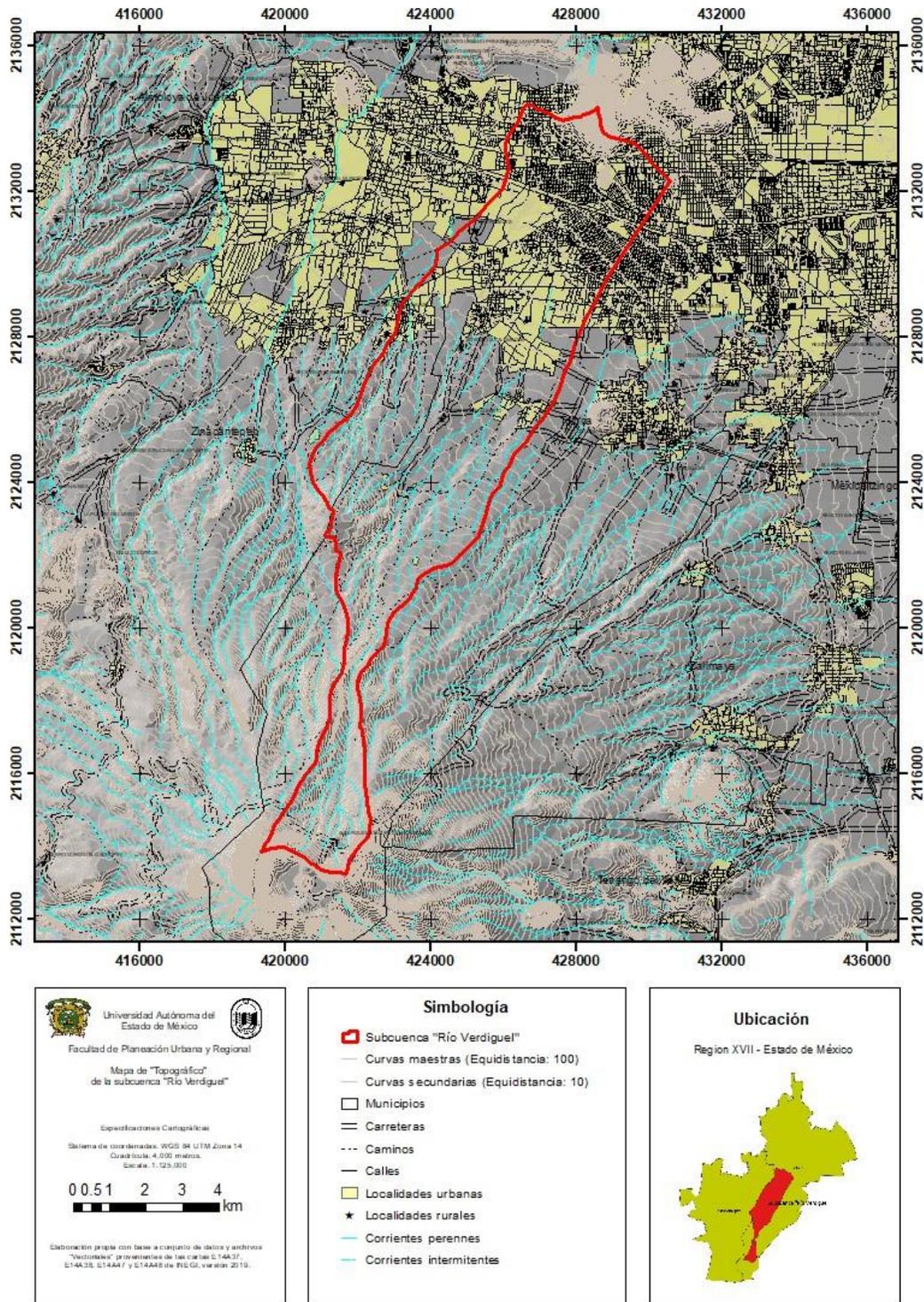
La subcuenca “Rio Verdiguél” se encuentra ubicada entre los municipios de Zinacantepec y Toluca, en lo que se denomina como la región décimo séptima del Estado de México (Región XVII), a su vez que forma parte del Área de Protección de Flora y Fauna “Nevado de Toluca”, la cual forma parte del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas de México. La delimitación de la zona de estudio se estableció en base a los parteaguas formados por el relieve del área en cuestión y por las elevaciones que podemos apreciar gracias a las curvas de nivel, siendo así, que la región adquiere el nombre del río o cauce principal que lo atraviesa, siendo este el “Rio Verdiguél”

La zona de estudio cuenta con una elevación de hasta 4400 msnm (metros sobre el nivel del mar), y una área de 7085.4 hectáreas, de las cuales un 30% del territorio total está cubierto por vegetación forestal y natural, siendo la mayor parte del área (cerca del 45%) esta recubierta por cultivos de maíz, los cuales son la principal fuente de ingresos dentro del aspecto socio económico de la zona en cuestión, teniendo por último el área urbana, la cual abarca aproximadamente un 25% del área total de la subcuenca. La subcuenca es un lugar bastante concurrido en donde convergen todo tipo de actividades socioeconómicas (actividades agrícolas y pecuarias), caminos y actividades turísticos (puntos de interés para visitantes, convergencia de caminos y carreteras), y la ubicación de áreas ejidales por toda la zona, siendo que estas se encuentran ubicadas a lo largo de la subcuenca entre las áreas de actividades agropecuarias y la masa forestal que podemos encontrar en el lugar.

Dentro del área también existe una gran afluencia de corrientes de agua y sistemas de drenaje, teniendo principalmente corrientes intermitentes, las cuales, como su nombre lo indican, solo tienen una fluctuación de agua en periodos específicos del año, temporada de lluvias, siendo que, la única corriente perenne dentro de la subcuenca, es decir, la única corriente de agua que tiene presencia de agua todo el año es nuevamente, la denominada como el “Rio Verdiguél”.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguél”

Mapa 1. Topografía.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "Vectoriales" provenientes de las cartas E14A37, E14A38, E14A47 y E14A48 de INEGI, versión 2019.

3.2. Geología.

La geología es la ciencia dedicada al estudio de la Tierra, su formación, composición, forma, procesos, de los cuales, estos impactan directamente en la formación de recursos, y en el caso de los humanos como especie, para su aprovechamiento y extracción, los cuales van desde el análisis del terreno para evitar accidentes, así como la correcta planificación de aprovechamiento para un recurso en especial, dado así, que en el caso de la subcuenca “Rio Verdiguél”, la geología, y la composición y forma del terreno en si pueden ser un factor muy importante en cuanto a la presencia de vegetación y recursos forestales, por lo tanto, podemos describir la geología de la subcuenca de la siguiente forma:

- Andesita (A): La andesita es una roca ígnea extrusiva y también subvolcánica que es de composición química intermedia, es decir que tiene entre el 52 al 63% de sílice (SiO₂), comúnmente suele tener textura porfídica y a veces afanítica, además, mineralógicamente se compone de anfíbol, plagioclasas y piroxenos principalmente. Estas rocas se presentan en superficie a manera de flujos de lava andesíticos alrededor de centros volcánicos. También ocurren a manera de diques que cristalizan muy cerca de la superficie. (Maldonado, Andesita, 2021)

- Extrusiva intermedia (Igei): Son todas aquellas rocas que se forman cuando la lava que es expulsada sobre la superficie o sobre la corteza terrestre cristaliza muy rápidamente. (Maldonado, Rocas ígneas, tipos, clasificación y ejemplos, 2021)

- Toba (T): La toba volcánica es una roca ígnea extrusiva (roca volcánica) que se forma por la consolidación y litificación de productos volcánicos que han sido expulsados desde un volcán típicamente por una erupción volcánica explosiva. (Maldonado, Toba volcánica, 2021)

- Brecha volcánica (Bv): Las rocas piroclásticas son las formadas por procesos de compactación o cementación de fragmentos. Existen las constituidas principalmente de bombas, que forman los aglomerados, y las constituidas principalmente de bloques, que son llamadas brechas volcánicas. (SGM, 2017)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

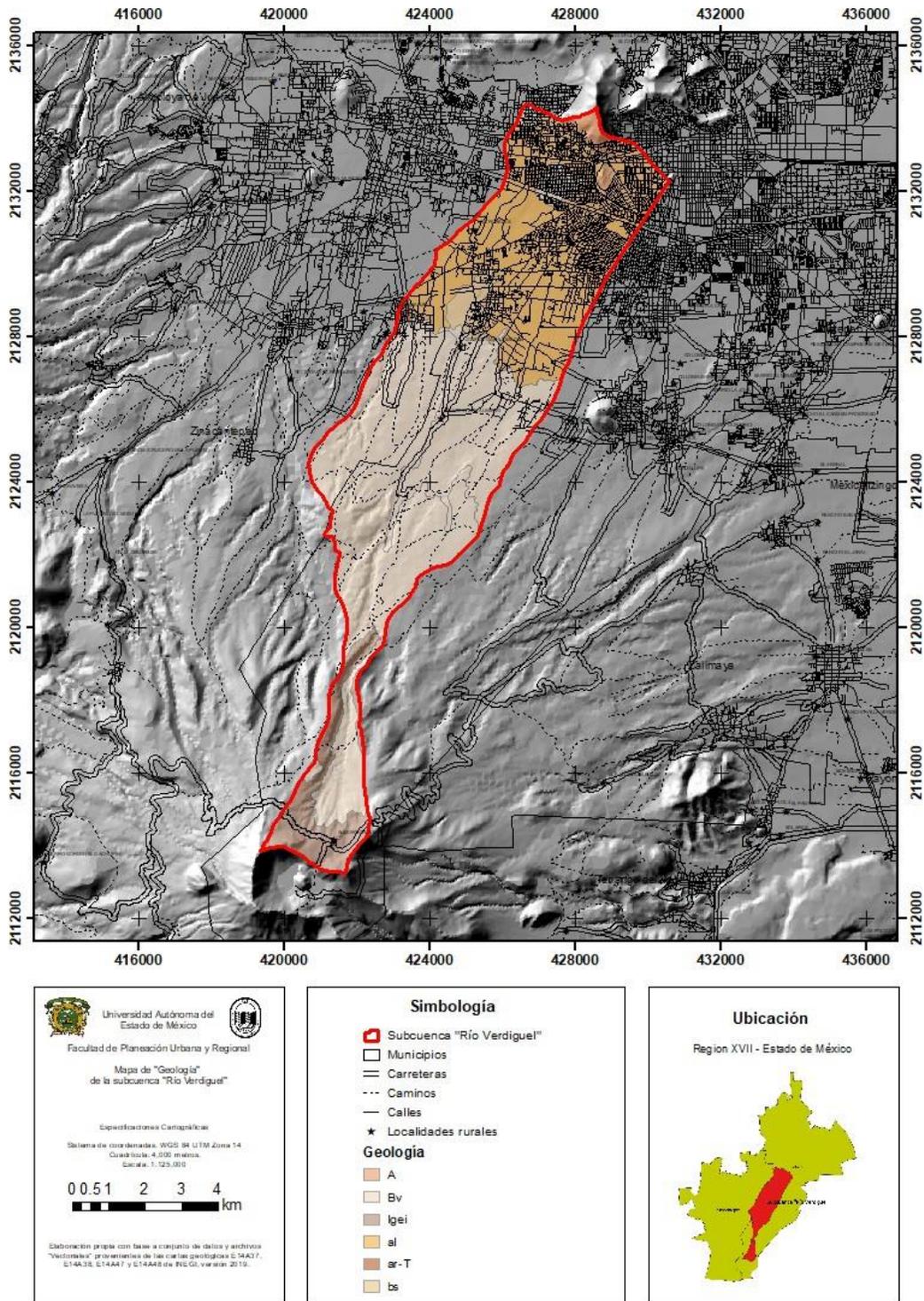
- Arenisca (ar): Las areniscas son todas las rocas sedimentarias detríticas que contienen al menos el 50% de granos del tamaño de arena (0.063mm a 2mm), su textura es variable desde bien sorteada a con sorteo pobre, mineralógicamente se compone de cuarzo y feldespatos en conjunto con fragmentos de cualquier tipo de roca. (Maldonado, Areniscas, 2021)

- Brecha (bs): La brecha es una roca sedimentaria clástica, lo que significa que está compuesta por grandes piezas de roca preexistente. Los clastos de la brecha, o fragmentos grandes, son afilados y de forma angular. Los clastos están cementados por una matriz de partículas más pequeñas y sedimentos que los unen. (Ricardo, 2023)

- Aluvial (al): Un suelo aluvial es un suelo sedimentario que se ha formado a partir de material que ha sido transportado por corrientes de agua. Aunque generalmente los suelos aluviales son considerados de origen fluvial, las corrientes de agua que transportan el sedimento pueden provenir también de la lluvia o de las marismas. Los suelos aluviales presentan un perfil poco estructurado, el cual está formado de materiales no consolidados a los que transportan las corrientes de agua y que acumulan en su superficie cierta cantidad de materia orgánica.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguél”

Mapa 2. Geología.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "Vectoriales" provenientes de las cartas geológicas E14A37, E14A38, E14A47 y E14A48 de INEGI, versión 2019.

3.3. Edafología.

La edafología es la ciencia que se encargada de estudiar los suelo, su estructura, elementos, composición, entre algunos otros aspectos. Desde este punto de vista, podemos incluso comprender que la edafología comprende al suelo, no como un recurso inerte, sino más bien , lo comprende como un recurso biótico cuyo impacto e importancia en el entorno son cruciales para la formación de este. En este caso, la subcuenca “Rio Verdiguel” depende directamente del suelo principalmente para la formación y crecimiento de vegetación, siendo las características de este las que proveen de los elementos necesarios para tener vegetación y un recurso forestal. La composición del suelo de la zona de estudio es la siguiente:

- Cambisol eutríco (Be): Los suelos cambisoles son originados sobre alteraciones de materiales diversos de rocas. Son relativamente maduros, de color pardo amarillento o rojo intenso, sin otros horizontes de diagnóstico, para paisajes jóvenes o en zonas templadas, en todas las morfologías, terrenos planos a montañosos, climas o vegetación. El tipo eutríco se caracteriza por la formación de minerales de arcilla y óxidos de hierro. (Pineda, 2024)

- Feozem háplico (Hh): Suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas o zonas muy desérticas. Es el cuarto tipo de suelo más abundante en el país. Se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave, rica en materia orgánica y en nutrientes. Los feozem son de profundidad muy variable. Cuando son profundos se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para la agricultura de riego o temporal, de granos, legumbres u hortalizas, con rendimientos altos. El uso óptimo de estos suelos depende en muchas ocasiones de otras características del terreno y sobre todo de la disponibilidad de agua para riego. (SEMARNAT, Edafología, 2024)

- Litosol (I): Son suelos muy delgados, de un espesor inferior a 25 cm y antes de llegar a la capa rocosa pueden ser más profundos, con alto contenido de rocas

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

o grava. Es uno de los grupos de suelos que deben su formación a condiciones topográficas, debido a que se crean en zonas montañosas con pendientes pronunciadas. Así como también a orillas de ríos que depositan más grava que material fino o en planicies con base rocosa calcárea. (Castro, Litosol: características y usos, 2020)

- Fluvisol eutrico (Je): El término fluvisol deriva del vocablo latino "fluvius" que significa río, haciendo alusión a que estos suelos están desarrollados sobre depósitos aluviales. Los suelos fluvisoles se encuentran en cumbres y en laderas abruptas como los Regosoles y son suelos de derivados de aluviones recientes. Contiene menos del 18% de arcilla y más del 65% de arena. El material original lo constituyen depósitos, predominantemente recientes, de origen fluvial, lacustre o marino. Se encuentran en áreas periódicamente inundadas, a menos que estén protegidas por diques, de llanuras aluviales, abanicos fluviales y valles pantanosos. Aparecen sobre todos los continentes y cualquier zona climática. (SEMARNAT, Edafología, 2024)

- Regosol eutrico (Re): Se trata de suelos cuya formación está relacionada con su posición topográfica, similar a como ocurre con los Litosoles (leptosoles), pero se diferencian de estos en que poseen una profundidad mayor a los 25 cm. Los regosoles están formados por material fino no consolidado debido a que se desarrollan sobre rocas deleznable (que se deshacen). Se desarrollan en zonas de montaña, así como en sedimentos de ríos y marinos, en todo tipo de climas y en todas partes del mundo. Son más abundantes en zonas secas cálidas y frías. (Castro, Regosol: características y usos, 2020)

- Andosol humico (Th): Un andosol es un suelo que se forma sobre cenizas, rocas, vidrios y otros materiales de origen volcánico. También se denomina suelo de cenizas volcánicas y es de color negro. Posee un alto contenido de materia orgánica y tiene una gran capacidad de retención de agua, así como de intercambio catiónico. La formación del andosol está relacionada con una rápida transformación química de las rocas volcánicas en suelo. Asimismo, también depende de la

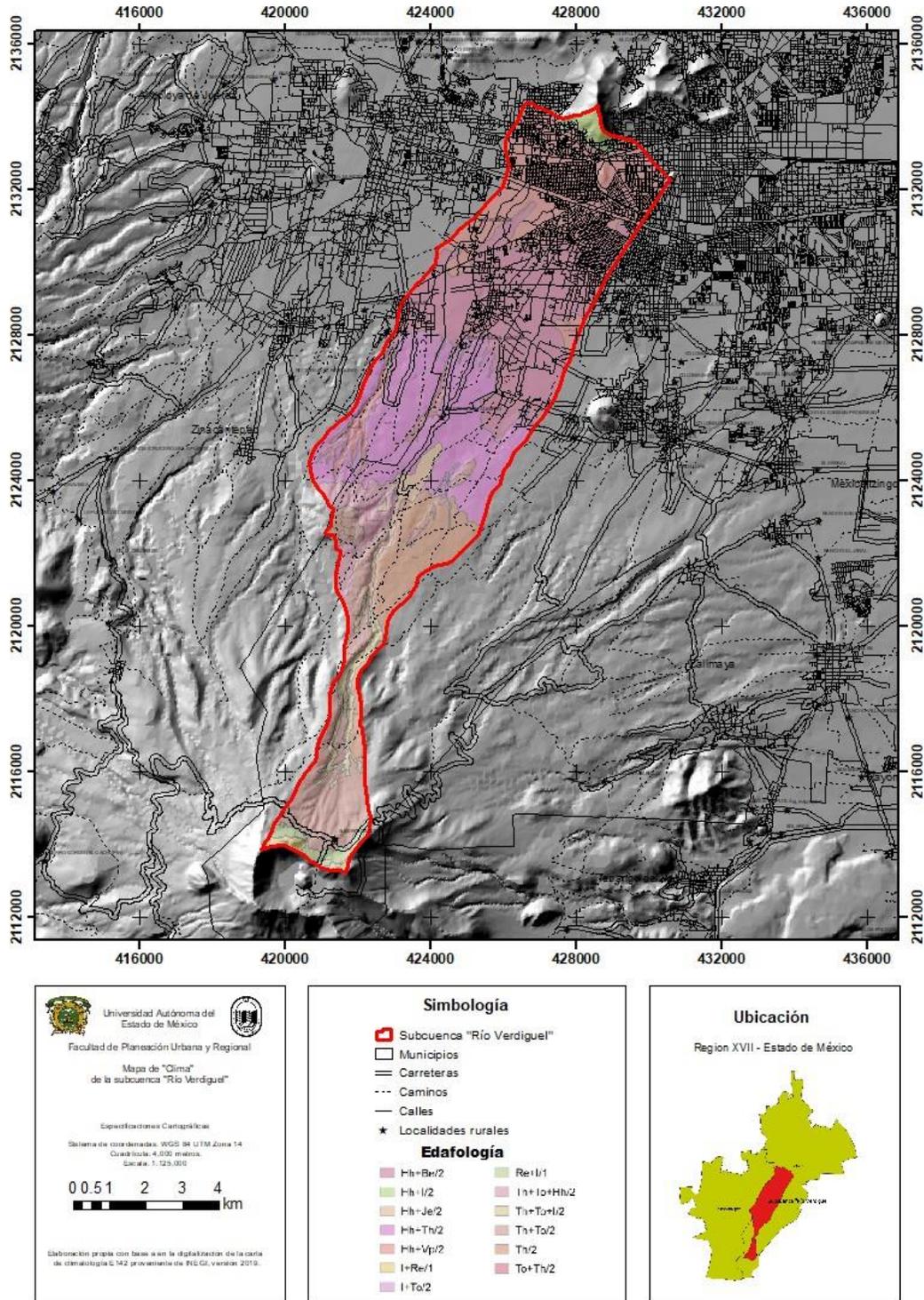
Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

porosidad y permeabilidad del suelo, y de la presencia de materia orgánica. (Gómez, 2023)

- Vertisol pelico (Vp): Suelos de climas templados y cálidos, especialmente de zonas con una marcada estación seca y otra lluviosa. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Se caracterizan por su estructura masiva y su alto contenido de arcilla, la cual es expandible en húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas, y que por ser colapsables en seco pueden formar grietas en la superficie o a determinada profundidad. (SEMARNAT, Edafología, 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguél”

Mapa 3. Edafología.



Fuente: Elaboración propia con base a en la digitalización de la carta de climatología E142 proveniente de INEGI, versión 2019.

3.4. Clima.

Definir el clima requiere entender los valores de los diferentes componentes. Elementos como precipitación, nubosidad, insolación, temperaturas, vientos, humedad y presión atmosférica deben tener una duración de por lo menos 30 años para considerarse como determinantes en las características climáticas de una zona. Estos elementos están condicionados por factores climáticos como la latitud, la altitud y la ubicación geográfica. Hay que tomar en cuenta que todos estos agentes están regidos por la forma del planeta y la inclinación de su axis, que hace que la incidencia de los rayos solares sea desigual en las diferentes regiones. (Rodríguez, 2023)

- Templado subhúmedo:

Conocido en este caso como clima templado subhúmedo de montaña, este tipo de entornos se caracterizan por mantener temperaturas de entre 14°C a 20°C y teniendo precipitaciones que van desde los 700 mm a 1200 mm al año (Salcedo, 2023). La presencia de estos va a depender en parte de la altitud, siendo que en regiones tropicales pueden encontrarse climas de este tipo desde los 1000 hasta los 2000 msnm, mientras que en climas subalpinos pueden ir desde los 3000 hasta los 4000 msnm, aunque a esto cabe mencionar que también influye bastante la forma del relieve, vientos alisos, vegetación, precipitaciones, entre algunos otros. Este tipo de clima está ubicado en la zona más baja de la subcuenca, encontrándose a una altura de entre 2700 a 2900 msnm.

- Templado semifrío subhúmedo:

Este clima cuenta con una temperatura media anual de entre -2°C y 7°C, el régimen de lluvias es de verano, es isotermal y la temperatura del mes más caliente se presenta antes del solsticio de verano (García, “VISUALIZADOR WEB DE LAS

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

ZONAS SUSCEPTIBLES A INCENDIOS FORESTALES EN EL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA NEVADO DE TOLUCA”, 2018).

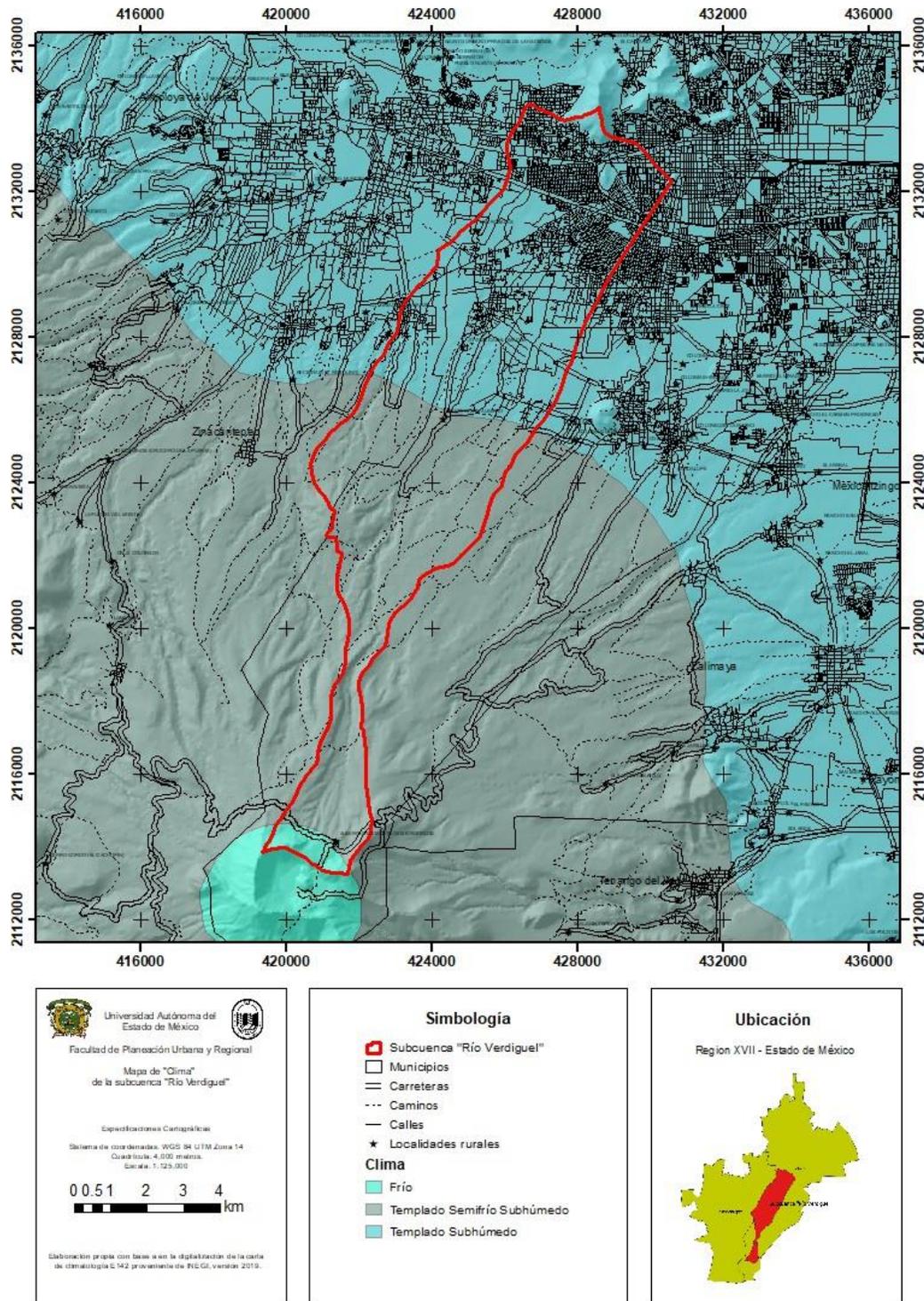
El área que abarca este clima es principalmente de carácter boscoso, siendo que aquí es donde se ubica la mayor parte de la vegetación, dando paso a especies que solo crecen bajo ciertas condiciones de elevación y temperatura como cedros, encinos, oyameles, entre algunos otros. En el caso del área de estudio, podemos identificar el clima templado semifrío subhúmedo entre los 2900, hasta los 4100 msnm.

- Frio:

Cuenta con temperaturas medias anuales inferiores a los 0°C y temperaturas máximas de apenas 10°C. En el caso de la subcuenca “Rio Verdiguél”, podemos considerar la zona como tundra, que corresponde a un área abierta y llana en cuyo subsuelo no se desarrollan plantas. En su suelo crecen musgos, gramíneas y líquenes (Rodríguez, 2023). Este es el tipo de clima que menos predomina en la zona de estudio, encontrándose a una altitud de 4100 a 4400 msnm.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdigué”

Mapa 4. Clima.



Fuente: Elaboración propia con base a en la digitalización de la carta de climatología E142 proveniente de INEGI, versión 2019.

3.5. Uso de suelo y vegetación.

El uso de suelo y vegetación es la información geoespacial de Interés Nacional que muestra la distribución del uso del suelo agrícola, de la vegetación natural e inducida del país, además indica el uso pecuario y forestal y otros usos que se presentan en el territorio relacionados con la cubierta vegetal. El uso del suelo y vegetación se clasifica en agrícola, pecuario, forestal y otros usos, según el tipo de aprovechamiento que se le da al terreno. (INEGI, Uso de suelo y vegetación, 2024)

El uso del suelo y la vegetación que podemos encontrar en la subcuenca “Rio Verdiguél” es la siguiente:

- Uso agrícola:

Caracterizada por la agricultura de temporal permanente, es la principal actividad agrícola que se lleva a cabo dentro de la subcuenca, teniendo como cultivo principal la siembra de maíz, sin embargo, esta no descarta otros tipos de cultivos como vegetales y tubérculos que emplean. Este tipo de agricultura depende directamente de las condiciones del suelo, pero principalmente de las precipitaciones, debido a que esta es la principal fuente de agua para mantener dichas actividades. Aquí podemos encontrar cultivos de carácter anual (es decir, que la cosecha se realiza solo una vez al año), y de carácter permanente (todo el año se siembran y se cosechan de forma indeterminada cierto tipo de vegetación).

- Uso pecuario:

El uso pecuario se refiere a la capacidad del terreno de mantener especies ganaderas como vacas, borregos, cabras, entre algunos otros, siendo su principal característica la de mantener especies vegetales como forraje o pastizales de los cuales pueda pastar y alimentarse el ganado. Dentro de la zona de estudio, podemos encontrar dos tipos de pastizales, el primero son pastizales naturales

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

pertenecientes al género “*Muhlenbergia*”, los cuales generalmente abundan en las zonas más altas del área, aunque se pueden encontrar en toda la zona; la segunda son pastizales inducidos, los cuales no son más que la misma vegetación como zacatones y pastizales que podemos encontrar en la zona, con la respectiva diferencia de que esta vegetación no siempre predominó en el lugar en el cual se encuentra ahora, pues en las zonas en las que están ubicadas actualmente, existió otro tipo de vegetación, la cual fue desplazada con el tiempo generalmente gracias a actividades humanas por medio de incendios o tala forestal, con el fin de abrir el paso a actividades pecuarias.

- Uso forestal:

Son las zonas donde podremos encontrar especies arbóreas en abundancia, así como actividades que van directamente ligadas a los árboles, ya sea por su uso y aprovechamiento de su madera y derivados para fines comerciales y económicos, así como su uso directo o indirecto para la conservación del suelo, refugios para fauna silvestre, recarga de acuíferos, entre algunas otras características. Aquí podremos encontrar bosques artificiales, conformados principalmente cedro blanco, los cuales son sembrados para actividades de aprovechamiento forestal como las anteriormente descritas, o para cualquier otro propósito como actividades de reforestación o actividades agroecológicas. Por otro lado, tenemos los bosques naturales, los cuales son aquellas masas forestales que mantienen su vegetación intacta, sin haber sufrido de alteraciones, desplazamientos, y que no fueron sembrados artificialmente, en las cuales, dentro de la zona de estudio, predominan los ailes y los encinos. Por último, tenemos los bosques caducifolios, los cuales, además de entrar en la categoría de bosques naturales, tiene la característica de adaptarse a los cambios de estaciones a lo largo del año, siendo la pérdida de sus hojas en otoño en invierno su mayor denominación; el mayor porcentaje de esta población está conformada por bosques de pino y oyamel.

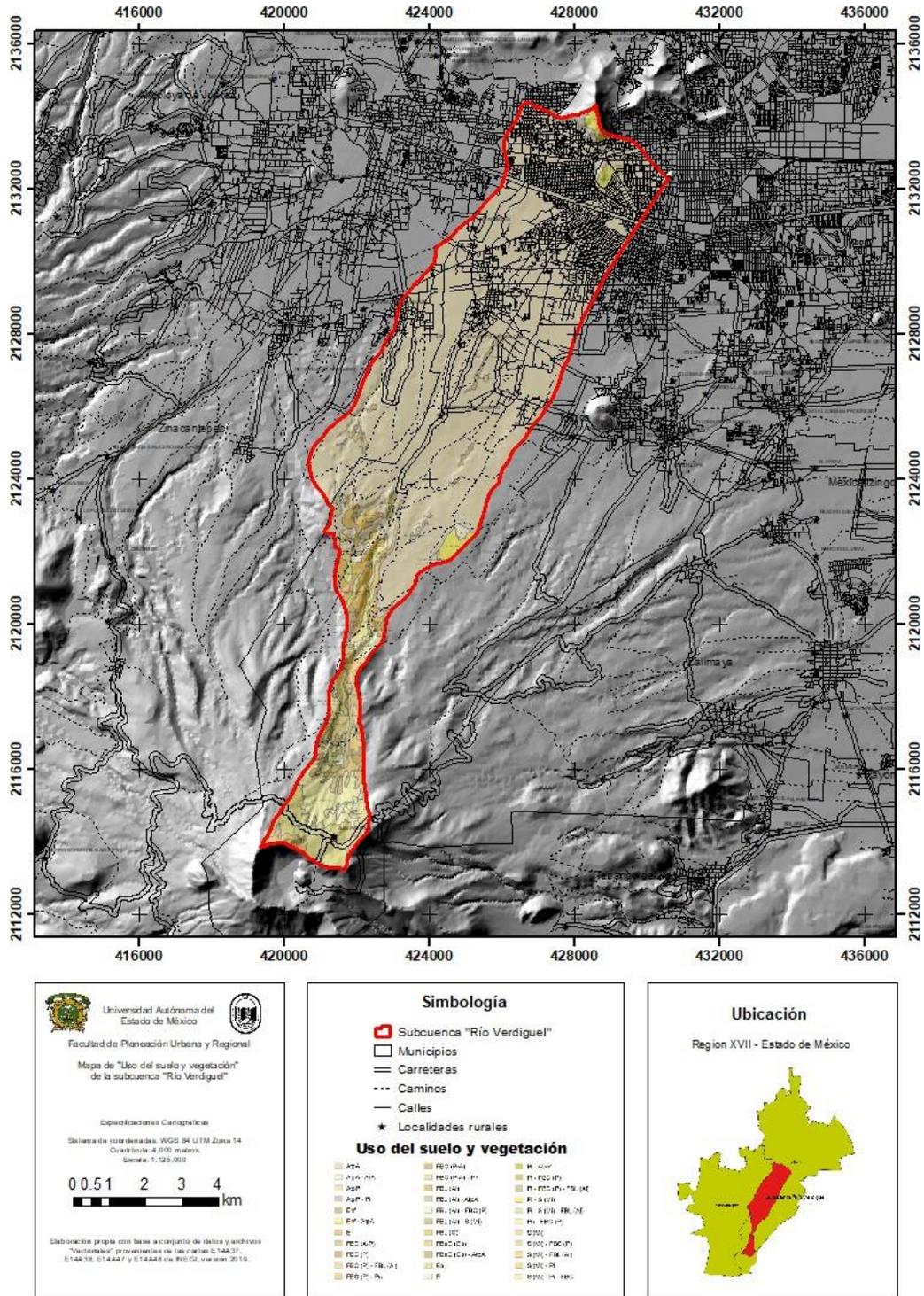
Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

- Asociaciones especiales de vegetación:

Se trata de conjuntos vegetales los cuales contienen especies florales especiales, ya sea que estemos hablando de vegetación secundaria como matorrales (los cuales son el tipo de vegetación especial que más abunda en la zona de estudio, debido a su altitud y al tipo de actividades que se llevan a cabo en esa zona), o los diversos tipos de plantas que se encuentran en el Nevado de Toluca como lo podrían ser “*Penstemon campanulatus*”, “*Castilleja moranensis*”, “*Cerastium nutans*”, por mencionar algunos.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguel”

Mapa 5. Uso de suelo y vegetación.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "Vectoriales" provenientes de las cartas E14A37, E14A38, E14A47 y E14A48 de INEGI, versión 2019.

Capítulo 4. Marco metodológico.

Para la elaboración de un mapa de zonas propensas a incendios forestales, se consultaron diversas fuentes de información con respecto a las variables consideradas como pertinentes en cuanto a su influencia dentro de los factores que provocan o propician un incendio. En conjunto con lo anterior mencionado, la metodología utilizada se basa en un esquema de toma de decisiones, el cual, requiere la correcta interpretación y “depuración” de la información de las variables a continuación mencionada. El siguiente mapa mental nos da una representación general de todo el panorama considerado para esta labor, sin embargo, dentro de este se desglosan otro conjunto de acciones, operaciones y factores a considerar para la elaboración de este trabajo.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

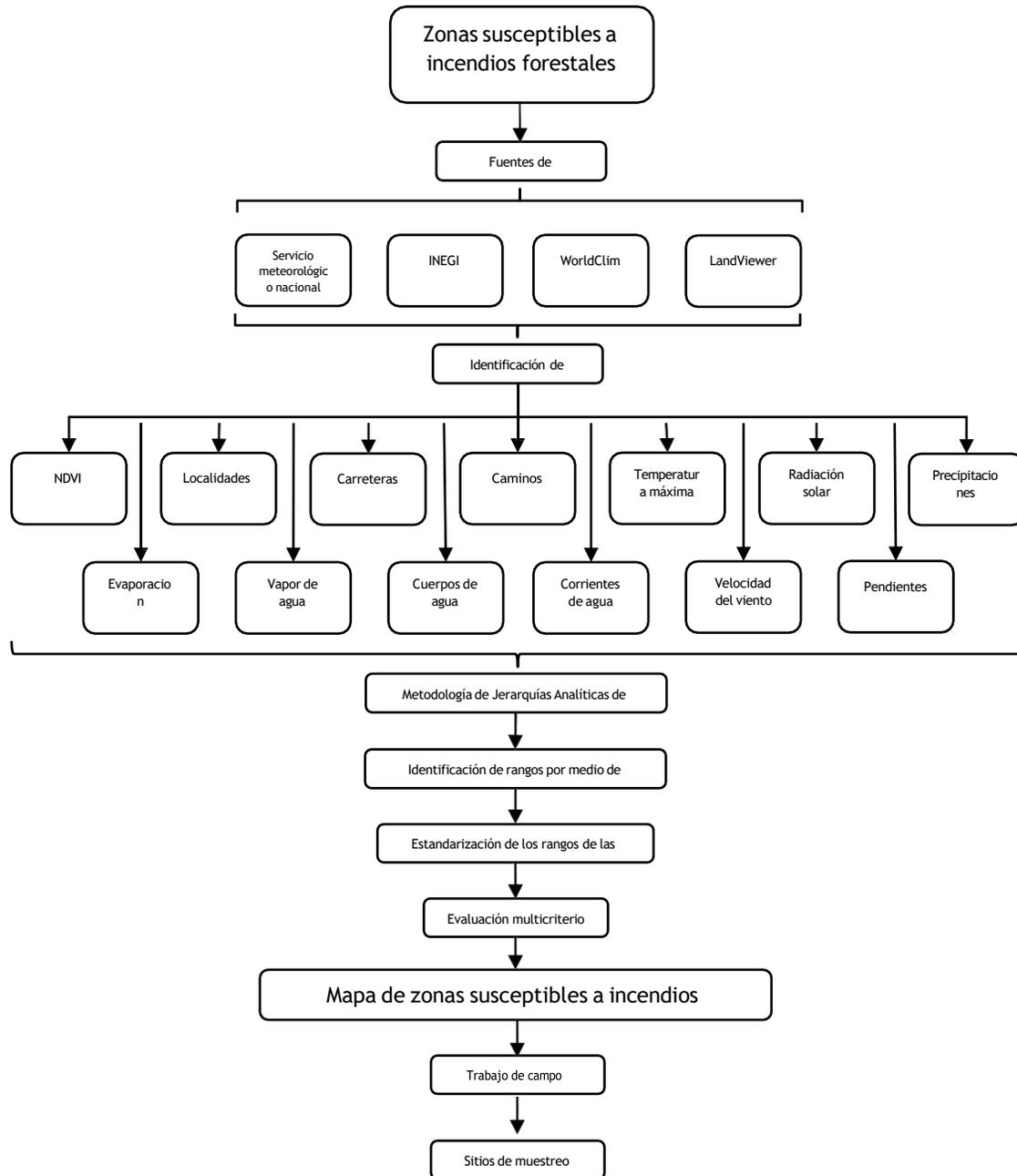


Tabla 1. Matriz metodológica. (Fuente: Elaboración propia)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

4.1. Fuentes de información.

Uno de los principales propósitos de este trabajo es el hacer consulta y uso de otro tipo de fuentes de información (véanse ejemplos de archivos vectoriales o ráster de fuentes comúnmente utilizadas como páginas de gobierno o registros climáticos institucionales locales), esto con el fin de poder generar resultados, en cuanto a la temática del problema, más precisos y actualizados.

4.1.1. WorldClim

WorldClim es una base de datos que contiene datos climáticos y meteorológicos globales de alta resolución espacial. Estos datos se utilizan para mapear y modelar espacialmente. Son proporcionados para su uso en investigaciones y actividades relacionadas, e incluso para el uso en análisis y proyectos propios. WorldClim ofrece mapas, gráficos, tablas y datos sobre el clima global. (WorldClim, 2022)

Para este trabajo, se realizó una consulta y descarga del registro histórico climático de WorldClim acerca de imágenes satelitales con una resolución de un kilómetro cuadrado en cuanto al tamaño del pixel (30 seconds resolution)

Para la obtención de aquellos mapas realizados con información en base a las imágenes satelitales de WorldClim, y a pesar de tener un valor y peso diferente una de otra en cuando a la suma final en el mapa de zonas propensas a incendios forestales, se aplicó el mismo procedimiento por igual en todas y cada una de ellas, esto, debido a la naturaleza de los datos, y a su procesamiento a través de los SIG, el cual consta de lo siguiente:

Los datos de las variables temperatura máxima, precipitación, radiación solar, velocidad del viento, y vapor de agua, se obtuvieron de la página World Clim, del apartado del registro histórico climático (Historical Climate Data).

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Una vez descargados los archivos “.ZIP” de cada una de las variables consideradas para el presente trabajo, se guardan en una careta digital con el mismo nombre de la variable para su fácil y practica visualización y manipulación, para posteriormente descomprimir cada uno de los archivos y revelar 12 imágenes satelitales, una por cada mes del año, las cuales reflejan un promedio de las condiciones climáticas en dicho mes. Una vez descomprimidas, se seleccionan aquellas imágenes que empatan con la temporada de incendios forestales en el Estado de México, o en este caso, del 4to mes (abril).

Las imágenes seleccionadas se añaden al sistema de información geográfica QGis (versión 3.14.0), en donde una vez procesadas por el programa, se proceden a cortar a una medida aproximada de la zona de estudio, en este caso, a una zona ligeramente más grande, debido a que, por el tamaño del pixel, no se es posible lograr un corte preciso de estas imágenes bajo estas condiciones.

Posteriormente, cada una de las imágenes se añadió al sistema de información geográfica ArcMap (versión 10.5), en donde se hizo uso de la herramienta “Interpolación IDW”, con el fin de obtener una imagen más uniforme para su posterior corte, y a su vez, establecer un adecuado tamaño de pixel (tamaño del pixel: 10x10) para el posterior uso de las imágenes.

4.1.2. INEGI

El instituto nacional de estadística y geografía (INEGI), al tener un registro acerca de los recursos naturales en México, se volvió una herramienta fundamental para la realización del presente trabajo, siendo este la principal fuente de aquellos archivos vectoriales. Sin embargo, La presencia de la información de dicha fuente se ve reducida debido a una falta de actualización en algunas de sus cartas de mapas temáticos, por lo que solo se usaron aquellos archivos que no conllevan un cambio tan radical con el tiempo, como bien lo podrían ser caminos, cuerpos y corrientes de agua, entre algunos otro.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

Para la obtención de los mapas de aquellas variables con fuente de INEGI, y al igual que al conjunto anteriormente mencionado, se llevó a cabo un procedimiento idéntico entre cada una de ellas, aunque con la notable diferencia de sus diferentes aportes al mapa final de zonas propensas a incendios forestales, y consta de lo siguiente:

Para las variables de localidades, camino, carreteras, cuerpos de agua, corrientes perennes e intermitentes, se realizó una descarga de datos de las cartas topográficas escala 1:50,000 E14A37, E14A38, E14A47, y E14A48, con la finalidad de obtener datos con la mayor precisión posible, a la vez que abarcamos todo el territorio de la zona de estudio, el cual se encuentra dividido en las cartas topográficas anteriormente mencionadas. Una vez descargadas y extraídas del archivo “.ZIP”, se añadieron al programa SIG “QGis”, se unieron entre si aquellos elementos de la misma categoría, y se llevó a cabo un recorte final de dicha unión a la zona de estudio específica para obtener solo aquellos datos requeridos para la identificación de zonas propensas a incendios forestales.

4.1.3. LandViewer.

LandViewer es un asistente SIG rápido y efectivo lanzado por EOS Data Analytics, una compañía con sede en California. Las grandes ventajas del instrumento web son un catálogo de imágenes de satélite que se renueva constantemente, ajustes para el procesamiento de datos que se actualizan sobre la marcha y un conjunto de herramientas avanzadas que llevan a cabo análisis de teledetección en tiempo real.

Los proveedores de imágenes de satélite de todo el mundo recopilan a diario datos de teledetección de todos los satélites disponibles y se los ofrecen a los responsables de los sectores público y privado para muy diversas aplicaciones, desde defensa a planificación del uso del suelo. Tras eso, se personalizan y analizan con instrumentos adicionales para poder ofrecer soluciones. (Geotecnia, 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

La principal razón del uso de otra fuente de imágenes satelitales, se debe al hecho de que, en el caso de WorldClim, las imágenes satelitales del registro histórico climático, son imágenes propias de dicha materia, es decir, los datos son muy propios de materia climática, y a pesar de que dicha información e imágenes se pueden trabajar para llegar a diferentes conclusiones, el tener imágenes satelitales puras y compuestas por sus respectivas bandas espectrales, nos proporciona una mayor ventaja para poder identificar elementos en el espacio, y específicamente hablando, en la zona de estudio.

4.1.4. Servicio Meteorológico Nacional.

El Servicio Meteorológico Nacional (SMN), proveniente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), no ofrece un registro histórico climático del territorio mexicano, por medio de sus estaciones climatológicas, las cuales contienen información acerca de diversos fenómenos y eventos climáticos (temperatura, evaporación, sequías, tormentas eléctricas, etc). Sin embargo, durante la realización de este trabajo, y al ser la primera fuente de consulta, se llegó a la conclusión de que algunas de las estaciones climatológicas han dejado de obtener registros desde hace años, o en intervalos irregulares, por lo cual, no se consideraron dichas estaciones como una fuente fiable de datos (siendo esta la justificación principal para hacer uso de imágenes satelitales más actualizadas). Aunque, y gracias a que se el registro del SMN contiene variables que no se pudieron encontrar tan fácilmente en otras fuentes, se realizó una excepción con los datos para el mapa de “Evaporación”, en donde se identificaron aquellas estaciones meteorológicas que colindaban con la zona, para posteriormente localizar y mapear las coordenadas de dichas estaciones con un conjunto de datos sobre la variable en cuestión, de manera que se pudiese hacer uso del SIG “QGIS” y llevar a cabo una interpolación IDW, el cual nos muestra un mapa con aquellas zonas donde se genera un mayor porcentaje de evaporación con respecto a los puntos anteriormente mencionados.

4.2. Variables.

Las variables a continuación descritas, se eligieron debido a su importancia y presencia en cuanto a fenómenos de incendios forestales (descritos en capítulos anteriores), tomando en cuenta, tanto factores de carácter natural, así como aquellos de carácter antropogénico.

4.2.1. Vegetación

Como se mencionó anteriormente, existe algo conocido como el “Triangulo del fuego”, del cual nos muestra los 3 elementos base (combustibles, fuente de calor y oxígeno) o necesarios para poder generar un incendio; entre dichos elementos destacan los combustibles, incluso podría decirse que de los 3 es el más importante, es la base para un incendio, pues si no hay nada que quemar, no puede iniciarse un incendio. En este caso, la vegetación juega un papel importante por dos factores principalmente: Dependiendo del tipo de vegetación es que se puede llegar a dar un incendio, o dicho de otra manera, no toda la vegetación tiene la misma capacidad para arder, esto debido a los porcentajes de humedad que estas puedan contener, no es lo mismo tener vegetación vigorosa con altas concentraciones de humedad a vegetación seca que puede ser utilizada como biocombustible.

El segundo factor importante en la vegetación es su extensión, debido a que es complicado lograr identificar dicha característica con seguridad pues, en el caso de esta variable, la vegetación, y el uso del suelo en general, cambian con regularidad, ya sea que estemos hablando de la época del año, vegetación temporal o establecida, y en algunos otros casos, las actividades que se lleven a cabo en alguna zona en específico, como las agropecuarias, de las cuales, son unas de que más tienden a modificar el suelo y la vegetación existente a sus alrededores, ya sea que hablemos de deforestación, cultivos, cambio del suelo por el paso y contaminación por heces de algunos animales, entre algunas otras acciones por parte de la mano humana.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Este tipo de situaciones propicia a una falta de información precisa en fuentes y herramientas de búsqueda para la prevención de un incendio forestal, pues en páginas del gobierno mexicano como INEGI, podemos encontrar cartas de uso de suelo y vegetación con información desactualizada, incluso desde hace décadas. Afortunadamente, y como uno de los motivos principales de este trabajo, la teledetección ha demostrado ser una herramienta extraordinaria y muy eficaz, no solo al brindarnos información de zonas de difícil acceso, sino también, al poder llevar un registro de la temporalidad de una gran cantidad de zonas, por lo que, casi sin importar la época del año (véanse algunos factores climáticos como porcentaje de nubosidad o existencia de nieve), podemos llevar un registro del cambio en la vegetación a través del tiempo.

Para la obtención de este mapa, y para la identificación de aquellas zonas con vegetación considerada como combustible, se hizo uso de los elementos a continuación mencionados.

	Bandas	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) February 11, 2013	Banda 1 - Aerosol costero	0.43 - 0.45	30
	Banda 2 - Azul	0.45 - 0.51	30
	Banda 3 - Verde	0.53 - 0.59	30
	Banda 4 - Rojo	0.64 - 0.67	30
	Banda 5 - Infrarrojo cercano (NIR)	0.85 - 0.88	30
	Banda 6 - SWIR 1	1.57 - 1.65	30
	Banda 7 - SWIR 2	2.11 - 2.29	30
	Banda 8 - Pancromático	0.50 - 0.68	15
	Banda 9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

	*Banda 10 – Infrarrojo térmico (TIRS) 1	10.60 - 11.19	100
	*Banda 11 - Infrarrojo térmico (TIRS) 2	11.50 - 12.51	100

Tabla 2. Bandas espectrales de imágenes satelitales Landsat 8. Fuente: (Ariza, 2013)

4.2.1.1. Bandas espectrales

Se deduce que podemos describir cualquier tipo de energía radiante en función de su longitud de onda o frecuencia. Aunque la sucesión de valores de longitud de onda es continua, suele establecerse una serie de bandas en donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar. La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético. Comprende en un continuo, desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos x), hasta las kilométricas (telecomunicaciones). Es el modo peculiar en el que una determinada cubierta refleja o emite energía a distintas longitudes de onda. Su forma característica de radiar energía sería la base para discriminar dicha cubierta. Son muy útiles para interpretar más fielmente la imagen, por cuanto relacionan los valores adquiridos por el sensor con las medidas de laboratorio. (Chuvieco, 1995)

La combinación específica de estas bandas puede dar como resultado la “discriminación” de ciertos elementos en el entorno, ya sea que estemos hablando de agua, humedad, suelo, minerales, o en este caso, vegetación.

4.2.1.2. NDVI

Los índices espectrales son formulas establecidas específicamente para las bandas de imágenes satelitales del sistema Landsat (véase Landsat 8 en este caso), en las cuales, dependiendo de la formula, podemos llegar a discriminar algún elemento en particular del entorno. Por lo que, para este trabajo se hizo uso del índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI por sus siglas en ingles).

El NDVI es el más común de varios índices de vegetación derivados de observaciones en imágenes de percepción remota. Se basa en la relación entre la cantidad de luz reflejada (reflectancia) por la superficie terrestre en dos regiones del espectro electromagnético, luz roja e infrarroja (infrarrojo cercano). Valores bajos de luz reflejada en el color rojo, combinados con alta reflexión en el infrarrojo, indican una mayor actividad fotosintética o cantidad y densidad de plantas verdes. El NDVI tiene aplicaciones múltiples, sobre todo si se cuenta con observaciones en distintas fechas (series de tiempo). Mediante el análisis de estas series de tiempo se facilita el monitoreo de la vegetación y detección de cambios en la cobertura/uso del suelo, el seguimiento de estado de los cultivos agrícolas, caracterización de la fenología de la vegetación y el seguimiento de fenómenos como la sequía. (INEGI, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), 2022)

Para la correcta aplicación de esta fórmula, en un SIG (en este caso QGIS), deberemos introducir las bandas B4 (Rojo) y B5 (Infrarrojo cercano o NIR), para posteriormente abrir la calculadora ráster y efectuar la fórmula que se muestra a continuación.

$$NDVI = \frac{Nir - R}{Nir + R}$$

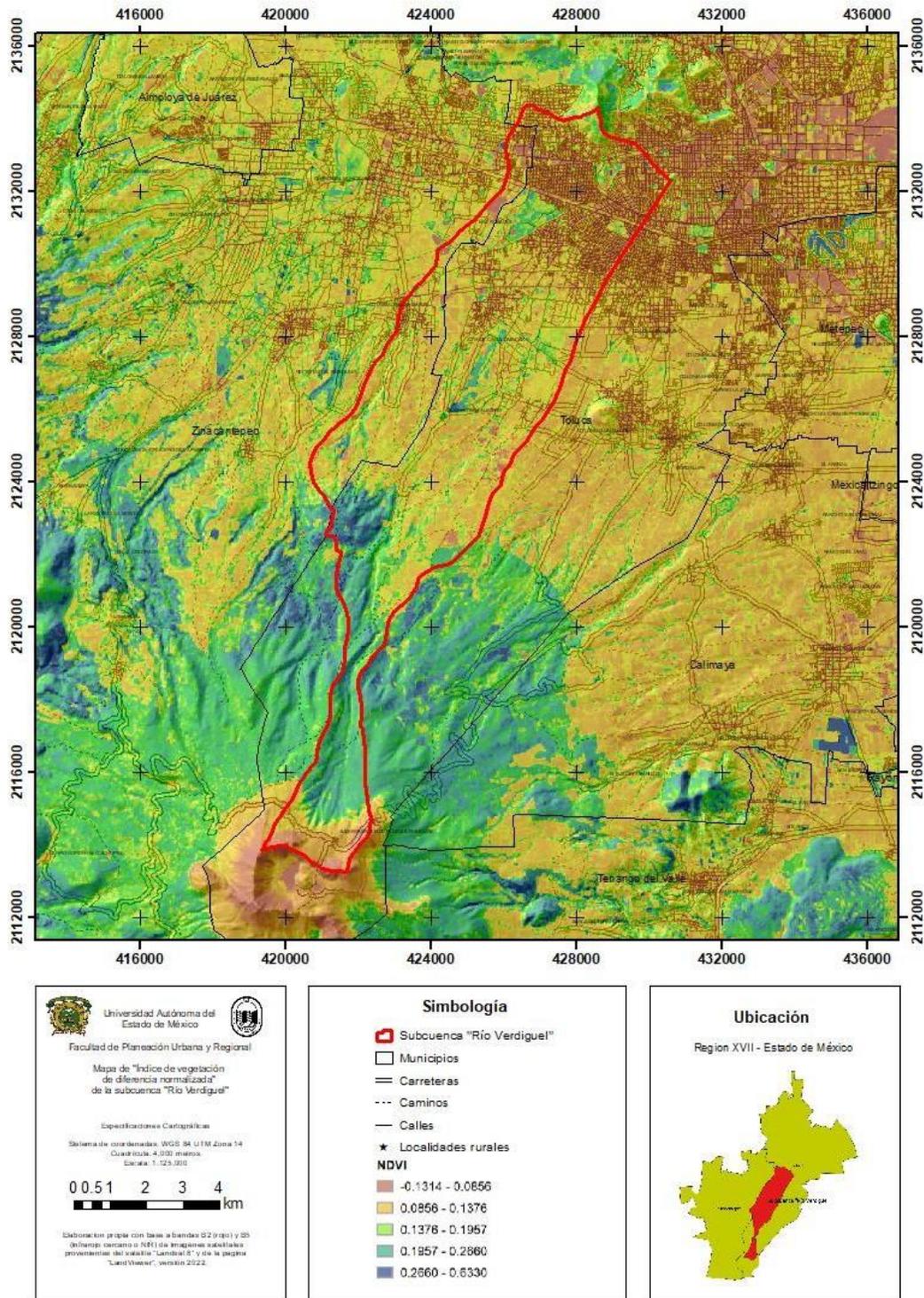
Formula 1. índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

Una vez efectuada dicha operación, como resultado obtendremos una imagen donde resaltarán o se discriminarán aquellas áreas con vegetación, siendo que también podremos identificar entre vegetación seca, vegetación vigorosa o abundante, vegetación de actividades agrícolas, y por último, aquellas zonas que carecen de vegetación, obteniendo así, aquellas zonas que podrían servir como fuente de combustible en caso de algún incendio forestal.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca "Río Verdiguél"

Mapa 6. Índice de vegetación de diferencia normalizada.



Fuente: Elaboración propia con base a bandas B2 (rojo) y B5 (infrarrojo cercano o NIR) de imágenes satelitales provenientes del satélite "Landsat 8" y de la página "LandViewer", versión 2022.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

4.2.2. Localidades, caminos y carreteras

Probablemente la principal causa de incendios forestales más allá de los propios fenómenos naturales, y cuya presencia se ha ido expandiendo cada vez más a través de las áreas ricas en vegetación, el factor antrópico ha estado implicado en una gran cantidad de estos fenómenos, ya sea que estemos hablando de incendios intencionados, aquellos provocados por algún descuido. Estas variables funcionan como el segundo elemento base del triángulo de fuego (fuente de calor), por lo que a continuación, se describe la participación de dichas variables como principales causantes de incendios forestales.

Localidades:

La presencia de infraestructura puede conllevar a ciertos riesgos dentro de su entorno, y más aún al estar rodeado de vegetación, pues ya sea que hablemos de una vivienda bien equipada en cuanto a servicios, o de una estructura provisional para otro tipo de actividades (como lo podrían ser cobertizos viviendas temporales, etc), estas conllevan un riesgo dependiendo del uso que se les den, que van desde las actividades agropecuarias, donde generalmente aquella vegetación con cercanía o en propiedad de alguna localidad o inmueble suele ser quemada para llevar a cabo estas actividades, hasta los propios accidentes que implican un mal manejo o instalación deficientes de algún servicio, los cuales van desde instalaciones eléctricas en mal estado, fugas de gas, uso de materiales de construcción inflamables, entre algunos otros.

Caminos y carreteras:

Probablemente un arma de doble filo en cuanto a temas de incendios, debido a que pueden ayudar en la propagación, así como al combatir dichos fenómenos, partiendo principalmente por el aspecto de que pueden servir como caminos directos a los servicios de emergencia como los bomberos o protección civil, e

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

incluso servir como cortafuegos al limitar la vegetación, de manera que aquellos combustibles forestales quedan fuera del alcance del fuego.

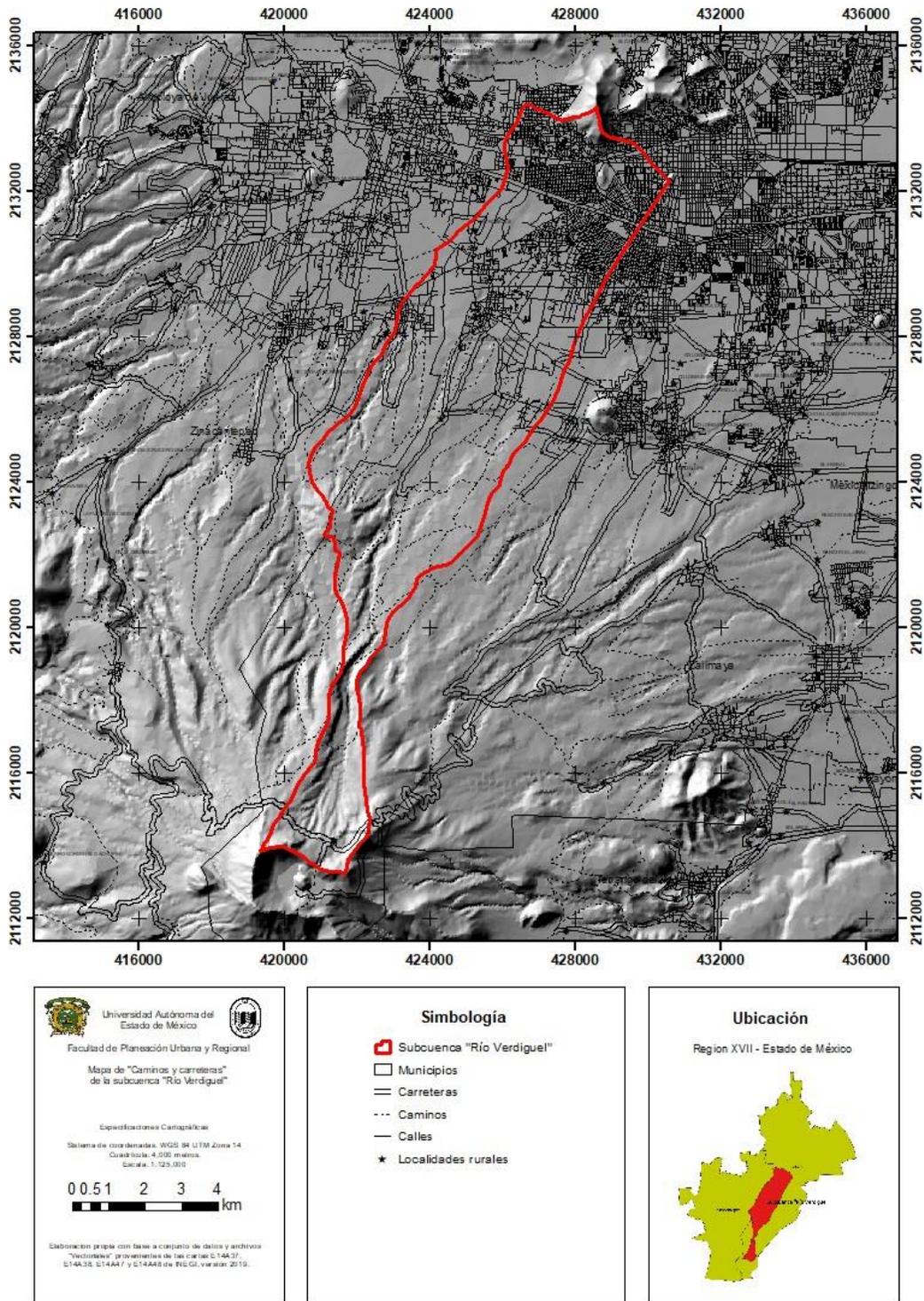
Sin embargo, la constante presencia de civiles, o en el caso del Nevado de Toluca, de turistas, y más aún, de vehículos carburados en dichos caminos, generan más un riesgo que una ventaja, pues el descuido de las personas al realizar actividades como fumar, generar basura, o crear fogatas en estas áreas ha sido el principal factor de inicio para incendios, sin mencionar el hecho de que, al ser zonas regularmente transitadas por vehículos, el mal mantenimiento de estos, así como su uso indebido dentro de zonas con caminos irregulares y bastos en vegetación, pueden propiciar a la liberación de sustancias inflamables como aceite, y en otros casos, la generación de chispas que pueden ser la fuente de inicio de un incendio. También cabe mencionar que dichos pasajes y su constante presencia de humanos, han limitado a la fauna, lo cual puede desembocar en la desorientación y limitación de esta en caso de un incendio, propiciando considerablemente a la afectación y desaparición de esta.

Y a pesar de que la cercanía de la presencia humana con respecto a la vegetación seca puede ser un detonador para el inicio de un incendio forestal, principalmente la culpa se la lleva la falta de cultura en la prevención, en la cual, participan autoridades y población en general al no tener presentes las consecuencias que pueden tener sus acciones, o en muchos casos, la falta de recursos para poder darle un monitoreo adecuado a las zonas boscosas de su entorno.

En toda la zona considerada como Área Natural Protegida del nevado de Toluca, se tienen diversos accesos, de los cuales apenas dos están regulados por autoridades parcialmente presentes en la zona, cuya extensión (en cuanto a caminos y pasajes) rebasan los 30 kilómetros, en donde aquellos que no se encuentran regulados, se haya presencia de infraestructuras ejidales, así como actividades de campismo y motocross no reguladas o supervisadas por autoridades competentes en el tema.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca "Río Verdiguél"

Mapa 7. Caminos y carreteras.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "Vectoriales" provenientes de las cartas E14A37, E14A38, E14A47 y E14A48 de INEGI, versión 2019.

4.2.3. Velocidad del viento

Por mención, el último de los factores cruciales señalados en el triángulo de fuego de elementos necesarios para el inicio de un incendio (oxígeno), pero no por ello el menos importante, y aunque si bien el viento no es el equivalente al oxígeno, este tiene uno de los papeles más cruciales en este tipo de fenómenos, pues su presencia, fuerza y velocidad implican afectan a todas las demás variables meteorológicas a continuación mencionadas, partiendo en el aspecto que en caso de ya haberse iniciado un incendio, el constante flujo de aire, además de oxigenar el fuego, puede ayudar a expandirlo al transportar aquellos restos más livianos de material encendido, mencionando por igual que el viento determina completamente la dirección hacia la que va el fuego.

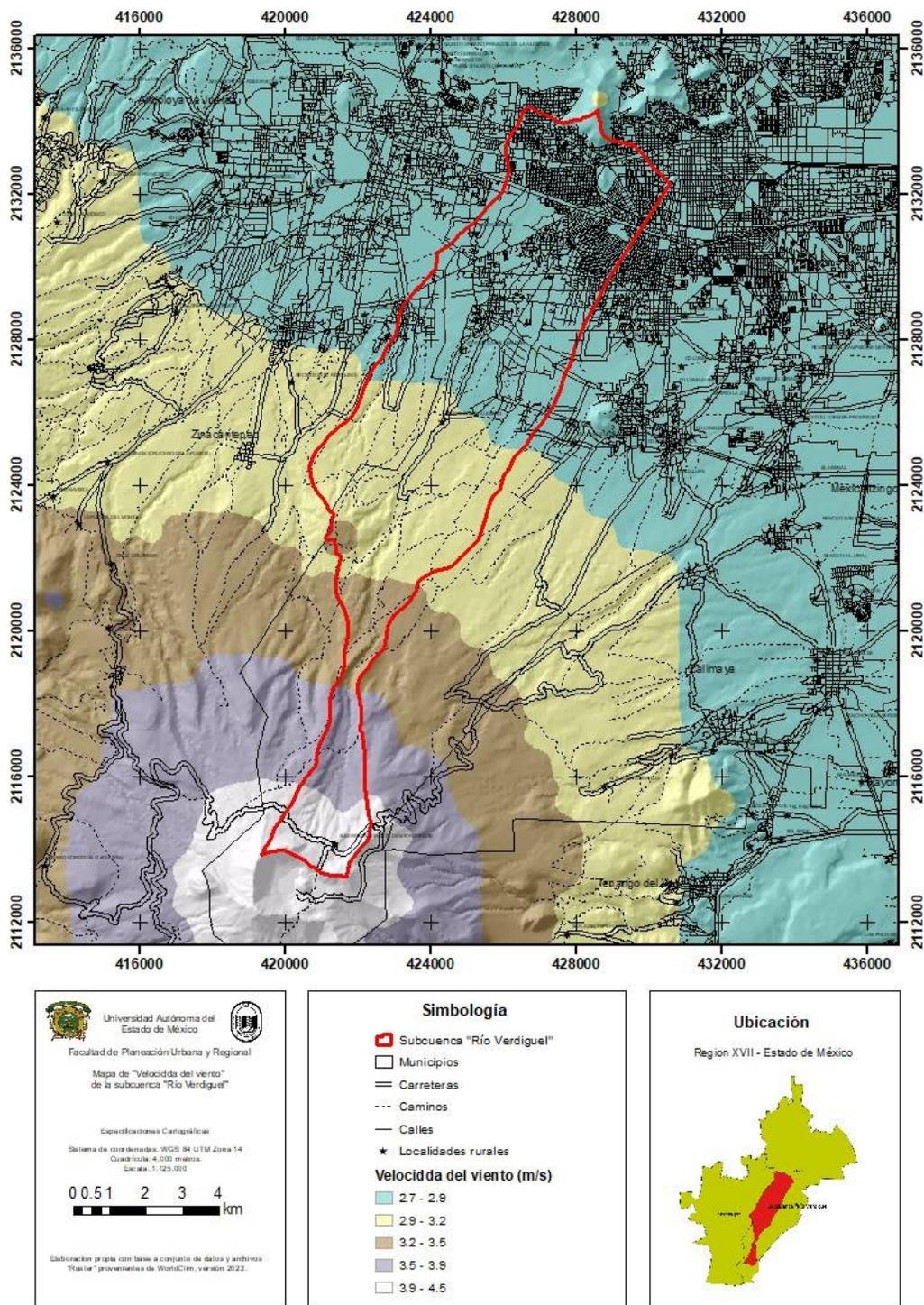
Por otro lado, la presencia de nubosidad, así como la carga de humedad en el entorno dependen en parte de la fuerza y velocidad del viento, siendo que, dependiendo de las condiciones atmosféricas, estos pueden ayudar a combatir o a expandir un incendio.

La presencia de fuertes vientos, puede ser una limitante para los servicios de ayuda contra incendios, así como representar un riesgo para la población y propiciar a la contaminación atmosférica, al ayudar en medida, dependiendo de la magnitud y extensión del incendio, a la dispersión de agentes contaminantes como dióxido de carbono, afectando a aquellos que se encuentren más cerca de la fuente principal de estos contaminantes.

La velocidad del viento dentro de la zona de estudio va desde los 2.7 m/s hasta los 4.5 m/s, en donde a la altura máxima, se puede incluso observar el movimientos de las masas de nubosidad por parte del viento, esto en conjunto que la velocidad estándar del viento va desde los 1.5 m/s hasta los 3 m/s.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdigué”

Mapa 8. Velocidad del viento.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "Ráster" provenientes de WorldClim, versión 2022.

4.2.4. Temperatura máxima

Cuando hablamos del factor temperatura, no estamos hablando de fuego o ignición, debido a que, a pesar de que la temperatura juega un papel muy importante como factor en cuanto a un incendio, la temperatura en si no puede provocar uno de estos fenómenos, considerando el hecho de que (dependiendo de la sustancia a considerar como gasolina, etanol, madera, alcohol), estas requieren de una temperatura superior a los 400 °C para alcanzar su temperatura de ignición base (temperatura requerida para hacer entrar en combustión alguna sustancia o material inflamable), mientras que naturalmente en el mundo, las temperaturas máximas registradas apenas han superado los 50 °C, y en el caso del Estado de México, las temperaturas apenas rebasan los 25 °C. (INEGI, Clima del Estado de México, 2024)

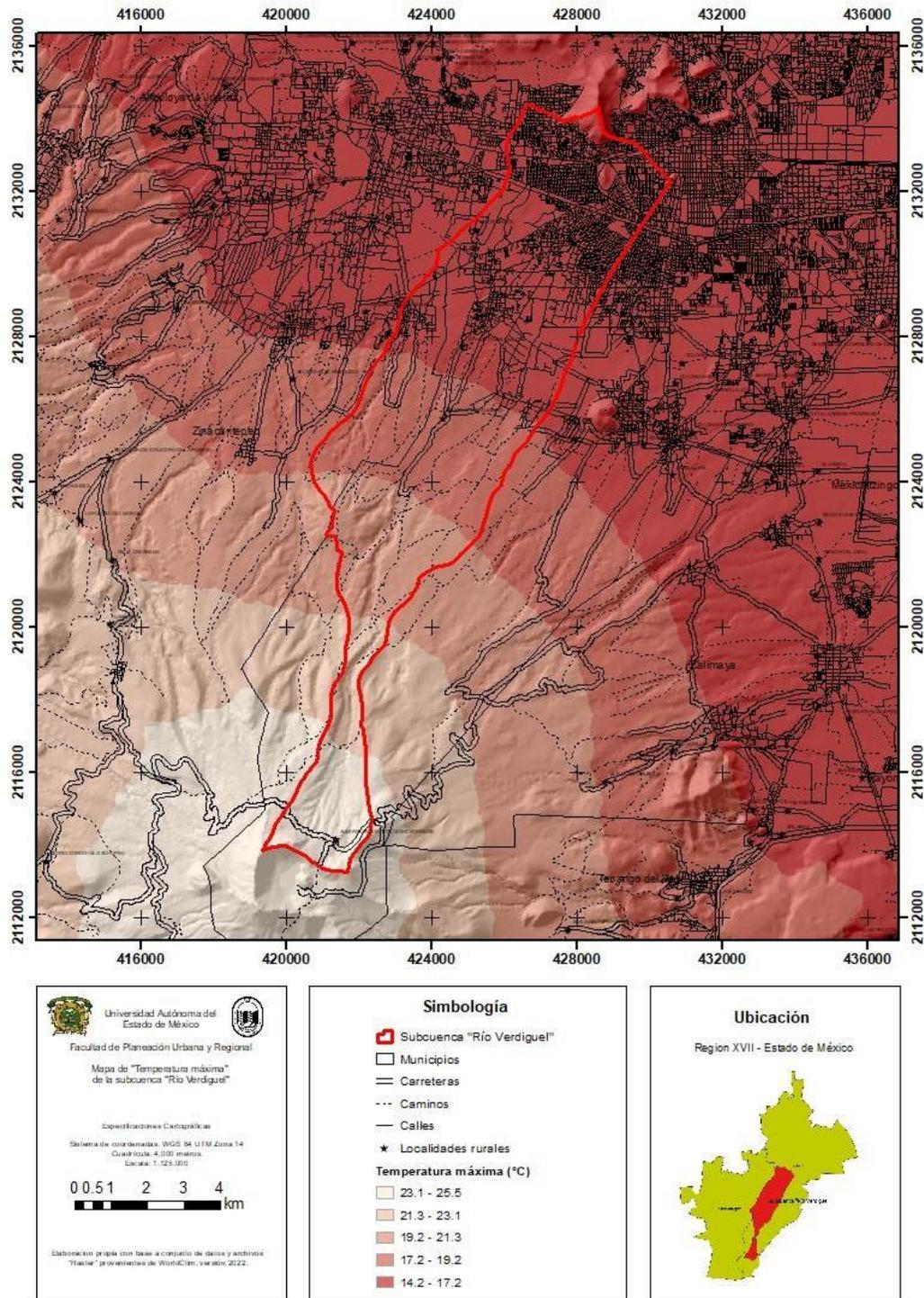
El verdadero valor que podemos darle a la temperatura en cuando a una variable para iniciar un incendio, reside en su efecto sobre otras variables, debido a que, al tener un incremento de temperatura, la humedad en el entorno, y más importante aún, en la vegetación, puede evaporarse abruptamente.

Por otro lado, las denominadas islas de calor pueden actuar como puntos decisivos con respecto al fuego, en consecuencia de que, dependiendo de la zona y lo que se encuentre ahí, pueden proveer del combustible requerido para un incendio.

Finalmente, en el Nevado de Toluca existe cierto tipo de vegetación (la cual se describirá más adelante) que reacciona a los cambios de temperatura en el ambiente, siendo que para poder sobrevivir a estas condiciones, se seca de forma exterior, resguardando la humedad en sus raíces como un método de supervivencia, pero lamentablemente, la parte externa de la planta, al estar seca, puede actuar perfectamente como combustible forestal.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguel”

Mapa 9. Temperatura máxima.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "Ráster" provenientes de WorldClim, versión 2022.

4.2.5. Radiación solar

La radiación solar es la energía que emite el sol y que viaja a través del espacio hasta llegar a la Tierra. Esta energía se compone de fotones, que son pequeñas partículas sin masa, y puede ser vista en forma de luz visible o sentida en forma de calor. La importancia de la radiación solar es inmensa. Gracias a ella los seres vivos pueden realizar procesos vitales como la fotosíntesis en las plantas. Además, la radiación solar regula el clima y es fuente de energía renovable. (ASTROINGEO, 2023)

El clima de la Tierra es influenciado en gran parte por la radiación solar. Los patrones de calentamiento y enfriamiento, las corrientes de aire y las precipitaciones dependen del sol. Cuando los rayos del sol alcanzan la Tierra, parte de la energía es absorbida y parte es reflejada de vuelta al espacio. El balance entre la energía absorbida y reflejada determina la temperatura del planeta.

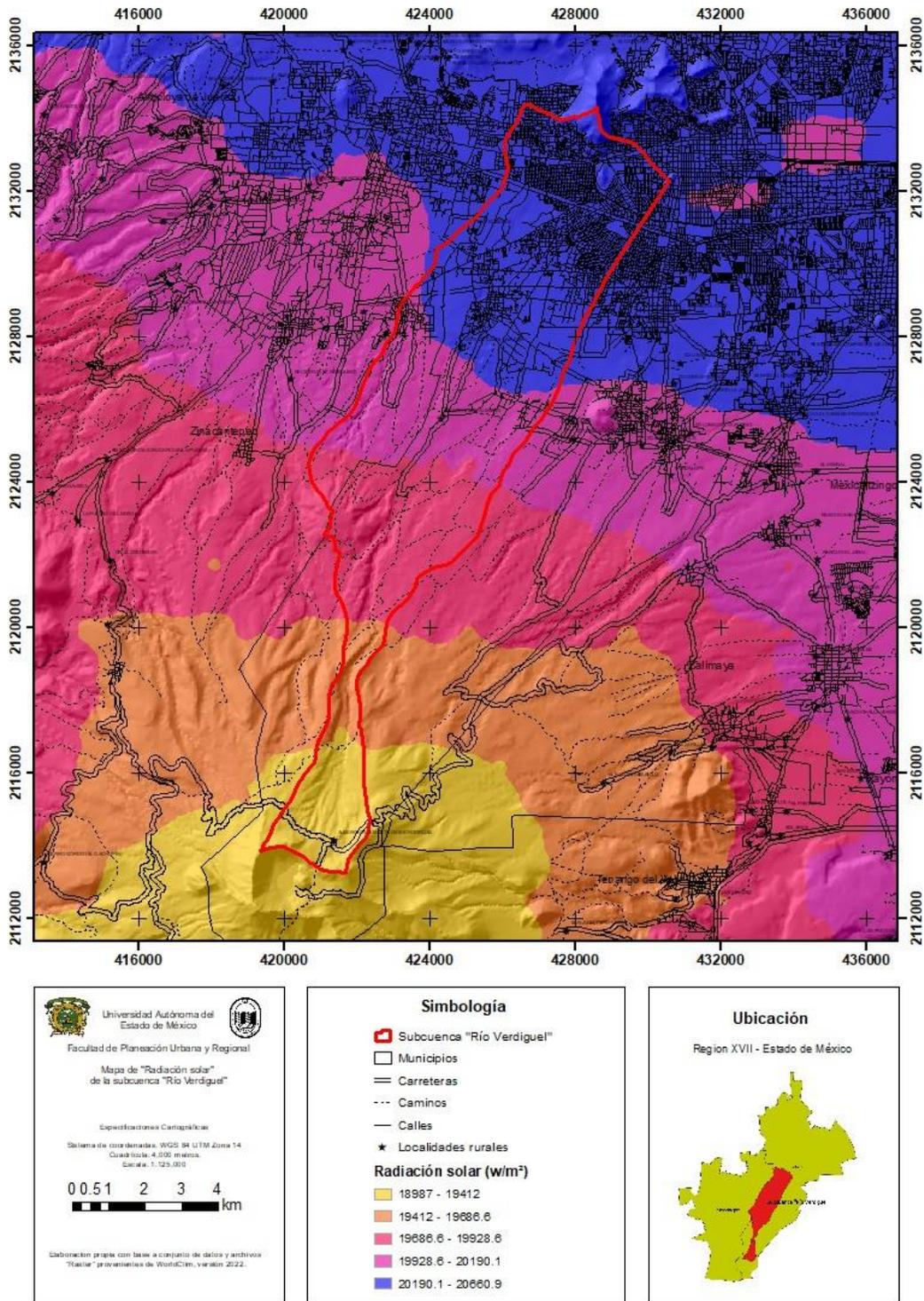
Similar a la temperatura, pero con más efectos sobre el entorno de por medio, la radiación solar puede provocar un incremento de temperatura en el entorno, propiciando a la evaporación, disminuyendo a humedad en el entorno, y dejando como resultado a la vegetación como combustible forestal.

Los gases contaminantes emitidos por el combustible (forestal o no), además de contaminar el entorno, propician al aumento de la temperatura en conjunto con la radiación solar, debido a que los gases actúan como catalizadores para la ondas emitidas por la radiación, intensificando el efecto de estos y derivando en un incremento aun mayor de la temperatura, o en otros aspectos como quemaduras en la piel u otro tipo de afectaciones a la salud.

Pese a todo lo anterior mencionado, la radiación solar puede verse ocasionalmente afectada por los niveles de nubosidad en la atmosfera, así como por la presencia de nieve en el Nevado de Toluca, reflejando gran parte de la radiación en lugar de permitir que esta sea absorbida y retenida en la superficie.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguél”

Mapa 10. Radiación solar.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "Ráster" provenientes de WorldClim, versión 2022.

4.2.6. Precipitación

No es la precipitación como tal un factor que contribuya a un incendio, sino más bien, la ausencia de esta; si bien en el entorno, así como en la vegetación e incluso el suelo, existe cierto grado de humedad, las lluvias o precipitaciones pueden aumentar dicha carga de humedad, propiciando a que los combustibles existentes en el entorno tengan una menor probabilidad de prenderse.

Por otro lado, la ausencia de lluvias, y en conjunto con temporada de secas, olas de calor, sequías, entre algunas otras situaciones son una ausencia de precipitaciones genera todo lo contrario, propiciando un escenario ideal donde, al no haber humedad en el entorno, como lo es en el caso de las temporadas de incendios forestales en la zona centro de México (las cuales considera de enero a junio).

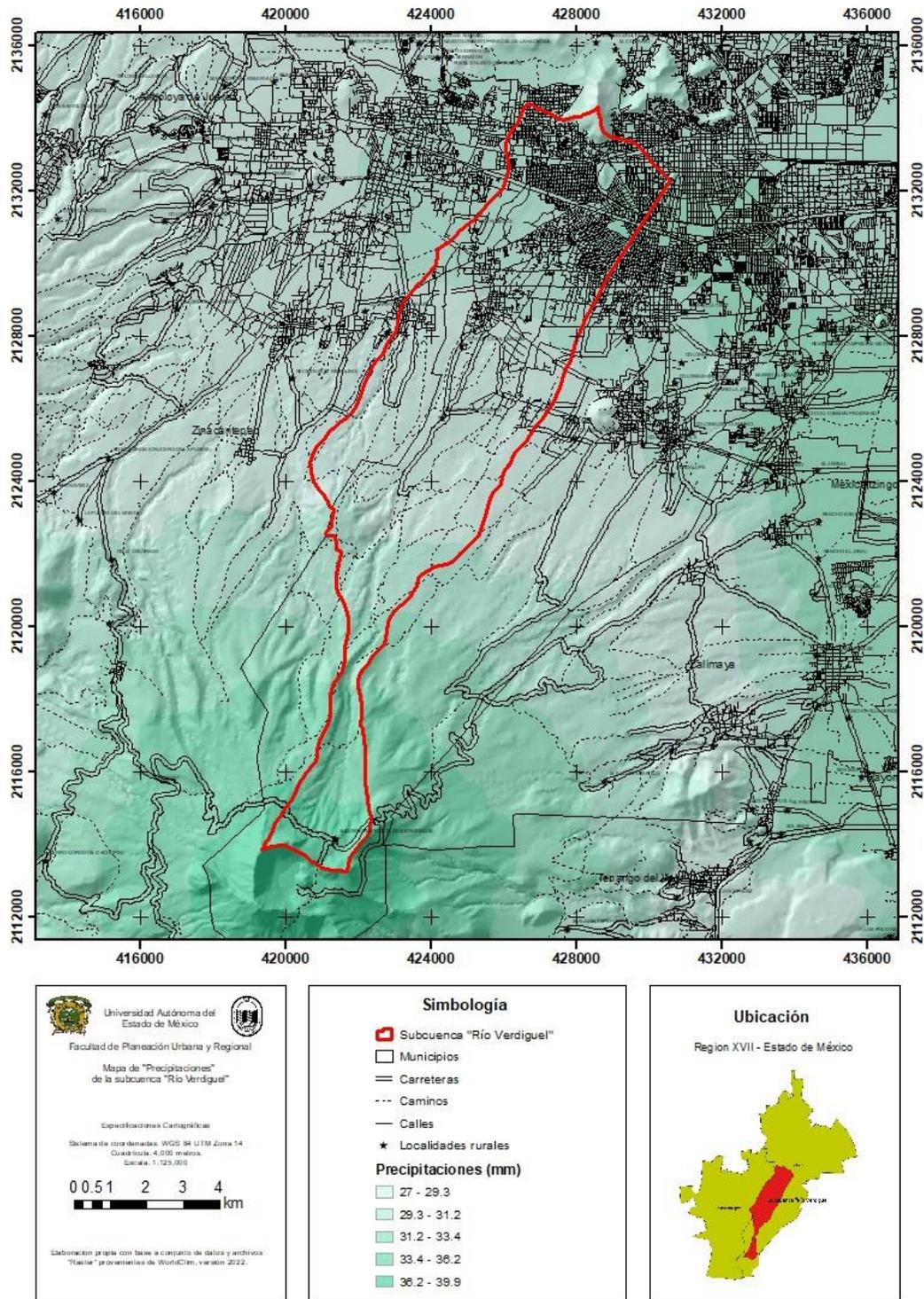
Cabe mencionar que las precipitaciones, existentes o no en el momento, no tienen la mayor intensidad en todos lados, principalmente considerado el relieve del lugar, la altitud y las corrientes de aire, habrá zonas con una mayor concentración de precipitaciones, y otras que carezcan en cierta medida de ellas.

Es pertinente mencionar por igual el hecho de que el cambio climático ha afectado con el pasar de los años a las precipitaciones, prolongando las temporadas de incendios forestales, de sequía, el aumento de la temperatura en el entorno, teniendo un mayor índice de estos fenómenos a través de los años. (Borunda, 2020)

Finalmente, las precipitaciones pueden generar cierto efecto a futuro si consideramos el hecho de que, en algunas zonas quemadas, si el fuego llegó hasta las raíces de la vegetación, afectándolas total o parcialmente, se habrá afectado de igual manera al principal factor que ayudaba a retener y evitar la erosión del suelo, por lo que abundantes lluvias sobre una zona previamente quemada pueden provocar, nuevamente, otro tipo de incidentes a futuro, los cuales pueden derivar en la afectación del suelo en general, erosión de este, y en casos extremos, avalanchas. (Sacchi, 2020)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguél”

Mapa 11. Precipitaciones.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "Ráster" provenientes de WorldClim, versión 2022.

4.2.7. Evaporación

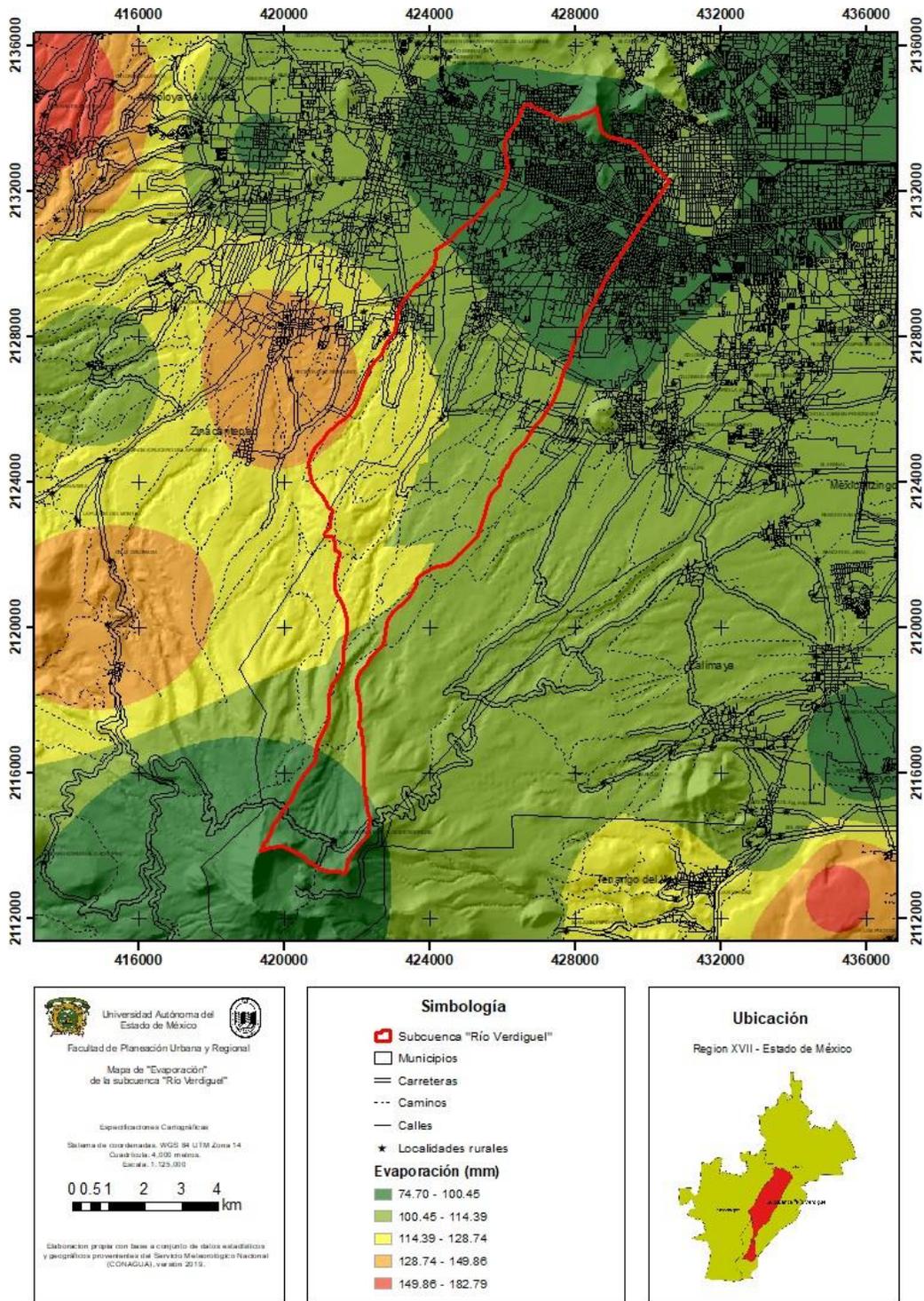
La evaporación del agua es un proceso físico en el cual el agua pasa del estado líquido al estado gaseoso. Este fenómeno se produce cuando el agua acumula suficiente calor para vencer la tensión superficial y convertirse en vapor. A diferencia de la ebullición, la evaporación no requiere que toda la masa de agua alcance el punto de ebullición. En ambientes calurosos y secos, el agua en superficies como lagos se evapora rápidamente. La capa superficial del suelo pierde agua por evaporación, afectando su disponibilidad para plantas. Por otro lado, las plantas liberan agua en forma de vapor a través de poros en sus hojas, contribuyendo al ciclo del agua; y en el caso de la evapotranspiración, esta incluye la evaporación de aguas superficiales y la transpiración de plantas, formando nubes y saturando agua en ecosistemas. (Ruiz, 2024)

La evaporación, así como parte del ciclo del agua, es un proceso natural, aunque dependiendo de la estación del año, o de las condiciones atmosféricas del momento, así como del lugar y lo que se encuentre a su alrededor, se puede dar este proceso de forma más intensiva.

En este caso, el factor “evaporación” no representa la ausencia o la presencia de alguna variable, más bien, es un proceso el cual está completamente presente en el entorno, el cual podemos medir en forma de milímetros (mm), en relación principalmente a la vegetación o cuerpos de agua existentes en la zona.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguél”

Mapa 12. Evaporación.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos estadísticos y geográficos provenientes del Servicio Meteorológico Nacional (CONAGUA), versión 2019.

4.2.8. Vapor de agua

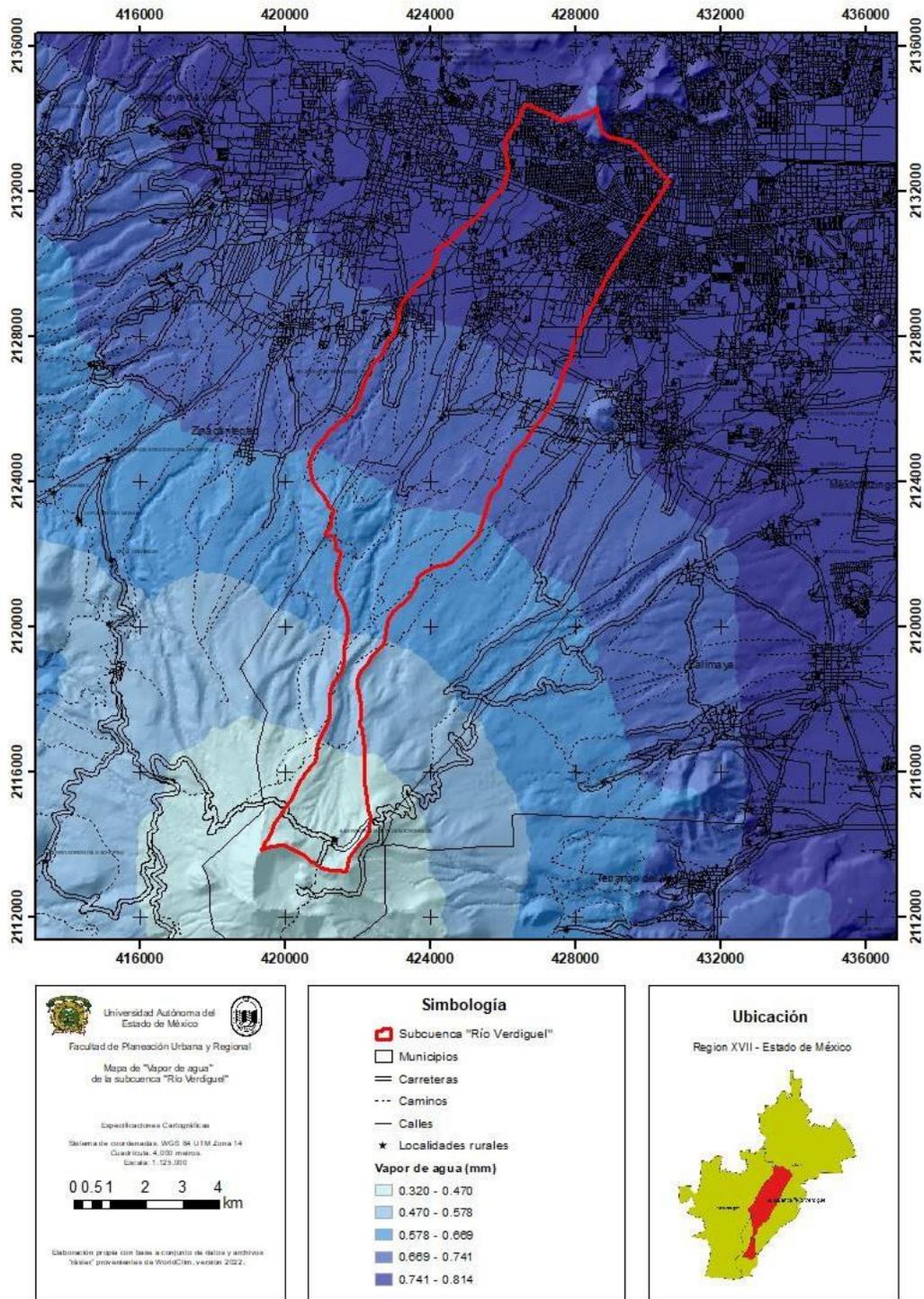
El vapor de agua es un estado de delegación del agua cuando cambia de fase de estado líquido al estado gaseoso. Este vapor es incoloro e inodoro aunque suele adquirir una apariencia blanca y turbia cuando se intercalan con pequeñas gotas de agua que se encuentran en estado líquido. El vapor de agua también puede llegar a reducir la visibilidad dependiendo de su densidad y del lugar donde se encuentre. (Portillo, 2024)

Podemos considerar al vapor de agua como un factor de humedad en el entorno, aunque muy diferente de las precipitaciones pero parte del proceso de la evaporación si consideramos que a diferencia de la lluvia, con la cual no siempre podemos contar dependiendo de la estación del año o del tiempo atmosférico, el vapor de agua está presente en casi todo momento dependiendo de cualquiera de los siguientes factores: Vegetación y cuerpos de agua.

La vegetación tiende a retener agua, humedad, por lo que es de saber que conforme pasa el tiempo, y en un ambiente con buena presencia de temperaturas altas y radiación solar, la vegetación ira liberando dicha humedad, sin embargo, esto puede alcanzar un punto en el que la vegetación como tal no pueda transpirar más humedad, por lo que entran en juego los cuerpos de agua, ya sea que hablemos concretamente de cuerpos o de corrientes de agua, los cuales, dependiendo de la cercanía que tengan con la vegetación, pueden servir como una gran fuente de humedad, evitando en cierta medida la pronta evaporación de la humedad en el entorno.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Mapa 13. Vapor de agua.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "ráster" provenientes de WorldClim, versión 2022.

4.2.9. Hidrología

A pesar de que la hidrología abarca diversos factores y variables (algunas descritas anteriormente), en este caso, nos referimos a los cuerpos y corrientes de agua que podemos denotar en el entorno a simple vista.

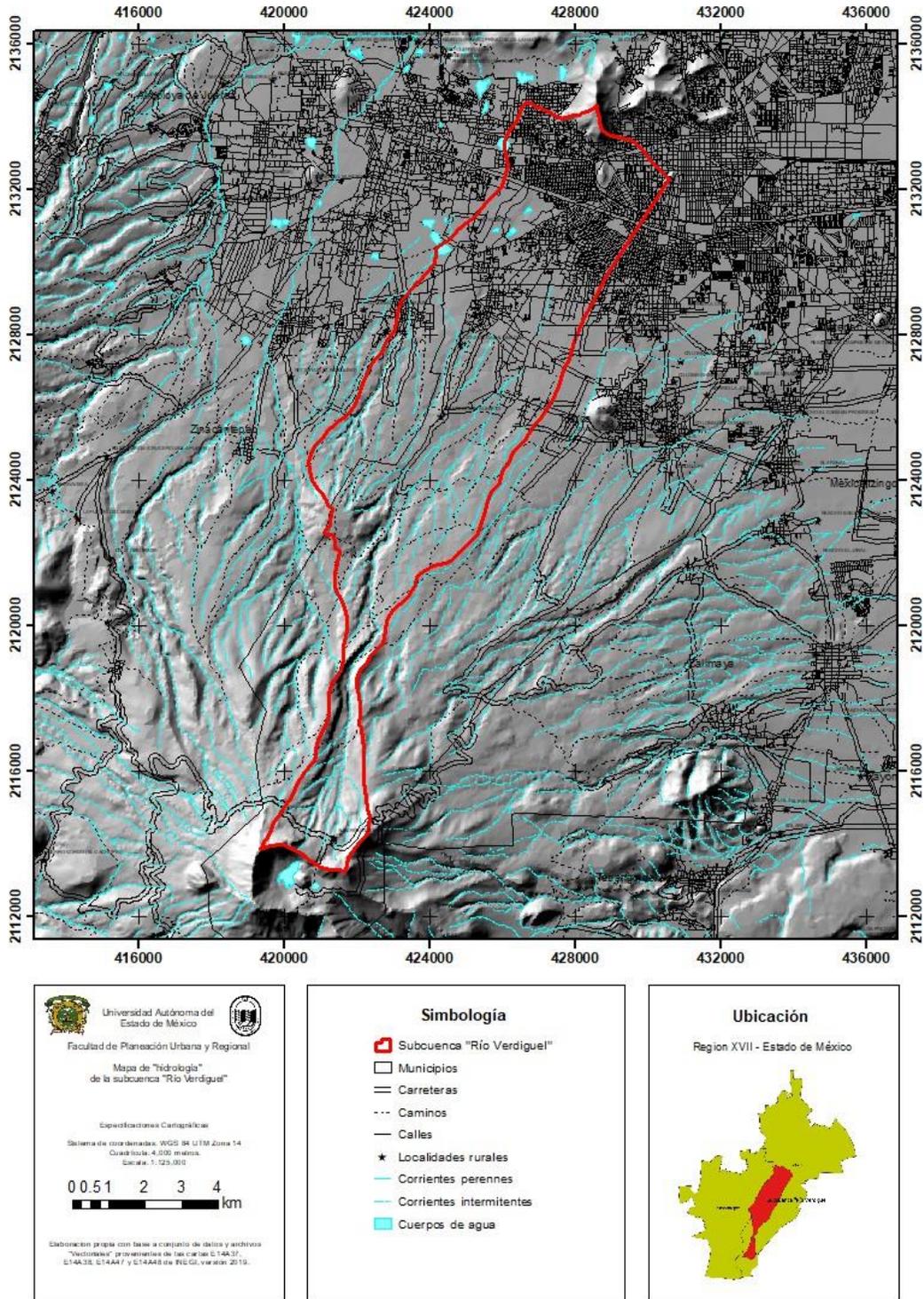
Un cuerpo de agua es cualquier extensión que se encuentran en la superficie terrestre (ríos y lagos) o en el subsuelo (acuíferos, ríos subterráneos); tanto en estado líquido, como sólido (glaciares, casquetes polares); tanto naturales como artificiales (embalses) y pueden ser de agua salada o dulce. (agua, 2024)

Los cuerpos de agua pueden proveer de humedad a su entorno, enriqueciendo a la vegetación, y a su vez, evitando que esta pueda servir como un posible combustible forestal, además de que, en caso de un incendio en curso, esta puede servir como fuente de agua para combatir el siniestro.

Por otro lado, las corrientes de agua tienen una función similar a los cuerpos de agua en este caso, pues si bien todo va a depender de si estamos hablando de una pequeña escorrentía, o de un río, las corrientes de agua generalmente trazan caminos en los bosques, teniendo a su vez una función similar a los caminos y carreteras, dividiendo el camino y sirviendo hasta cierto punto de cortafuegos, aunque todo esto estará sujeto al hecho de si es lo suficientemente ancho para tener esta función, o en todo caso, que podamos distinguir una corriente perenne (que mantiene un flujo constante de agua), de una intermitente (mantiene un flujo de agua inconsistente dependiendo de la época del año, generalmente en temporada de lluvias), debido a que, en el caso de esta última, y si estamos hablando de temporada de secas, no mantiene un nivel estable de humedad, a su vez que el camino que ocupa puede ser invadido por la vegetación que termina por conectar entre sí.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguel”

Mapa 14. Hidrología.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "Vectoriales" provenientes de las cartas E14A37, E14A38, E14A47 y E14A48 de INEGI, versión 2019.

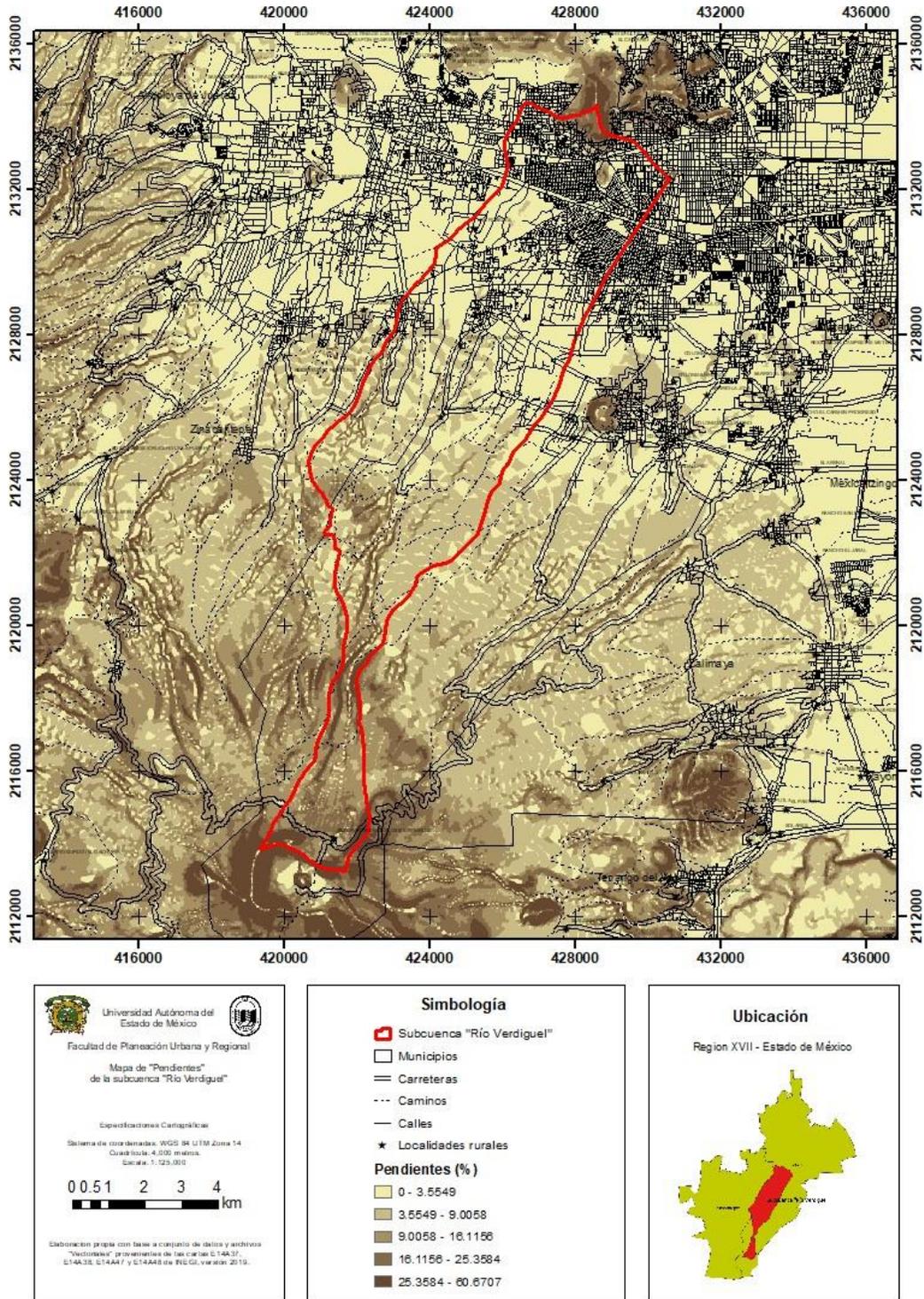
4.2.10. Pendientes

El rol que juegan las pendientes (o inclinaciones en el terreno), más allá de ser una causa, son una limitante, o en otros casos, un sistema de apoyo a la propagación del fuego. Al actuar como barreras naturales, y al no ser una variante independiente de sí misma como un factor en los incendios, las pendientes pueden ayudar a contener la vegetación, las corrientes de aire, y el fuego como tal, limitando a este fenómeno, lo que facilita en cierta medida su contención y posible extinción. Sin embargo, se dan casos donde a pesar de que estas barreras pueden contener en cierta medida un incendio, si la pendiente es muy inclinada, esta puede propiciar a extenderlo, debido principalmente a que el fuego, en conjunto con las corrientes de aire, tiende a ir hacia arriba, y en este caso, eso dificultaría su contención. (Flores Garnica, Cabrera Orozco, & Meléndez Gómez, 2006)

Si bien en un inicio podemos atribuir la interacción de las pendientes con un incendio como un post-incidente, lo cierto es que su interacción con otras variables puede determinar el índice de afectación de estos, por lo que su integración a las variables a considerar es pertinente, destacando en este caso, a pesar de lo anterior mencionado, a aquellas pendientes con menor índice de inclinación (superficies planas) como aquellas con mayor prioridad, considerando principalmente el hecho de que aquellas zonas inclinadas también son las que tienden a retener mayor humedad, sin mencionar el hecho de que estas solo servirían en caso de que el incendio se esté efectuando; por otro lado, las superficies planas, tienden a absorber un mayor índice de radiación, derivando en el aumento de temperatura, evaporación, entre algunos otros.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguel”

Mapa 15. Pendientes.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "Vectoriales" provenientes de las cartas E14A37, E14A38, E14A47 y E14A48 de INEGI, versión 2019.

4.3. Evaluación Multicriterio.

La Evaluación Multicriterio puede definirse como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en los procesos de toma de decisiones. El fin básico de las técnicas de EMC es “Investigar un numero de alternativas bajo la luz de múltiples criterios y objetivos en conflicto”. Según eso, es posible “generar soluciones compromiso y jerarquizaciones de las alternativas de acuerdo a su grado de atracción. La toma de decisiones multicriterio se puede entender como un “mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos, para auxiliar a los centros decisores a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, en base a una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo a varios criterios. Estos criterios pueden representar diferentes aspectos de la teología: Objetivos, metas, valores de referencia, niveles de aspiración o utilidad. (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005)

Inicialmente se establece el conjunto de soluciones posibles del problema de decisión analizado, seguidamente basándose en un criterio, se asocia a cada solución posible un código (un valor) que cuantifica el grado de deseabilidad que tiene cada alternativa para el centro decisor, luego, utilizando técnicas matemáticas, se procede a determinar entre las soluciones posibles, aquella o aquellas que posean el mayor grado de deseabilidad, obteniendo así la solución óptima del problema planteado, en base a un determinado criterio. Los análisis multicriterio y los análisis de decisión multiobjetivo nos ofrecen la oportunidad de obtener un análisis equilibrado de todas las facetas de los problemas de planificación, particularmente debido a que varios efectos intangibles, como los sociales y las repercusiones ambientales pueden ser considerados cabalmente. La integración de estos dos elementos (SIG y EMC) permitiría llevar a cabo procedimientos simultáneos de análisis en cuanto a los dos componentes del dato geográfico: espacial y temático, proveyendo soluciones a problemas espaciales complejos. (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Mapa de zonas propensas a incendios forestales

Antes de proceder con las variables, es pertinente establecer un método por el cual podamos ordenar y asignarle un valor a dicha información, de manera que sea más fácil tratar con esta.

4.3.1. Método de las Jerarquías Analíticas (MJA) de Saaty (Analytical Hierarchy Process, AHP)

Este procedimiento parte para establecer una matriz cuadrada en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de factores a ponderar , así se establece una matriz de comparación entre pares de factores, comparando la importancia de uno sobre cada uno de los demás, posteriormente se determina el eigenvector principal, el cual establece los pesos y el eigenvector que proporciona una medida cuantitativa de la consistencia de los juicios de valor entre pares de factores. Se basa en la descomposición, juicio comparativo y síntesis de las prioridades del problema de decisión (Saaty, 1980:17). El principio de descomposición supone que el problema de decisión ha de ser descompuesto en una jerarquía que capte sus elementos esenciales. El principio de juicio comparativo se plasmaría mediante la comparación por pares de los elementos de cada nivel de jerarquía. Finalmente, la síntesis de prioridades supone tomar cada una de las escalas de prioridades resultantes en cada nivel de jerarquía y construir un conjunto de prioridades global (compuesto) para el último nivel de jerarquía, que será utilizado para evaluar las distintas alternativas. (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005)

La aplicación de estos principios se realiza en las siguientes fases (Saaty, 1995):

- Identificación de los criterios de decisión asociados al problema.
- Estructuración de los factores de una forma jerárquica.
- Establecer la importancia relativa de los elementos de cada jerarquía a partir del método de comparación por pares.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

- Agregar los pesos de los niveles obtenidos en cada jerarquía, obteniendo así pesos compuestos o globales.
- Finalmente, se ordenarían las alternativas en función del valor de R alcanzado, siendo la más adecuada la que obtenga el valor más alto.

El final del proceso sería ligeramente diferente cuando nos encontramos ante un problema de EMC procesado en un entorno SIG, con un importante volumen de alternativas a evaluar. (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005)

Por último, se debe mencionar que este método se ha extendido al ambiente de la decisión borrosa, o a la programación matemática, lo que nos indica la flexibilidad de esta técnica. (Banai, 1993; Siddiqui et al., 1996)

Dicho de otra manera, deberemos introducir todas las variables seleccionadas como principales influyentes en un incendio forestal a una matriz, en la cual, dependiendo de dicha variable, se le asignara un valor con respecto a las demás, para cual, y en términos de conveniencia y orden, se colocaron las variables de forma ordenada (de mayor a menor nivel de importancia) para facilitar la asignación de su valor.

	NDVI	LOCALIDADE	CARRETERAS	CAMINOS	TEM_MAX	RADIACION	PRECIP	EVAPORACION	VAP_AGUA	CUERPOS_AG	INTERMITEN	PERENNES	WIND_VEL	PENDIENTES
NDVI	1													
LOCALIDADE	1/2	1												
CARRETERAS	1/2	1	1											
CAMINOS	1/2	1	1	1										
WIND_VEL	1/3	1/2	1/2	1/2	1									
TEM_MAX	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1								
RADIACION	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1	1							
PRECIP	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1						
EVAPORACION	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1	1					
VAP_AGUA	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/2	1/2	1	1	1				
CUERPOS_AG	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1			
PERENNES	1/6	1/5	1/5	1/5	1/4	1/3	1/3	1/2	1/2	1/2	1	1		
INTERMITEN	1/7	1/6	1/6	1/6	1/5	1/4	1/4	1/3	1/3	1/3	1/2	1/2	1	
PENDIENTES	1/8	1/7	1/7	1/7	1/6	1/5	1/5	1/4	1/4	1/4	1/3	1/3	1/2	1

Tabla 3. Matriz de prioridad de variables. (Fuente: Elaboración propia)

4.3.2. Organización de la EMC: las matrices.

La EMC basa su funcionamiento en la evaluación de una serie de alternativas sobre la base de una serie de criterios. Un método de EMC “puede servir para inventariar, clasificar, analizar y ordenar convenientemente” una serie de alternativas, a partir de los criterios que hayamos considerado pertinentes en una evaluación. Podemos

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

pensar ahora que la mejor organización para representar la relación de criterios y alternativas, que define la EMC, es una matriz. Los valores internos de esta matriz son llamados puntuaciones de criterios, estos representan el valor o nivel de adecuación que ha obtenido cada alternativa en función de cada criterio. Siendo a partir de aquí donde los distintos métodos de EMC basan todo su funcionamiento intrínseco, para lograr la evaluación de las alternativas. (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005)

Una vez establecida la matriz de evaluación, a partir de ella es posible determinar el llamado “punto ideal”, este es un vector que combina los valores más altos de cada criterio. Otro aspecto para tomar en cuenta es la importancia relativa de cada criterio frente al tipo de evaluación que se pretenda realizar. Con lo cual, también se requiere asignar un valor específico a cada criterio de acuerdo con su nivel de importancia relativa. Para desarrollar un procedimiento de EMC, por lo general es necesario establecer las preferencias a través de valores que definan en términos cuantitativos la importancia de cada criterio. Una vez asignados los pesos a los criterios estos se pueden incluir en una nueva matriz, la de prioridades. Sería recomendable y conveniente tener en cuenta los distintos puntos de vista de un grupo interdisciplinar para otorgar el peso adecuado a cada criterio. Así es posible construir una nueva matriz de prioridades donde para cada punto de vista, se considera una jerarquía o peso distinto para los mismos criterios. Los valores asignados a las alternativas en la matriz de valoración son una función de: el número y naturaleza de los criterios, las prioridades empleadas y las técnicas aritméticas aplicadas. (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005)

Los valores se asignaron de esta manera y con esos valores con la intención de que la matriz que asigne los pesos para el mapa final identifique las jerarquías que existen entre las variables, o visto de otra forma, le estamos dando un valor lógico donde, si AB y BC, entonces AC, estableciendo, nuevamente, una jerarquía en donde se le asigna y respeta el valor y posición de cada variable con respecto a las demás para su evaluación final.

4.3.3. IDRISI Selva.

Utilizado en numerosos trabajos, sobre planificación y en un entorno SIG (de hecho es el método de valoración integrado en el módulo de EMC que posee el SIG IDRISI). Se trata del método de comparación por pares, dentro del contexto del Método de las Jerarquías Analíticas propuesto por T.L. Saaty a finales de los años 70 en el campo de la psicología matemática y que pertenece al grupo de métodos de ponderación de eigenpesos. Se trata de un método muy popular en los estudios en los que se pretende alcanzar varios objetivos que se encuentran en conflicto. (Gómez Delgado & Barredo Cano, 2005)

Para poder llevar a cabo el cálculo de los pesos, o bien, la asignación de valores final de las variables en el SIG “IDRISI Selva”, es pertinente establecer un formato apropiado a los datos de la Tabla 3 (Matriz de prioridad de variables), por lo cual, es indispensable generar un archivo aparte, en este caso un blog de notas, y colocar los datos de la siguiente forma:

- # de variables
- Variables (de forma textual y en lista)
- Matriz de valores (dejando solo un espacio entre cada variable)

Una vez hecho esto, en el programa IDRISI Selva, seleccionaremos la herramienta “Edit” ubicada en la barra de herramientas y copiaremos nuestra matriz previamente modificada, la cual, posterior a eso, deberemos guardar como un nuevo archivo en formato “.pcf”.

Ya teniendo el archivo en orden y formato apropiado, deberemos seleccionar la herramienta “Decision Support” = “WEIGHT”, ubicada en la barra de herramientas, seleccionar el archivo .pcf, y para finalizar, seleccionar la opción de “Calculate weights” para asignar los valores finales a las variables.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguil”

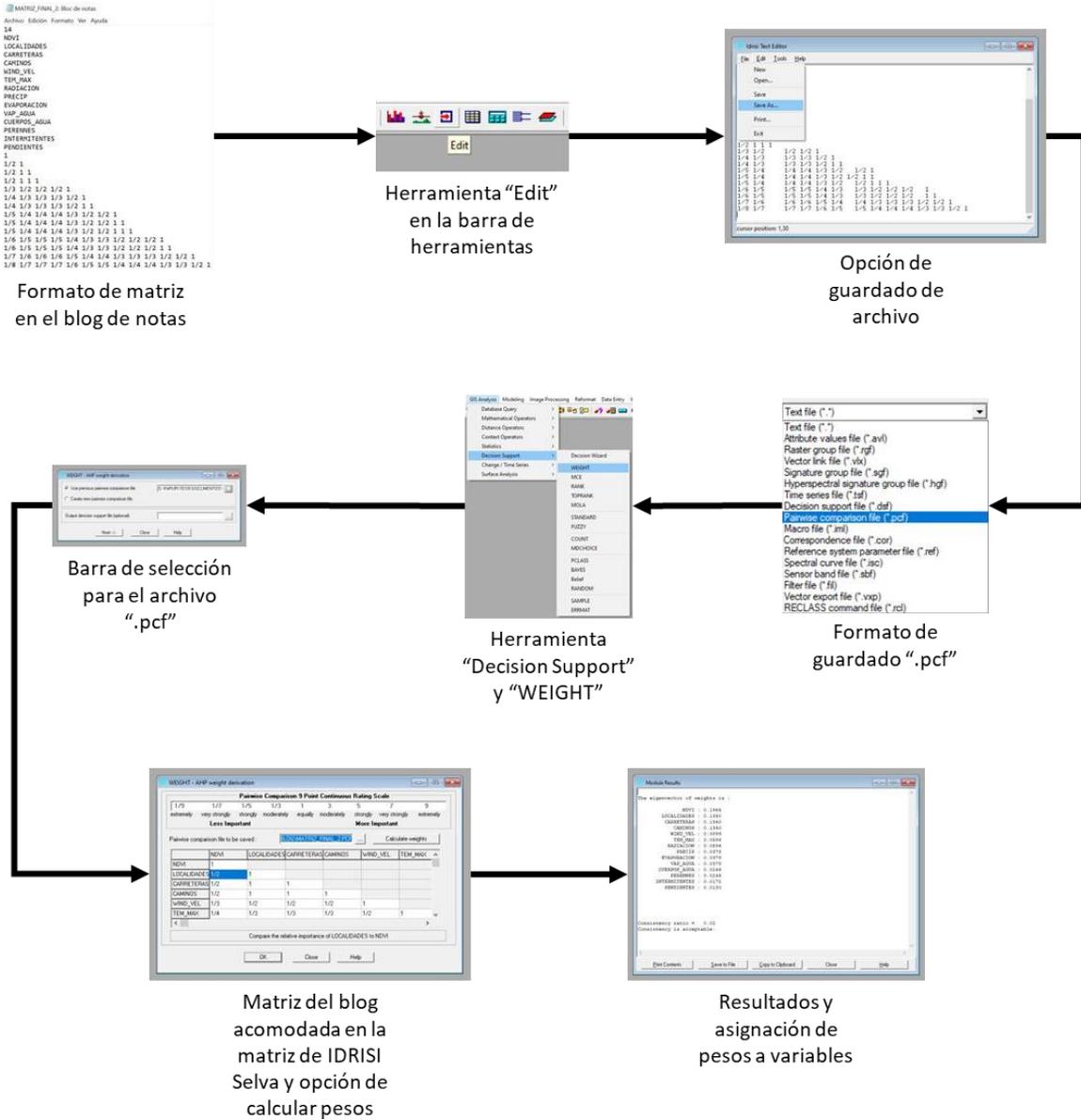


Tabla 4. Matriz procedimental de IDRISI Selva. (Fuente: Elaboración propia)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

Como resultado, obtendremos el siguiente peso para nuestras variables:

Variable	Peso
NDVI	0.1966
Localidades	0.1340
Carreteras	0.1340
Caminos	0.1340
Velocidad del viento	0.0899
Temperatura máxima	0.0594
Radiación solar	0.0594
Precipitaciones	0.0378
Evaporacion	0.0378
Vapor de agua	0.0378
Cuerpos de agua	0.0246
Corrientes perennes	0.0246
Corrientes intermitentes	0.0172
Pendientes	0.0130

Tabla 5. Asignación de pesos a variables. (Fuente: Elaboración propia)

4.3.4. Calculadora ráster.

Antes de proceder a la asignación de valores final a las variables, deberemos “Estandarizar” dichas variables, de manera que todas estén en un mismo rango, debido a que hay variables cuyo rango va desde los 14 a los 25, mientras que otras tienen valores que van desde los 18,000 a los 20,000, lo que involucraría una inconsistencia en cuanto a la suma de valores.

Para llevar a cabo la estandarización, se llevó a cabo el uso de la siguiente expresión en la calculadora ráster de ArcMap:

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

$$\text{Estandarización} = ((\text{Imagen ráster de variable}) * 100 / \text{Valor más alto})$$

Formula 2. Estandarización

Véase como ejemplo:

$$\text{STD Temperatura máxima} = ((\text{Ráster TEM_MAX}) * 100 / 25.79)$$

Por otro lado, la formula anterior mencionada solamente es aplicable a aquellas variables cuyos valores máximos son los requeridos, como lo fue en el caso de las temperaturas, aquellas más altas son las que inciden en la susceptibilidad de una zona a sufrir un incendio forestal. Esto nos lleva a tratar aquellas variables cuyos valores mínimos son los requeridos, como lo fue en el caso de los caminos, cuya presencia de personas y vehículos vuelve a esta variable primordial en cuanto a la cercanía que tenga con la vegetación seca o propensa a incendiarse. Al tratar con valores cuyos valores requeridos son los mínimos o los más cercanos, el proceso de estandarización cambia, y aunque si bien no lo hace radicalmente, debe efectuarse una operación extra para invertir los valores de mínimos a máximos para su apropiado uso en la asignación de valores final. Por lo que para invertir dichos valores, se llevó a cabo el uso de la siguiente formula en la calculadora ráster de ArcMap:

$$\text{Imagen invertida} = (\text{Imagen ráster de variable} - \text{Valor más alto}) * (-1)$$

Formula 3. Estandarización invertida.

Véase como ejemplo:

$$\text{Inv. Caminos} = (\text{CAM_DIST} - 7809.05) * (-1)$$

Una vez llevado a cabo este proceso, a las imágenes invertidas se les aplico la misma fórmula de estandarización anteriormente mencionada, de manera que todos

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

los rangos de las imágenes ráster de las variables puedan alcanzar un rango de entre 0 a 100 para su correcta asignación de pesos final en la matriz.

4.3.5. Asignación de pesos y suma de variables.

Una vez que las imágenes ráster de todas las variables cumplieron con los requisitos para poder ser utilizadas apropiadamente (categorización, recorte y estandarización), se les deberá apropiar a cada variable el valor asignado previamente de la matriz y cálculo de pesos en IDRISI Selva (Tabla 4. Asignación de pesos a variables), directamente en la calculadora ráster de ArcMap utilizando la siguiente expresión:

“ (Imagen ráster estandarizada de variable * (Peso asignado)) + “

Formula 4. Ecuación ráster de variables.

De manera que la expresión de todas las variables seleccionadas en conjunto con sus respectivos pesos agregados se visualiza de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} & ("F_NDVI" * (0.1966)) + ("F_LOC_URB" * (0.1340)) + ("F_CAM" * (0.1340)) + \\ & ("F_CARR" * (0.1340)) + ("F_VIENTO" * (0.0899)) + ("F_TMAX" * (0.0594)) + \\ & ("F_SRAD" * (0.0594)) + ("F_PRECIP_3" * (0.0378)) + ("F_EVAPORACION" * \\ & (0.0378)) + ("F_VAGUA_4" * (0.0378)) + ("F_CAGUA" * (0.0246)) + ("F_PERENNE" \\ & * (0.0246)) + ("F_INTERMI" * (0.0172)) + ("F_PENDIENTES" * (0.0130)) \end{aligned}$$

Como resultado, podemos visualizar un mapa en donde se generaliza una zona con un 98% de probabilidades de incendios forestales, esto, debido a que ninguna zona cumple con las condiciones específicas para lograr un 100% de probabilidades. Por otro lado, el aspecto de la generalización del mapa tampoco nos muestra exactamente una visualización verdadera de zonas propensas a incendios

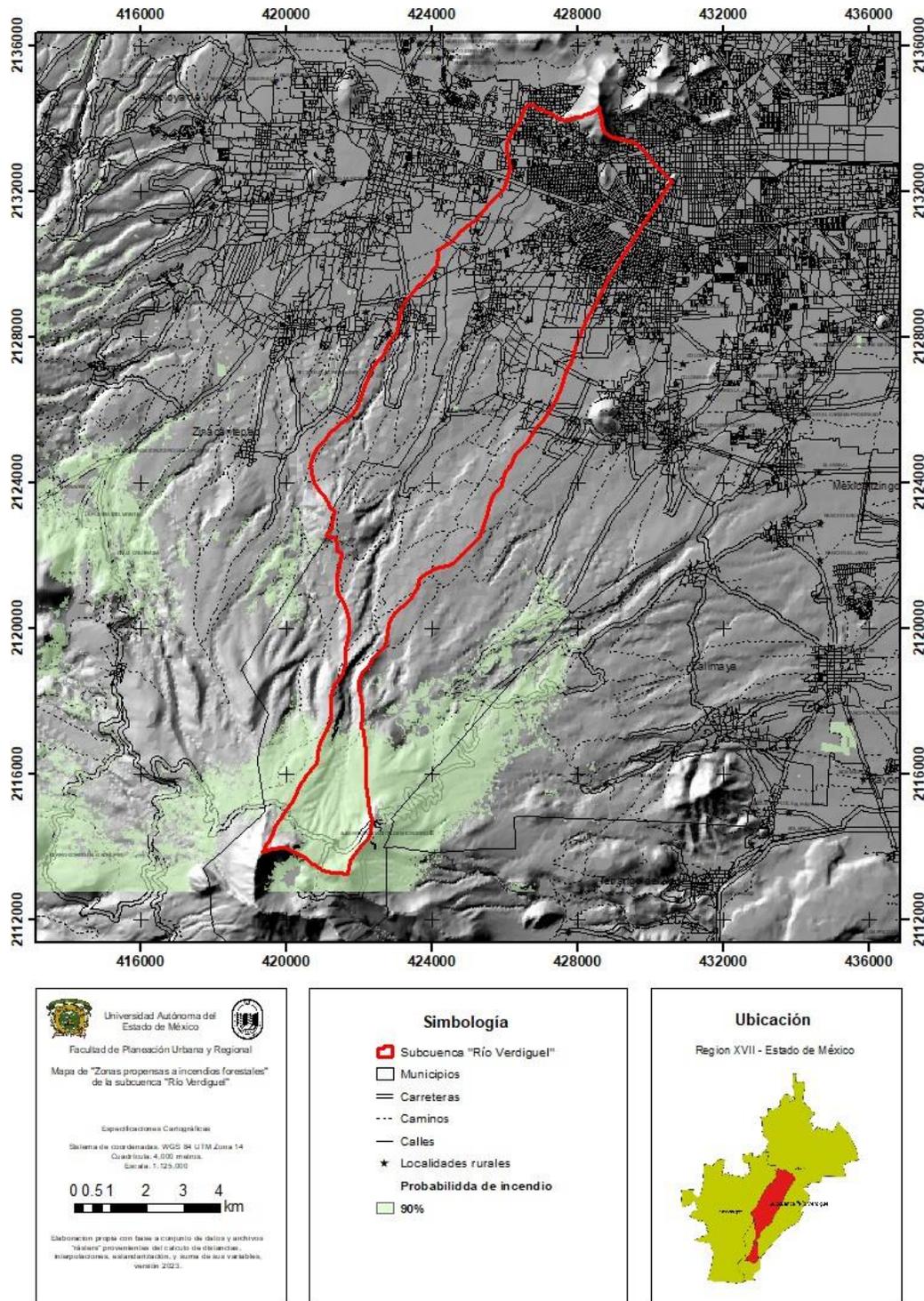
Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

forestales debido a que hay un conjunto de variables que en teoría cumplen con algunos de los requisitos para iniciar un incendio a pesar de ser zonas carentes de vegetación o algún tipo de combustible forestal, o en caso de tenerlos, estos pueden interpretarse como casos aislados, los cuales no tendría ningún tipo de incidencia o afectación a la zona como tal. Por otra parte, dichas zonas se encuentran con un índice de probabilidad de incendios por debajo incluso del 50%, por lo que, y para tener una mejor precisión con respecto a la zonificación de áreas susceptibles a incendios forestales, se llevó a cabo una reclasificación de los valores de la imagen ráster, de manera que se puedan descartar aquellas zonas que solamente cuentan con un cumplimiento general en cuanto a las variables y a sus pesos, pero que realmente no representan una potencial zona para que se presenten este tipo de fenómenos.

Para ello, se llevó a cabo una reclasificación de la imagen en ArcMap, en donde solamente se clasificaron 2 valores, de manera que, por un lado, se obtengan aquellos valores con un porcentaje de 90% hacia abajo (siendo estos los descartados), y considerado solamente aquellos valores de 90% en adelante como las potenciales zonas propensas a incendios forestales. Esta valoración, se llevó a cabo mediante una identificación de los objetos espaciales como lo son principalmente aquellas zonas con cierta concentración de vegetación (nuevamente con ayuda del NDVI), y de aquellas zonas que no contaban con ningún tipo de combustible, siendo estas el parteaguas para definir aquellas zonas que nos sirven de las que no.

Como resultado, obtenemos finalmente una adecuada identificación de aquellas zonas verdaderamente susceptibles a incendios forestales, y consecuentemente, un mapa correctamente estructurado de zonas propensas a incendios forestales.

Mapa 16. Zonas propensas a incendios forestales.



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "ráster" provenientes del cálculo de distancias, interpolaciones, estandarización, y suma de sus variables, versión 2023.

Capítulo 5. Resultados.

El mapa final de zonas susceptibles a incendios forestales, una vez realizado el filtro de aquellas zonas con carga de combustible forestal, nos muestra una amplia zona con potencial riesgo de incendio a las laderas del Nevado de Toluca, por lo que, para poder realizar un muestreo de la vegetación de la zona de manera no aleatoria, se utilizó el apoyo de puntos con registro de antecedentes de incendios forestales por parte de la CEPANAF (2019), de manera que, en conjunto con las zonas con riesgo potencial de incendio, nos indica de forma más precisa aquellos puntos donde la vegetación o las condiciones del lugar son aptas para este tipo de fenómenos, considerando específicamente 4 puntos de muestreo especificaos dentro de la zona de estudio y 2 en la zona exterior cercana.

Registro de incendio	Coordenadas	
CEPANAF	X	Y
Sitio 1	420539.57239	2114423.07828
Sitio 2	420637.119861	2114581.91031
Sitio 3	421405.02848	2115099.70353
Sitio 4	420820.772125	2115418.18029
Sitio 5	423042.862523	2114936.38004
Sitio 6	423536.975904	2115406.22382

Tabla 6. Sitios de muestreo. Fuente: Elaboración propia con base a datos de (CEPANAF, 2019)

Durante el recorrido de campo, se visitaron aquellos puntos de interés en relación a la información de la CEPANAF, obteniendo la siguiente galería de fotos en el proceso:

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

Sitio de muestreo No.1:

La primer zona de muestreo con registro de incendio se encuentra ubicada a una distancia aproximada de 10 metros del camino turístico hacia el cráter del volcán para automóviles, cuenta principalmente con vegetación secundaria de pastizal y plantas conocidas comúnmente como "Rosas de las nieves", dicha vegetación tiende a ser de carácter leñoso y con poca presencia de humedad, siendo que esta puede servir principalmente como combustible forestal. Por otro lado, dentro la zona, y gracias a su cercanía al camino turístico, se encontró gran presencia de basura como encendedores, botellas de vidrio, empaques de comida, entre algunos otros elementos, sirviendo esto como indicativo de la alta presencia humana que se tiene en esta zona, lo cual demuestra su elevado número de probabilidades de sufrir un incendio.



Imagen 1. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

Sitio de muestreo No.2:

Con una ubicación y características similares a la zona anteriormente descrita, el segundo sitio de muestreo, aunque con una distancia ligeramente más amplia, mantiene una cercanía de aproximadamente 12 metros del camino para automóviles hacia el cráter del volcán, con la diferencia de que en esta zona, el camino tiende a ser un tanto más rocoso y accidentado, con poca presencia de “Rosas de las nieves”, pero manteniendo en mismo grado la cantidad de vegetación secundaria de pastizal, teniendo además algunos ejemplares de vegetación arbórea como lo son pinos y algunos brotes de estos. Así mismo, y a pesar de su cercanía con el camino para automóviles, esta zona se encontró relativamente libre de basura, siendo la explicación más rápida el hecho de que su punto más cercano con el camino es en una curva, de manera que los automóviles no suelen detenerse ahí a comparación de un tramo completa o parcialmente plano.



Imagen 2. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Sitio de muestreo No. 3:

La siguiente zona cuenta con un mayor índice de vegetación, teniendo por supuesto, vegetación secundaria de pastizal, pero a su vez, otra especies de pantas y vegetación arbórea como “Cardo de los volcanes” (*Cirsium nivale*), “Fleo alpino” (*Phleum alpinum*), oyamel, pino, entre algunos otros tipos de vegetación. Estamos hablando de una zona relativamente apartada de caminos o puntos de interés para los turistas, por otro lado, es una zona que, gracias a su alta concentración de vegetación, tiende a conservar en mayor medida que las zonas anteriormente descritas, la humedad y la temperatura, por lo que la vegetación tiende a ser más vigorosa, sin embargo, al ser una zona con una mayor concentración de árboles, la corteza o el material seco que estos tienden expedir, convierten a esta zona en una excelente fuente de combustible forestal para un incendio, sin mencionar que, a pesar de tener una mayor concentración de vegetación, esta no es lo suficientemente extensa como para poder retener humedad suficiente y descartar esta zona como potencialmente inadecuada para un incendio.



Imagen 3. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Sitio de muestreo No. 4:

Con una situación similar a la zona anteriormente descrita, esta zona de muestreo cuenta principalmente con “Fleó alpino”, vegetación secundaria de pastizal, pero con la notable diferencia del cambio de vegetación arbórea por pinos y encinos. Esta zona también se encuentra relativamente apartada de caminos o puntos de convergencia para turistas o personas en general, sin embargo, su particular acumulación de hojarasca ha dejado cierto porcentaje del suelo “desnudo”, lo cual podría traducirse en una mayor acumulación de calor y radiación por parte del suelo, considerando a su vez la poca extensión de la vegetación para poder retener la temperatura y la humedad, y por último, el hecho de que se encontraron troncos casi enteros con una denotable degradación, dando a entender que estos podrían haber caído por alguna clase enfermedad en estos o algún hongo e particular, exponiendo en cualquiera de los casos a estos troncos como combustible forestal en cierta medida, debido a que a pesar de estar relativamente secos, aun contaban con cierta humedad por dentro.



Imagen 4. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

Sitio de muestreo No. 5:

Esta zona en particular se encuentra en un claro en el bosque, donde si bien se pueden encontrar especies arbóreas como piño, oyameles, cedros, entre algunos otros, la que se ubicó y considero como zona de muestreo solo cuenta con vegetación secundaria de pastizal, sin mencionar los grandes ejemplares de troncos enfermos, los cuales, se piensa, pudieron haber caído en primer lugar por algún hongo o enfermedad propio de estos, dejando los troncos en un proceso de degradación y a merced del entorno, dejando una mancha de suelo desnudo a su alrededor, teniendo a toda esta zona como un principal foco de calor y ausencia de humedad, pero lo más importante de esta zona es su ubicación, debido a que esta se encuentra exactamente al lado de un sendero para motociclistas, el cual, si bien cuenta con cierto señalamiento, no está particularmente regulado por algún cuerpo reglamentario en particular como guardabosques, por lo que, el acceso a dicho camino permite el paso de todo tipo de vehículos motorizados, la presencia de basura, y la elaboración de todo tipo de actividades generalmente prohibidas en los caminos “oficiales” hacia el cráter del volcán.



Imagen 5. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

Sitio de muestreo No. 6:

Por último, este sitio de muestreo, muy similar en cuanto a sus circunstancias con la zona anteriormente descrita, esta se encuentra en una claro dentro del bosque, aunque en este punto, la vegetacion no abunda tanto, teniendo un poco extensión de árboles como oyameles y pinos, teniendo una mayor extensión de vegetación secundaria de pastizal, a su vez que cuenta con presencia de “Rosas de las nieves”, por lo que la disponibilidad de material seco, residuos de madera y poca concentración humedad, impulsan a esta zona como un particular foco de probabilidades de incendio forestal, sin mencionar que, esta zona también se encuentra al lado de un camino no regulado para llegar al cráter del volcán, siendo que incluso apenas mantiene una distancia de aproximadamente 20 metros de la zona anterior, y al igual que dicha zona, su falta de regularización fomenta a que la gente lleve a cabo todo tipo de actividades generalmente no permitidas en zonas que si cuentan con la atención correcta, dejándola expuesta al factor antrópico y a todas las consecuencias que este podría tener n la zona.



Imagen 6. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

A su vez, se identificó presencia de 2 clases de vegetación en concreto en todas las áreas de interés: El primer grupo de vegetación identificado son pastizales pertenecientes al género *Muhlenbergia*, los cuales tienen presencia en todo el Nevado de Toluca, desde el pie de montaña, hasta el propio cráter. El segundo grupo de vegetación, y muy similar al grupo anterior, se identificó como *Eryngium monocephalum*, comúnmente conocida como “La rosa de las nieves”,

Está conformada por raíces carnosas, tallo grueso y hojas anchas y con espinas. Crece en alturas superiores a los tres mil metros sobre el nivel del mar y es capaz de soportar temperaturas bajo cero, suelos rocosos y vientos superiores a 60 kilómetros por hora. Esta planta florece bajo el refugio de los llamados pinos de las alturas (*Pinus hartwegii*), en las zonas boscosas más altas del Estado de México: los volcanes Xinantécatl, Iztaccíhuatl y Popocatépetl. Durante el invierno, cuando la nieve lo cubre todo, parece no tener vida. Pero de julio a octubre florece y ofrece alimento para algunos animales. La Rosa de las Nieves es una de las 627 especies de flora que habitan en el Nevado de Toluca, de las cuales, 52 se consideran endémicas y nueve están listadas bajo alguna categoría de riesgo en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010. (CONAFOR, La rosa de las nieves, 2017)

Este tipo de vegetación se caracteriza principalmente por tener una función similar a una esponja, esto debido al hecho de que, en temporada de secas, o cuando falta humedad en el ambiente, estas se secan completamente, pero con presencia de precipitaciones, o cuando las condiciones son más favorables, estas adquieren una tonalidad más viva y verdosa. Aunque un dato interesante a resaltar es que cuando este tipo de vegetación tiene una ausencia de humedad, puede servir perfectamente como combustible forestal al retener incluso menos humedad que los propios pastizales.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”



Imagen 7. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Por otro lado, en dichas zonas de estudio, así como en los caminos cercanos a estas, se visualizó la presencia de otras irregularidades como fauna feral, ganado, y principalmente basura, de los cuales, si bien no son directamente una causa en concreto para generar un incendio forestal, pueden influir bastante en ello al no estar regulada o supervisada su presencia dentro del área natural protegida, siendo que todas estas irregularidades están fuera del marco reglamentario del Parque de los Venados y del Nevado de Toluca.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”



Imagen 8. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)



Imagen 9. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”



Imagen 10. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”



Imagen 11. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

Por último, pero no por ello menos importante, durante el recorrido de campo, en el recorrido dentro del área identificada como “propensa a incendio forestal”, se detectaron los vestigios de un incendio en las coordenadas X: 417960 y Y: 2115359, el cual, había sido recientemente extinguido, en una zona en la que, para ese entonces, no se había tenido un registro o antecedente de incendio, demostrando la eficacia del mapa de incendios forestales previamente elaborado.

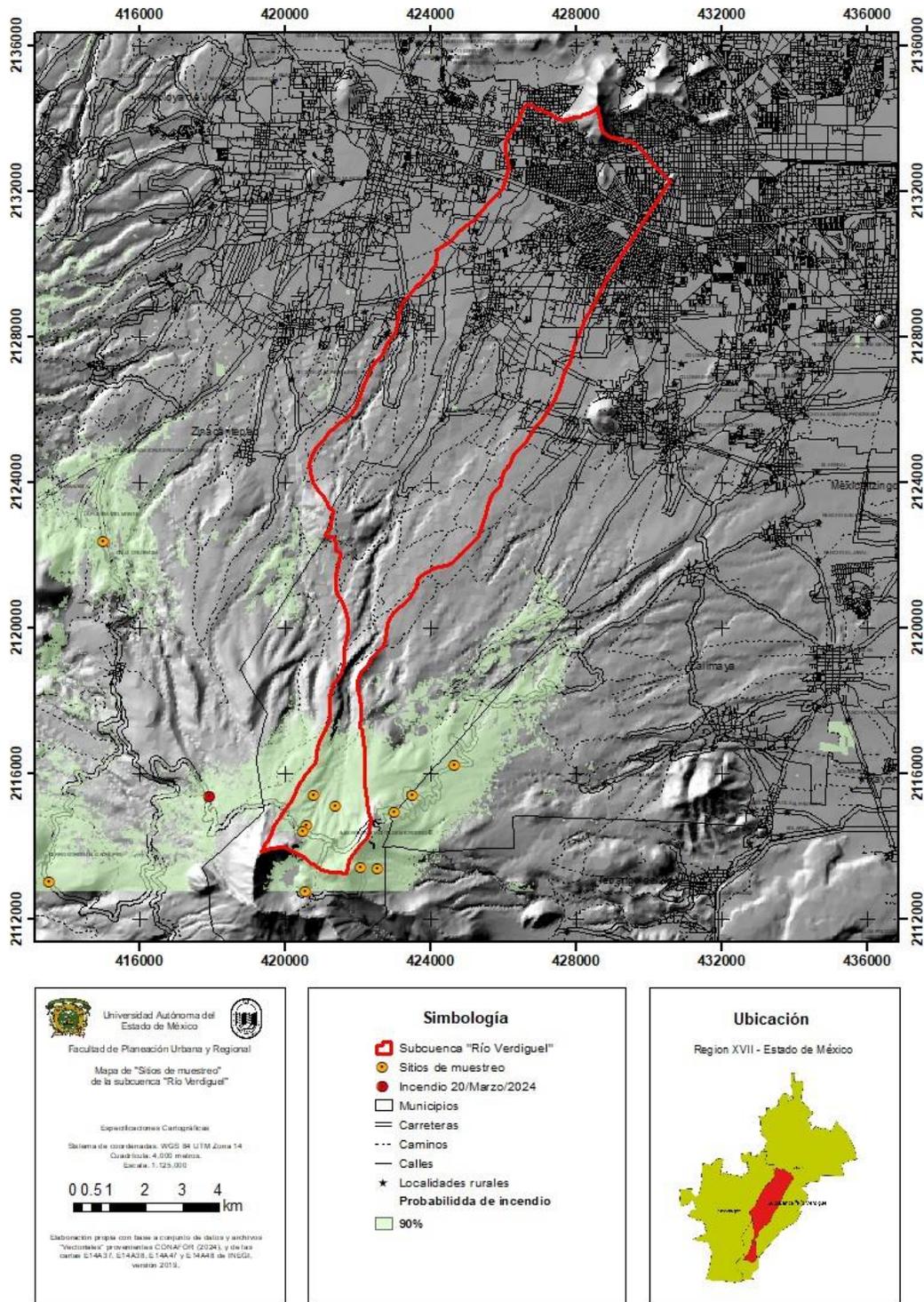
Dicha zona se encontró justo al lado del camino que va desde el “Parque de los venados” hacia el cráter del volcán, la cual a su vez, tenía presencia de líneas de comunicación las cuales atravesaban directamente el bosque desde la zona baja hasta la zona alta del nevado, considerando a su vez la presencia de basura en la zona, como anteriormente se mencionó, botellas de vidrio, bolsas de empaques, entre algunos otros deshechos.

Por otro lado, y siendo este un punto a favor para la zona en cuestión, y a pesar de que las propias líneas de comunicación existentes en la zona pueden representar un riesgo en cuanto a ser un factor en la probabilidad de generar un incendio forestal, el mismo camino que trazan los postes crea un “cortafuegos” o cual es una técnica utilizada por cuerpos de seguridad como bomberos o guardabosques para eliminar cierto rastro o porcentaje de la vegetación existente en una zona, limitando así la extensión del fuego.

En este caso no se sabe con exactitud si este cortafuegos que generaron los postes fue intencionado o no (aunque todo indicaría que no fue así), sin embargo, la falta de vegetación en este tramo, y la gran y denotable división que crea, fue un gran apoyo para los cuerpos de seguridad correspondientes a la hora de combatir este incendio y evitar que se propagara.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Río Verdiguel”

Mapa 17. Sitios de muestreo (CEPANAF).



Fuente: Elaboración propia con base a conjunto de datos y archivos "ráster" provenientes del cálculo de distancias, interpolaciones, estandarización, y suma de sus variables, versión 2023.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”



Imagen 12. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)



Imagen 13. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”



Imagen 14. (Fuente: Captura propia tomada el 20 de marzo del 2024)

Conclusiones

El mapa final de zonas propensas a incendios forestales nos muestra apropiadamente todas aquellas zonas que cumplieron con el conjunto de variables (y sus respectivos pesos) requeridas para dar inicio a uno de estos siniestros. No obstante, y como se mencionó anteriormente, y como una de las desventajas de esta metodología, es que, en un inicio, el primer resultado se generalizó bastante en la zona, por lo que, para correcta interpretación del mapa, es necesario volver a hacer un análisis espacial, de manera que, a pesar de tener una zona establecida, todavía se deben aislar algunos elementos de esta.

En cuanto a los incendios como tal, se llegó a la conclusión de que, si bien es posible que los factores ambientales puedan llegar a influir y generar un incendio forestal, se deduce que la principal causa de estos es de carácter antrópico, pues la presencia humana se hizo notar en todos los puntos con antecedentes de incendios al encontrar latas de aluminio, botellas de vidrio, empaques de comida, entre algunas otras; además del considerable hecho de que todos estos puntos mantienen una cercanía con los caminos o puntos de interés en el Nevado de Toluca, lo que implica, por sobre muchas otras cosas, que la principal causa de estos incendios, ya sean intencionados o no, provienen directamente de la mano humana, lo cual, en conjunto con el equiparablemente poco personal de vigilancia para un área tan extensa, propicia al descuido de aquellos visitantes cuyas acciones pueden derivar en un incendio forestal.

Cabe resaltar el hecho de que en la visita de campo, solo se visitaron aquellos sitios de muestreo que ya tenían un antecedente de incendio como método para agilizar y precisar datos sobre el mapa de zonas susceptibles a incendios forestales, sin embargo, y así como también se muestra en el mapa, el trabajo de campo y el muestreo se pueden extender aún más dependiendo de cuál sea la pertinencia de la situación, pues si bien se usaron sitios de muestreo en un rango de probabilidad del 90%, podríamos optar por algo incluso más preciso como un rango del 95%, o

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

bien, extender el muestreo no solamente a aquellas zonas con un antecedente de incendio.

Es pertinente mencionar que, si bien las variables y las metodología en general se usaron de manera que se arrojaran datos sobre lo que es la zona boscosa o con masa forestal en la zona de estudio y alrededores, cabe mencionar que los incendios no solo se limitan a estas áreas, pues como se vio en el apartado de la caracterización, gran parte de la subcuenca cuenta con áreas agrícolas, las cuales, y al igual que las masas forestales, también están expuestas a estas variables.

Por otro lado, la aplicación de la evaluación multicriterio y una matriz como lo es el método de las jerarquías analíticas, nos permite hacer una valoración de un tema con diversas variables de casi cualquier tema en cuanto a la identificación de ciertos aspectos en alguna zona y en la toma de decisiones, sin embargo, es pertinente mencionar que este tipo de metodologías se deben limitar a cierto número de variables de manera que se tenga una precisión más exacta en cuanto a los resultados, pues si bien no cualquier cosa puede influir en un incendio, se deben elegir específicamente aquellas variables a utilizar, aunque, teniendo como principal atractivo y ventaja, la EMC, en conjunto con el tema de los incendios, nos permite hacer una valoración de este fenómeno en cualquier otra zona, lo que implica que esta metodología es perfectamente aplicable a otras regiones tanto de México, como del mundo, pues una de las mayores limitantes a la hora de tratar estos temas es el “como”.

Hoy en día existen diversas metodologías y ponderación de valores aplicables a incendios forestales, siendo la desventaja de estas que sus lineamientos son meramente aplicables a dichas zonas de origen; véase como ejemplo países como Colombia o Canadá, los cuales tienen lineamientos, estrategias y valores preestablecidos a cierto tipo de variables, para generar un mapa de incendios forestales, siendo muchos de estos lineamientos son meramente aplicables a climas fríos, o a un tipo de vegetación en específico, por lo que la EMC nos abre un panorama en donde podemos jugar con los elementos que se encuentran al alcance

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

de la zona de estudio a tratar, de manera que uno como especialista, o en conjunto, pueda determinar cuáles son aquellas variables que influyen en un incendio sin tener que limitarse a otros lineamientos, donde bien se podrían considerar variables que podrían no existir dentro de la zona de estudio, o bien estar omitiendo información relevante para poder identificar alguno de estos fenómenos,

En cuanto al tema de las imágenes satelitales y la teledetección, nos abren un nuevo panorama en cuanto al análisis espacial y el manejo de diversas problemáticas, pues como se puso ver anteriormente, estas pueden ayudarnos a identificar recursos o problemáticas en zonas de difícil acceso, o apoyar en trabajos donde el presupuesto o los recursos para llevarlo a cabo son limitados, siendo que también, y gracias al registro histórico de fuentes como WorldClim y LandViewer, podemos hacer una regresión en lo que concierne a como se comportaban variables de vegetación, clima, suelo, expansión urbana, entre algunas otras. Y a pesar de que siempre se va a requerir un porcentaje de presencia humana para poder corroborar la información que nos brindan la teledetección, podemos disminuir el tiempo y recursos requeridos al tratar con muchas de las problemáticas posibles a tratar con este tipo de herramientas.

Aunque, teniendo en cuenta la fuente de aquellas imágenes satelitales que podamos llegar a utilizar en algún trabajo futuro, o como lo fue en este caso, para tratar temas de incendios forestales, los datos obtenidos, así como la propia integridad de las imágenes satelitales, quedaran sujetas a la calidad de estas y el que tan complicado sea obtenerlas, de forma que podemos encontrar problemas en el camino como lo son la resolución y calidad en las imágenes, o los elementos que se pueden llegar a mostrar en estas, siendo que algunos factores ambientales, como la presencia de nubosidad y nieve pueden afectar en la combinación de las bandas o firmas espectrales de las imágenes para poder discriminar algún elemento en el ambiente, y a pesar de poder llegar a implementar el uso de algún índice o fórmula para “ignorar” dichos elementos, estos no siempre nos arrojaran datos con una precisión del cien por ciento, lo cual en parte, también influyó bastante en la realización de este trabajo al procurar una fecha apropiada donde no hubiese algún

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

rastros de nubosidad en el entorno que pudiese reflejar parte de flujo energético emitido por parte de los sensores de los satélites de donde se obtuvieron las imágenes satelitales de la zona de estudio.

Para finalizar, la aplicación de EMC y teledetección, nos brindan como resultado una fuerte herramienta a la hora de tratar con problemáticas de carácter espacial, en la toma de decisiones, y por supuesto, para lidiar con dichas problemáticas, siendo que también es posible llegar a un conjunto de soluciones sobre una problemática con estas herramientas al poder evaluar y posicionar en un orden apropiado aquellas variables y propuestas requeridas para poder mitigar algún siniestro, ayudar en el ámbito de la prevención de riesgos, y con motivo del presente trabajo, ayudar en la prevención de incendios forestales.

Recomendaciones

Como se mencionó anteriormente, la aplicación de la EMC y el método de Jerarquías Analíticas de Saaty, así como el uso de sistemas de información geográfica, no queda solamente a la identificación de problemáticas, así como a un solo campo de estudio y trabajo, debido a que esta metodología se puede usar en varios campos y para diversos propósitos, podemos aplicar al campo de la resolución de problemáticas también al poder identificar aquellas zonas donde se podría controlar un incendio al tomar en cuenta variables, tanto de las que provocan un incendio, así como las no incluidas como servicios de emergencia, a la hora de elaborar un plan de acción en la zona contra incendios forestales.

Por otro lado, la precisión de esta metodología en conjuntos con los sistemas de información geográfica, puede ahorrar mucho tiempo y recursos, no solamente en cuanto a las visitas y recorridos de campo, sino también, en caso de requerir hacer un trabajo más preciso, pues si bien, las imágenes satelitales mantienen una buena resolución con la cual se puede trabajar apropiadamente, al ser imágenes muy generales sobre cualquier zona en concreto, pueden pasar por alto algunos elementos en el entorno, así como estas también se ven afectadas por las condiciones del tiempo atmosféricos, por lo que, y para fines más prácticos y precios, en muchas ocasiones se opta por el trabajo de vuelo con drones, los cuales se encargan de tomar imágenes más precisas de la zona de estudio, lo cual en otras condiciones podría considerarse como un trabajo extenuante al trabajar sobre una zona tan grande, pero al contar con puntos específicos, como los que nos arrojó el mapa de zonas susceptibles a incendios forestales, podemos hacer un vuelo directo, también ahorrando tiempo en esta metodología, y obteniendo datos aún más precisos.

Por último, los incendios a considerar para este trabajo fueron los más conocidos, superficiales y aéreos, los cuales se dan en la capa exterior del árbol, lo que por lo regular se ve a simple vista, sin embargo, los incendios subterráneos, los cuales afectan principalmente raíces secas, pueden propagarse de formas muy diferentes

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

a las anteriormente vistas, por lo que, para tener una mayor precisión en cuanto a un incendio en el sentido estricto de la palabra, se pueden realizar otro tipo de estudios en la zona, los cuales vayan más enfocados al estudio y análisis de los tipos, edad y longitud de las raíces de los árboles y vegetación en general de la zona, así como del tipo de suelo y el cómo propicia este a la humedad de la vegetación, de manera que se tengan resultados de que tan expuestas quedan las raíces de las masas forestales y vegetales del “Nevado de Toluca” a un incendio subterráneo.

Bibliografía

- agua, C. d. (2024). Obtenido de Agua: <https://agua.org.mx/cuerpos-de-agua/>
- Ariza, A. (2013). *Descripción y Corrección de Productos Landsat 8*. Obtenido de Landsat Data Continuity Mission: https://eva.fing.edu.uy/pluginfile.php/240834/mod_folder/content/0/Lecturas/LDCM-L8.R1.pdf
- ASTROINGEO. (30 de diciembre de 2023). *La Radiación Solar: Fuente de Vida y Energía*. Obtenido de Astroingeo Blog: <https://blog.astroingeo.org/sistema-solar/radiacion-solar>
- Bañuelos, L. A. (14 de Febrero de 2021). *Análisis de la distribución espacial de Arceuthobium globosum implementando teledetección en el área de protección de flora y fauna Nevado de Toluca*. Obtenido de Repositorio Institucional UAEMex: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/109803>
- Borunda, A. (21 de septiembre de 2020). *¿Cuál es la relación entre los incendios forestales y el cambio climático?* Obtenido de National Geographic: <https://www.nationalgeographicla.com/ciencia/2020/09/cual-es-la-relacion-entre-los-incendios-forestales-y-el-cambio-climatico>
- Castañeda Rojas, M. F. (1 de Julio de 2013). *EVALUACIÓN DE ZONAS VULNERABLES A INCENDIOS FORESTALES EN BOSQUES DE ALTA MONTAÑA DEL ESTADO DE MÉXICO*. Obtenido de Repositorio Institucional UAEMex: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/64378>
- Castañeda Rojas, M. F., Endara Agramont, A. R., Villers Ruiz, M. d., C Nava Bernal, E. G. (2015). *Evaluación forestal y de combustibles en bosques de Pinus hartwegii en el Estado de México según densidades de cobertura y vulnerabilidad a incendios*. Obtenido de Redalyc: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61740807004>
- Castro, M. (20 de abril de 2020). *Litosol: características y usos*. Obtenido de Liferder: <https://www.liferder.com/litosol/>
- Castro, M. (20 de abril de 2020). *Regosol: características y usos*. Obtenido de Liferder: <https://www.liferder.com/regosol/>
- CEAPE. (2017). *Los Bosques del Estado de México*. Obtenido de Consejo Editorial de la Administración Pública: https://ceape.edomex.gob.mx/sites/ceape.edomex.gob.mx/files/BOSQUES_-1-50.pdf
- CENAPRED. (16 de Abril de 2021). *¿Por qué ocurren los incendios forestales?* Obtenido de Centro Nacional de Prevención de Desastres: <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/por-que-ocurren-los-incendios-forestales?idiom=es>

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

- CENAPRED. (30 de Marzo de 2021). *Tecnología espacial y percepción remota en la prevención de desastres*. Obtenido de Centro Nacional de Prevención de Desastres: <https://www.gob.mx/cenapred/articulos/tecnologia-espacial-y-percepcion-remota-en-la-prevencion-de-desastres>
- CEPANAF. (2019). *Antecedentes de incendios forestales*. Obtenido de CEPANAF: <https://cepanaf.edomex.gob.mx/restauracion-fomento-forestal>
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial*. Madrid: Ediciones RIALP.
- Comino, A., C Brzezinski, T. (2023). *Concepto de pendiente*. Obtenido de GeoGebra: <https://www.geogebra.org/m/wmGn9JAW>
- CONAFOR. (30 de marzo de 2017). *La rosa de las nieves*. Obtenido de Comisión Nacional Forestal: <https://www.gob.mx/conafor/articulos/la-rosa-de-las-nieves?idiom=es>
- CONAFOR. (2023). *Manejo del fuego*. Obtenido de Sistema Nacional de Información Forestal: <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>
- EDOMEX. (31 de julio de 2024). *INCENDIOS FORESTALES EN EDOMÉX*. Obtenido de GOBIERNO DEL ESTADO DE MÉXICO: https://edomex.gob.mx/incendios_forestales
- EOS. (2 de Junio de 2022). *Análisis Espacial De Datos: Tipos, Prácticas Y Usos*. Obtenido de EOS Data Analytics: <https://eos.com/es/blog/analisis-espacial/>
- FAO. (2007). *Situación de los bosques del mundo*. Obtenido de FAO: https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Los_servicios_ambientales_de_los_bosques_AEET.pdf
- Figuerola, L. F. (2020). *ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ESTADO DE MÉXICO DURANTE EL PERIODO 200S - 201S*. Obtenido de Repositorio Institucional UAEMex: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/110687>
- Flores Garnica, J. G., Cabrera Orozco, R. G., C Meléndez Gómez, M. (junio de 2006). *Comportamiento del fuego en incendios forestales*. Obtenido de INIFAP: https://www.camafu.org.mx/wp-content/uploads/2017/12/Triptico_Comportamiento_del_fuego_V_4.pdf
- Flores Rodríguez, A. G., Flores Garnica, J. G., González Eguiarte, D. R., Gallegos Rodríguez, A., Zarazúa Villaseñor, P., C Mena Munguía, S. (30 de Noviembre de 2021). *Análisis comparativo de índices espectrales para ubicar y dimensionar niveles de severidad de incendios forestales*. Obtenido de Instituto de Geografía UNAM: <http://www.investigacionesgeograficas.unam.mx/index.php/rig/article/view/60396>
- Servicio Nacional de Manejo del Fuego, S. N. (14 de octubre de 2023). *¿Cuáles son las variables y qué factores las afectan?* Obtenido de Argentina.gob.ar: <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/fuego/conocemas/variables>

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

- García, N. A. (julio de 2018). “*VISUALIZADOR WEB DE LAS ZONAS SUSCEPTIBLES A INCENDIOS FORESTALES EN EL ÁREA DE PROTECCIÓN DE FLORA Y FAUNA NEVADO DE TOLUCA*”. Obtenido de Repositorio Institucional UAEMex: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/106191>
- García, N. A. (15 de Julio de 2018). *Visualizador web de las zonas susceptibles a incendios forestales en el área de protección de flora y fauna*. Obtenido de Repositorio Institucional UAEMex: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/106191>
- Gardey, A. (24 de Junio de 2014). *Altitud - Qué es, definición y concepto*. Obtenido de Definicion.de: <https://definicion.de/altitud/>
- Gardey, A. (24 de Mayo de 2021). *Calor - Qué es, definición y concepto*. Obtenido de Definicion.de: <https://definicion.de/calor/>
- Geoenciclopedia. (13 de Diciembre de 2022). *Incendio forestal: qué es y cómo se produce*. Obtenido de Geoenciclopedia: https://www.geoenciclopedia.com/incendio-forestal-que-es-y-como-se-produce-30.html#anchor_1
- GeoEnciclopedia. (9 de Enero de 2023). *Relieve Terrestre*. Obtenido de GeoEnciclopedia: <https://www.geoenciclopedia.com/relieve-terrestre-86.html>
- Geotecnia. (2024). *LANDVIEWER – La herramienta potente para análisis de Teledetección Espacial SIG*. Obtenido de Geotecnia Fácil: <https://geotecniafacil.com/landviewer/#:~:text=LandViewer%20es%20un%20asistente%20SIG%20r%C3%A1pido,an%C3%A1lisis%20de%20teledetecci%C3%B3n%20en%20tiempo%20real.Ctext=LandViewer%20es%20un%20asistente,teledetecci%C3%B3n%20en%20tiempo%20real.Ctext=un%20asis>
- Gómez Delgado, M., C Barredo Cano, J. I. (2005). *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid: Ra-Ma S.A. Editorial y Publicaciones.
- Gómez, C. F. (21 de marzo de 2023). *Andosol*. Obtenido de Lifeder: <https://www.lifeder.com/andosol/>
- Grudemi, E. (Octubre de 2022). *Bosque*. Obtenido de Enciclopedia de Biología: <https://enciclopediadebiologia.com/bosque/>
- INEGI. (2022). *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/investigacion/ndvi/>
- INEGI. (16 de abril de 2024). *Clima del Estado de México*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/mex/territorio/clima.aspx#:~:text=Estado%20de%20M%C3%A9xico%20Clima%20El%2073%25%20del%20estado,localizado%20en%20las%20partes%20altas%20de%20los%20volcanes>.

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguel”

- INEGI. (12 de junio de 2024). *Uso de suelo y vegetación*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/>
- Iveth, R. E. (Febrero de 2021). *Vulnerabilidad al fuego en áreas forestales del campo experimental las cruces mediante un análisis multicriterio*. Obtenido de Repositorio Chapingo: <https://repositorio.chapingo.edu.mx/items/eba83545-9322-47e3-8649-d58c4afbcba6>
- López, M., C Vaca, M. (10 de Diciembre de 2015). *El Clima*. Obtenido de La Geografía: <https://lageografia.com/geografia-fisica/el-clima>
- Maldonado, Y. (26 de octubre de 2021). *Andesita*. Obtenido de Geologiaweb: https://geologiaweb.com/rocas/andesita/#Origen_y_formacion_de_la_andesita
- Maldonado, Y. (26 de octubre de 2021). *Areniscas*. Obtenido de Geologiaweb: <https://geologiaweb.com/rocas/areniscas/>
- Maldonado, Y. (25 de octubre de 2021). *Rocas ígneas, tipos, clasificación y ejemplos*. Obtenido de Geologiaweb: https://geologiaweb.com/rocas/rocas-igneas/#Rocas_igneas_extrusivas_o_volcanicas
- Maldonado, Y. (25 de octubre de 2021). *Toba volcánica*. Obtenido de Geologiaweb: <https://geologiaweb.com/rocas/toba-volcanica/>
- Martínez, C. R. (20 de Octubre de 2016). *Los patrones de distribución espacial y temporal de los incendios forestales en Almoloya de Juárez (2005-2015)*. Obtenido de Repositorio Institucional UAEMex: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/65679>
- Medical Assistant. (23 de Enero de 2023). *Medical Assistant*. Obtenido de Triángulo del fuego: ¿qué es y por qué se debe tomar en cuenta?: <https://ma.com.pe/triangulo-del-fuego-que-es-y-por-que-se-debe-tomar-en-cuenta>
- Merino, M. (10 de Noviembre de 2021). *Fuego - Qué es, definición y concepto*. Obtenido de Definicion.de: <https://definicion.de/fuego/>
- Millan, M. E. (6 de Agosto de 2015). *Modelo Espacial para la evaluación del riesgo de incendios forestales en el suelo de conservación del Distrito Federal*. Obtenido de Repositorio Institucional UAEMex: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/41213>
- Murcia, K. Y. (24 de Octubre de 2016). *ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR INCENDIOS FORESTALES EN EL SECTOR RURAL DEL MUNICIPIO DE TOTA BOYACÁ CON EL EMPLEO DE SIG*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia: <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1882>
- Pineda, J. A. (2024). *Suelos Cambisoles*. Obtenido de encolombia: <https://encolombia.com/economia/agroindustria/agronomia/suelos-cambisoles/>
- Portillo, G. (2024). *Vapor de agua*. Obtenido de Meteorología en Red: <https://www.meteorologiaenred.com/vapor-de-agua.html>

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

- Ricardo, R. (4 de mayo de 2023). *Brechas en Geología: Características, ubicación y formación*. Obtenido de Estudiando: https://estudiando.com/brechas-en-geologia-caracteristicas-ubicacion-y-formacion/#%C2%BFQue_es_una_Brecha
- Rivera, N. R. (12 de Agosto de 2011). *La definición y medición de la vulnerabilidad social. Un enfoque normativo*. Obtenido de SciELO: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttextCpid=S0188-46112012000100006
- Rodríguez, D. (13 de julio de 2023). *Clima frío*. Obtenido de Liferder: <https://www.liferder.com/caracteristicas-del-clima-frio/>
- Romero, A. C. (15 de Febrero de 2015). *Identificación de Zonas Óptimas para Plantaciones Forestales Comerciales en Ambiente SIG y Evaluación Multicriterio, Caso de Estudio, Estado de México*. Obtenido de Repositorio Institucional UAEMex: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/106180>
- Ruiz Pérez, M., García Fernández, C., C Sayer, J. A. (septiembre de 2007). *Los servicios ambientales de los bosques*. Obtenido de Asociación Española de Ecología Terrestre: https://www.ccmss.org.mx/wp-content/uploads/2014/10/Los_servicios_ambientales_de_los_bosques_AEET.pdf
- Ruiz, M. (26 de febrero de 2024). *Resumen completo de la evaporación del agua, proceso y ejemplos de transformación*. Obtenido de BioSpace: <https://www.biospace.es/evaporacion-del-agua/>
- Ruiz, M. d. (5 de Octubre de 2009). *Incendios Forestales*. Obtenido de Ciencias: <https://revistas.unam.mx/index.php/cns/article/view/12036>
- Sacchi, G. (28 de octubre de 2020). *EL IMPACTO DE LOS INCENDIOS EN LOS SUELOS*. Obtenido de Desde el Conocimiento: <https://desdeelconocimiento.com.ar/el-impacto-de-los-incendios-en-los-suelos/>
- Salcedo, A. (17 de agosto de 2023). *Clima Templado Subhúmedo: Características, Flora, Fauna y Adaptabilidad*. Obtenido de Sembrar 100: <https://www.sembrar100.com/el-clima/templado-subhumedo/>
- Seguridad Minera. (24 de Enero de 2013). *Combustible, oxígeno, calor y reacción química: un tetraedro peligroso*. Obtenido de Seguridad Minera: <https://www.revistaseguridadminera.com/emergencias/combustible-oxigeno-calor-y-reaccion-quimica-un-tetraedro-peligroso/>
- SEMARNAT. (26 de Febrero de 2018). *Incendios forestales*. Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/incendios-forestales-148160>

Identificación de zonas susceptibles a incendios forestales por medio de teledetección y sistemas de información geográfica en la subcuenca “Rio Verdiguél”

SEMARNAT. (26 de febrero de 2018). *Incendios Forestales*. Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/incendios-forestales-148160>

SEMARNAT. (7 de febrero de 2021). *Bosques de México, riqueza forestal y biodiversidad*. Obtenido de Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/bosques-de-mexico-riqueza-forestal-y-biodiversidad?idiom=es>

SEMARNAT. (29 de Enero de 2023). *Temporadas de incendios forestales en México*. Obtenido de SEMARNAT: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/temporadas-de-incendios-forestales-en-mexico#:~:text=En%20M%C3%A9xico%20se%20tienen%20identificadas%20dos%20temporadas%20de,de%20mayor%20estiaje%20%28sequ%C3%ADa%29%20en%20el%20territorio%20nacional.>

SEMARNAT. (2024). *Edafología*. Obtenido de SEMARNAT: <https://mia.semarnat.gob.mx:8443/ManifestacionImpactoAmbiental/faces/modarchivos/downloadFile.xhtml?idArchivoProyecto=844683Ctipo=general>

Servicio Geológico Mexicano. (22 de Marzo de 2017). *Sistemas de información geográfica*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/SIG/Introduccion-SIG.html>

SGM. (22 de marzo de 2017). *Depósitos piroclásticos y rocas piroclásticas*. Obtenido de Servicio Geológico Mexicano: <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Depositos-piroclasticos-y-rocas.html>

Tejocote, A. T. (Noviembre de 2018). *Análisis de las concentraciones de monóxido de carbono utilizando los datos de las estaciones de la red automática de monitoreo atmosférico de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca en el período de 2011 al 2017*. Obtenido de Repositorio Institucional UAEMex: <http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/98633>

WorldClim. (2022). *Global climate and weather data*. Obtenido de WorldClim: <https://worldclim.org/data/index.html>