



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

COLEGIO DE GEOGRAFÍA

LA PRADERA DE ALTA MONTAÑA EN EL VOLCÁN IZTACCÍHUATL, CON
ÉNFASIS EN LOS CAMBIOS DE SU LÍMITE SUPERIOR

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

LICENCIADO EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

ULYSSES GERARDO RAMIREZ ESPINOSA



ASESORA: DRA. MARÍA ENGRACIA HERNÁNDEZ CERDA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX. 2021.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, pues me abrió las puertas para poder desarrollarme profesionalmente, a la Facultad de Filosofía y Letras y al colegio de Geografía, por el conocimiento que me brindaron durante la licenciatura.

Quiero agradecer también a la Comisión Nacional Para Uso y Conocimiento de la Biodiversidad en especial al área de Percepción Remota por las enseñanzas cartográficas básicas en la elaboración de esta tesis.

Un fraternal agradecimiento al Dr. Rigel Alfonso Zaragoza Álvarez, pues la base de esta tesis es gracias a él, quién fue mi primer asesor de tesis, pero por cuestiones laborales no pudimos concretar.

Al Instituto de Geografía de la UNAM, por brindarme la literatura y de las herramientas tecnológicas, así como también la otorgación de la beca Macgregor, ya que estos recursos me sirvieron para la culminación de esta tesis.

Agradezco a mi tutora la Dra. María Engracia Hernández Cerda, en la elaboración de esta tesis, así como por ayudarme en la obtención de recursos por parte del instituto de Geografía de la UNAM.

Quiero agradecer a los sinodales Mto. Frank Gustavo García Rodríguez, Lic. Eduardo González Hernández, Dra. Roció Marisol Alanís Anaya y la Dra. María de Lourdes Rodríguez Gamiño por su tiempo en la revisión de la tesis.

A mi mamá Sandra Ivonne Ramirez Espinosa, por apoyarme en todos los sentidos durante toda la vida en cada uno de mis objetivos incluyendo el presente trabajo, así como a mis tíos, tías, primos y primas.

Índice

Introducción	1
Planteamiento del problema	1
Justificación	2
Objetivos	4
Hipótesis.....	4
Marco teórico.....	5
Capítulo 1 Percepción remota.....	10
1.1 Fundamentos	10
1.2 Aplicaciones.....	15
1.3 Índices	17
1.3.1 NDMI	17
1.3.2 NDVI	18
1.3.3 RDVI.....	19
1.3.4 RVI	19
1.3.5 SAVI	20
1.4 Proyecto Landsat.....	21
Capítulo 2 Descripción del área de estudio.....	28
2.1 Localización geográfica.....	28
2.2 Geología	29
2.3 Geomorfología	30
2.4 Suelo.....	33
2.5 Clima.....	36
2.6 Vegetación.....	37
Capítulo 3 Metodología.....	42
3.1 Método FAO 1996	42
3.1.1 Diseño de muestreo	42
3.1.2 Modelo analítico	43
3.1.3 Clasificación.....	45
Capítulo 4 Análisis de resultados	50
4.1 Distribución actual de la vegetación	50
4.1.1 Mapas de vegetación del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989 y el periodo 2015-2019.....	50

4.1.2 Mapa de cambio del LSPAM del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989 al periodo 2015-2019	53
4.1.3 Mapa de altimétrico del volcán Iztaccíhuatl con el límite superior de la pradera de alta montaña del periodo 1985-1989 y el periodo 2015-2019	55
4.1.4 Áreas de las capas	57
4.1.5 Diferencias y análisis entre el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989 al periodo 2015-2019.....	58
4.2 Relación de los resultados con las consecuencias que trae la perturbación antrópica y natural en los servicios ambientales del ecosistema de pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl.	61
4.3 Medidas de mitigación y conservación con miras al manejo del ecosistema de la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl.	64
Conclusiones	66
Bibliografía	70
Anexos.....	78

Introducción

El volcán Iztaccíhuatl es una de las montañas más grandes de México, la cual alberga una gran biodiversidad, pues debido a su altitud se desarrollan diferentes ecosistemas, pero debido a factores físicos y antrópicos últimamente este lugar ha sufrido cambios en la distribución de sus ambientes.

Los estudios de cambio de uso de suelo y vegetación pueden ser un referente para conocer las trayectorias de distintos procesos asociados con la degradación, perturbación y pérdida de la biodiversidad (Camacho-Sanabria *et al.*, 2015 op Cit. Lambin *et al.*, 2001) y se puede tener una mejor evaluación de las problemáticas ambientales ya que estos estudios dan a conocer la ubicación y cuantificación de áreas que definen las tendencias de posibles procesos de degradación y pérdida de biodiversidad (Trucios R, *et al.*, 2013 op cit. Palacio *et al.*, 2004; Berlanga *et al.*, 2009).

En este trabajo se estudió el límite superior de la pradera de alta montaña (LSPAM), para conocer si esta vegetación ha sufrido modificaciones, para ello se empleó el uso de sistemas de información geográfica (SIG), en especial en el uso de la Percepción Remota para estudiar dos periodos de tiempo: 1985-1989 y 2015-2019, donde se analizaron y se describieron qué factores antrópicos y físicos que influyeron en dicho cambio.

También se planteó cómo estas perturbaciones afectan en los servicios ambientales de la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl y las medidas que se deben de tomar para su conservación, y poder coadyuvar en la identificación de las problemáticas en específico las que están presentes y se comience a operar en posibles soluciones o en la mitigación de estos problemas ambientales.

Planteamiento del problema

La pradera de alta montaña es un ecosistema de abundancia restringida en México ya que sólo ocupa 177.469 km² (0.009 % de la superficie continental del territorio nacional), donde el mayor porcentaje se localiza dentro de la Faja Volcánica

Transmexicana (FVT). En el volcán Iztaccíhuatl esta vegetación ocupa 38.620 km², el cual se caracteriza por situarse por arriba de los 4 000 m de altitud ya que aproximadamente es el límite que alcanza el bosque, pasando esa altitud se desarrolla un ambiente con un clima frío y húmedo (INEGI, 2017).

En esta montaña la distribución de la vegetación ha sufrido cambios pues Torres (2012), identifico que el límite superior del bosque de pino se ha modificado teniendo un incremento, por lo cual para la pradera de alta montaña debe de ocurrir algo similar, pues estos cambios se deben a que hay factores ambientales, físicos y antrópicos que han modificado el límite superior de la pradera de alta montaña (LSPAM) del volcán Iztaccíhuatl, por lo que estas modificaciones pueden llegar a provocar un deterioro ambiental y pérdida de la diversidad biológica (Bocco *et al.*, 2001).

Por ello es importante conocer si el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl ha tenido un cambio ascendente o descendente en los últimos años, esto servirá para saber cuáles son los factores que producen dichas modificaciones en este ecosistema, con lo cual se podrá proceder para en un futuro identificar el problema específico y después que se da una solución o mitigación al mismo.

Por lo cual se estudiara un cambio en el uso de suelo, por lo cual para poder hacer este análisis se hace el uso los sistemas de información geográfica (SIG) ya que Lopez *et al.*, (2014, op cit. Braimoh, 2006), afirma que los procesos de cambio se basan en factores causales de cambio, por lo que el análisis del proceso de cambio, permite observar la transformación del paisaje de una manera metódica.

Justificación

La pradera de alta montaña ha sido ya estudiada por diversos investigadores, entre los que se pueden mencionar a Delgadillo, (1971, op cit. Escamilla, 2007), que estudió la distribución de musgos; Beaman (1962), Beaman (1965), observó cómo el límite altitudinal del bosque de pino variaba en cada montaña, (Rzedowski 1975 op cit Rzedowski, 1994), hizo un análisis fitogeográfico de algunos taxones de este ecosistema, Rzedowski (2006), publico el libro “Vegetación de México”, en donde

identifica de manera general los tipos de vegetación en México, en donde a las gramíneas de todo el país les da el nombre de pastizal en donde mencionan las características de estas plantas así como algunas especies, incluyendo al zacatonal alpino, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO, 1999), publicó el mapa Uso de Suelo y Vegetación a escala 1: 1,000,000 con el objetivo de reducir el tamaño y facilitar el manejo de la información cartográfica, por lo que eliminó áreas iguales o menores a 25 ha, clasificando a los ecosistemas con dominancia de gramíneas como pastizal sin hacer ninguna diferenciación a su distribución y fisiología; el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2014), publicó el mapa Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 serie V, en el que clasificó que los lugares con altitudes superiores a los 4000 m de altitud como praderas de alta montaña; Escamilla (2007), estudia la vegetación de alta montaña del Volcán Iztaccíhuatl de la franja altitudinal de 3 550 a 4 500 m.s.n.m. donde se desarrolla el bosque subalpino de coníferas de *Pinus hartwegii* y los pastizales o zacatonales alpinos y Torres (2013), que hizo un análisis de los cambios del límite superior del bosque en el volcán Iztaccíhuatl, sabiendo que hay estudios previos sobre la flora del lugar, este trabajo tiene como finalidad observar cómo en las últimas décadas la vegetación de la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl, se ha modificado por la perturbación antrópica y natural.

Es importante conocer el estado actual de la vegetación de la pradera de alta montaña para su conservación, ya que brindan servicios ambientales para la sociedad, como son la captura del bióxido de carbono producido por la actividad humana al quemar combustibles fósiles; la estabilidad climática por la regulación del ciclo hídrico y la regulación de la humedad y temperatura del aire, el mantenimiento de suelos fértiles, el control de deslizamientos y arrastres masivos de suelo por el efecto de lluvias torrenciales (CONABIO, 2006), así como en la captación y recarga de acuíferos, provenientes del deshielo de glaciares los cuales abastecen a las ciudades de Puebla y México, también junto con el Popocatepetl es un emblema de identidad no sólo para las ciudades de México y Puebla, sino como un símbolo cultural-religioso para México, además de ser un lugar de esparcimiento para la población, etc. (Escamilla, 2007). El tipo de vegetación predominante por

encima de los 4000 m.s.n.m. en todas las montañas de la faja volcánica transmexicana, incluyendo al volcán Iztaccíhuatl es el pastizal alpino, adaptado a ambientes alpinos (Rzedowski, 2006).

Otro aspecto importante por el que se debe de estudiar para conservar este bioma es la biodiversidad de especies que resguarda de flora y fauna, como el venado cola blanca (*Odocoileus virginianus*), el zacatuche (*Romerolagus diazi*), la gallina montes (*Dendrortyx macroura*), el cardo santo (*Cirsium nivale*), entre otros, debido al crecimiento urbano de los alrededores estas especies encuentran como último refugio el volcán Iztaccíhuatl para seguir prosperando.

Objetivos

Objetivo general:

- Analizar los cambios de la distribución espacial de la vegetación en la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl en las últimas décadas por la perturbación antrópica y natural.

Objetivos específicos:

- Estimar la distribución actual de la vegetación en la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl.
- Identificar las consecuencias que trae la perturbación antrópica y natural en los servicios ambientales del ecosistema de pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl.
- Mencionar algunas medidas de mitigación y conservación con miras al manejo del ecosistema de la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl.

Hipótesis

Se espera observar que los cambios en la vegetación por la perturbación antrópica y natural y los antecedentes de investigaciones previas al volcán Iztaccíhuatl, el límite superior de la pradera de alta montaña se ha modificado, teniendo un incremento positivo en altitud.

Marco teórico

- Corriente del pensamiento geográfico:

Dentro de la geografía, la complejidad de su didáctica específica se deriva de la naturaleza de la materia a transmitir, que ha sido motivo de controversia sobre su objeto de estudio e identidad. Su idiosincrasia, como ciencia de síntesis, puente entre las ciencias naturales y sociales, ha abierto múltiples interrogantes sobre su contenido (Santos, 1999).

La evolución del pensamiento geográfico, ha tenido una gran repercusión en el nacimiento de las nuevas geografías y en el progreso, desde la etapa pre científica o pre institucional a la moderna (con el nacimiento del ambientalismo o determinismo geográfico y del historicismo o posibilismo) y contemporánea, posterior a la segunda guerra mundial, donde la oposición positivismo/historicismo ha cobrado una nueva dimensión, con la aparición de nuevos paradigmas: neopositivistas, behavioristas o de la percepción, radicales y humanistas (Johnston, 1979).

Por lo cual para el presente trabajo se utilizó la corriente ambientalista la cual junto con el positivismo que actualmente se conoce surgen a mediados del siglo XIX, llegando a impregnar, profundamente, el método científico de aquellos años. El positivismo puede definirse, tanto como método científico como concepción filosófica, aspectos, ambos, muy relacionados entre sí. Como método científico, el positivismo puede definirse como un empirismo inductivo racionalista, que rompe con las ideas del idealismo y romanticismo. La base del método positivo sería el razonamiento inductivo, que parte de la observación y mediante clasificaciones y comparaciones se eleva a conclusiones generales (Santos, 1999), tal como se hizo en este trabajo se analizaron imágenes de satélite de diferentes años del volcán Iztaccíhuatl donde se hicieron distintas clasificaciones en el uso de suelo y vegetación del LSPAM, para así poder obtener la respectiva cartografía y hacer las respectivas comparaciones para generar las conclusiones del presente estudio.

Las ideas fundamentales de esta corriente del pensamiento geográfico contemporáneo enlazan con la filosofía positivista, donde se establece un paralelismo entre la conducta animal y humana y se llega a la conclusión de que los hombres se hallan controlados por leyes naturales. Este traspaso de la biología a la ciencia social fue general, pero tuvo en el campo geográfico la virtud de unificar las dos ramas de la Geografía (Física y Humana) en una sola (Santos, 1999), por lo cual se menciona como el medio físico influye sobre la sociedad, pero también en la actualidad la sociedad igual influye en el medio físico pues la ha estado modificando. Por lo cual se ve como los elementos naturales tienen una gran importancia sobre los seres vivos y cómo influyen en su distribución espacial así como en respectivos cambios, como en el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl, pero también las actividades antrópicas han impactado en dicho cambio, las cuales igual se deben de mencionar en este estudio geográfico.

- Cambio de uso de suelo:

El uso de suelo, en su sentido más amplio, son las diferentes formas en que se emplea un terreno y su cubierta vegetal. El territorio nacional no se explota con la misma intensidad ni con los mismos propósitos en toda su superficie. Algunas porciones son modificadas profundamente al ser utilizadas con fines agropecuarios o como asentamientos humanos; mientras que otras han permanecido relativamente inalteradas por las actividades de la sociedad (Trucios *et al.*, 2013, op cit. SEMARNAT, 2012), como es el caso del LSPAM del volcán Iztaccíhuatl, en donde se observa como la pradera de alta montaña tiene cambios sobre el suelo sin vegetación y viceversa.

De acuerdo con la FAO (2009), las principales causas de cambio en Norteamérica son el incremento demográfico que está ocasionando que la población ocupe espacios naturales, la pobreza y la disparidad de ingresos ha causado que la agricultura sea extensiva, políticas e instituciones que no son las adecuadas para el medio ambiente y el de no invertir en ciencia y tecnología amigable con la naturaleza, sobretodo en México.

La metodología para identificar espacialmente los procesos de cambio en un determinado espacio, donde si se lleva a cabo en el entorno de un sistema de información geográfica. Consiste en superponer al menos dos mapas de usos o cubiertas del suelo de fechas diferentes y analizar las combinaciones resultantes a través de una matriz de cambio. Posteriormente se agrupan los cambios para hacer una clasificación del mapa resultante de la superposición para obtener un mapa con la distribución espacial de cada proceso. La calidad de los resultados depende directamente de la exactitud temática y espacial, así como de la compatibilidad en clases y escalas, de los mapas de cubiertas del suelo de cada fecha. Así, el cálculo del cambio de uso de suelo, desde el punto de vista temporal, no es otra cosa que la diferencia de las áreas entre el tiempo inicial y el tiempo final, en tasas o índices, que significan incrementos o decrementos en dicho intervalo de tiempo (Galicia *et al.*, 2007).

- Metodología FAO, 1996:

Se empleó esta metodología ya que es fiable sobre el proceso de cambios en curso en la cubierta vegetal y sirve para formularse preguntas, por ejemplo: “¿Cómo están cambiando los recursos naturales?, ¿Cuánto se está degradando?, ¿Qué está pasando?, ¿Cómo se vinculan el estado actual y el cambio con las condiciones ecológicas y socioeconómicas? y ¿Cuáles son las causas de estos cambios?” (FAO, 1996), las cuales servirán para generar hipótesis y nuevas investigaciones sobre el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl.

La única manera satisfactoria de proporcionar información fiable sobre el proceso de cambio es establecer un sistema de monitoreo de los recursos naturales, utilizando una metodología globalmente compatible y coherente, que proporcione información de cambio confiable y específica de ubicación. Teniendo en cuenta el costo, la precisión y la puntualidad de los resultados, se diseñó y utilizó un enfoque de muestreo basado en la teledetección. En donde los objetivos principales de esta metodología son:

- 1- Alcanzar el mayor nivel posible de coherencia y precisión en la evaluación del estado de la cubierta vegetal y el cambio ya sea a nivel mundial, regional o local.
- 2- Desarrollar y difundir una técnica de monitoreo simple y robusta para la producción de las estimaciones estatales y de cambio de la cubierta vegetal a nivel mundial y regional con aplicación también a nivel nacional.
- 3- Proporcionar datos espaciales y estadísticos para estimar los cambios de clase a clase de las categorías de cobertura terrestre y de cobertura forestal entre las dos fechas de interpretación en las ubicaciones de la muestra y para producir matrices de cambio en cualquier escala.

Aunque sólo se aplicó en la zona tropical, la metodología en lo general se puede aplicar fácilmente en todo el mundo para todas las formaciones vegetales, para proporcionar información fiable sobre el alcance y el proceso de cambio de manera coherente y continua (FAO, 1996), es por ello que se utilizó esta metodología para el presente trabajo ya que principalmente se supo cómo ha variado el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl, aunque también se empleó la ayuda de información bibliográfica que menciona cuales son los problemáticas socio/ambientales que hay en este ambiente y se mencionan en este estudio, no se llega a conclusiones definitivas sobre las causas del cambio sino a inferencias de acuerdo a los datos que se obtuvieron, las cuales servirán para hacer futuros estudios y conocer las causas definitivas del cambio en el LSPAM, igualmente ocurre lo mismo para las estrategias de conservación y mitigación.

La única manera satisfactoria de proporcionar información fiable sobre los procesos de cambio es establecer un sistema de vigilancia de los recursos forestales, en el que la superficie terrestre considerada se observe de forma sistemática a lo largo del tiempo, utilizando técnicas comparables, esto proporciona información de cambio confiable y específica de la ubicación (FAO, 1996).

Pero el manejo de sistemas sensores tiene limitantes ya que la interpretación de los datos satelitales, se trata de la cuestión relativa al sistema de clasificación para observar y describir los cambios durante un período de tiempo determinado. Por

ejemplo, una simple dicotomía forestal, no forestal, no podía proporcionar toda la información necesaria para describir la degradación de los bosques, como el cambio de densidad, la fragmentación forestal, los cambios en barbecho largo y corto, etc., que son procesos importantes que afectan a la biomasa forestal y la biodiversidad, por lo que se debe de tener conciencia sobre las limitaciones asociadas con los datos satelitales. (FAO, 1996, op cit. Baltaxe y Drigo, 1991).

Una interpretación puntual de cambio a lo largo del tiempo era una condición necesaria para producir "matrices de cambio" coherentes, por lo cual la manera de generar resultados confiables mediante la interpretación de resultados hace que se necesite del apoyo de instituciones y/o de teledetección regionales y nacionales que tienen el conocimiento de los lugares del estudio para mejorar la calidad de la interpretación de la imagen (FAO, 1996), por ello para la zona de estudio se necesitó del apoyo bibliográfico y de material de consulta para conocer la distribución del uso de suelo y vegetación, para así hacer una adecuada clasificación.

La coherencia de la clasificación de los datos satelitales adquiridos en dos fechas distintas, resultantes de este procedimiento, lo convierte probablemente en el elemento más importante de todo el estudio (FAO, 1996), pues de ahí viene la importancia de conocer bien la zona de estudio y al momento de hacer una clasificación no tener errores.

Capítulo 1 Percepción remota

1.1 Fundamentos

El conjunto de conocimientos que se agrupan bajo el nombre de Percepción Remota tiene como base fundamental el hecho de trabajar con información descriptiva de fenómenos y objetos, presentes en el universo físico, que ha sido colectada sin entrar en contacto directo con ellos. Para poder hacer uso de esta información es necesario entender la forma en que se genera, qué errores contiene y, sobre todo qué características específicas se están describiendo (Hernández, 2011).

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2005), define a la percepción remota como la ciencia y el arte de obtener información de un objeto, analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con el objeto.

La radiación electromagnética es el medio que permite observar un objeto a distancia, ya sea porque se refleja en él o porque el objeto por sí mismo emite radiación (Figura 1.1).

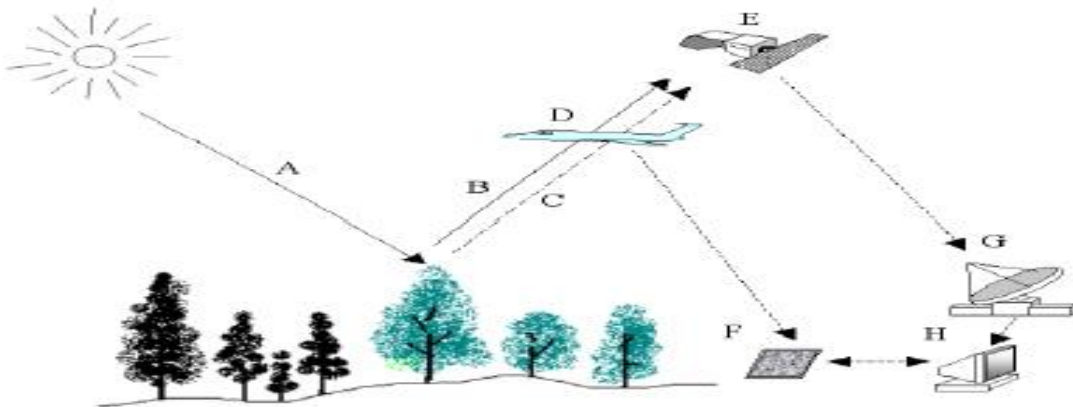


Figura 1.1: Sistema de percepción remota. La radiación proveniente desde el sol viaja a través del espacio y la atmósfera (A) para alcanzar los objetos sobre la superficie terrestre. Una parte de esta radiación es reflejada (B). Los objetos con temperatura sobre el cero absoluto emiten radiación (C) la cual, al igual que la radiación reflejada puede ser captada por un sensor aéreo (D) o espacial (E). El producto final de un sensor aéreo es una fotografía aérea (F) y el de un sensor satelital una imagen digital (H) que ha sido adquirida en una estación receptora (G). Los formatos digital y analógico son intercambiables (Hernández, 2011).

La porción reflejada, es modificada de acuerdo con las propiedades físicas del suelo, lo cual determina entre otras cosas, el color que podemos observar. Cada objeto, origina un tipo distinto de radiación reflejada, hecho que se utiliza para tener un patrón de identificación del objeto en función de las características de la radiación que refleja. Lo anterior se conoce con el nombre técnico de firma espectral (Hernández, 2007).

También el propio objeto es el que origina la radiación ya que todos los cuerpos que tengan una temperatura mayor al cero absoluto son capaces de emitir radiación. Este tipo de radiación no es visible por ojos humanos, pero existen sensores especialmente diseñados para percibir radiaciones térmicas.

El espectro electromagnético es un continuo de energía, de longitudes de onda que varían desde nanómetros hasta metros. Todos los cuerpos emiten energía electromagnética de tal manera que la máxima intensidad de emisión se asocia a menores longitudes de onda a medida que la temperatura del cuerpo aumenta. La figura 1.2 y la tabla 1.1 describen las principales características del espectro electromagnético.

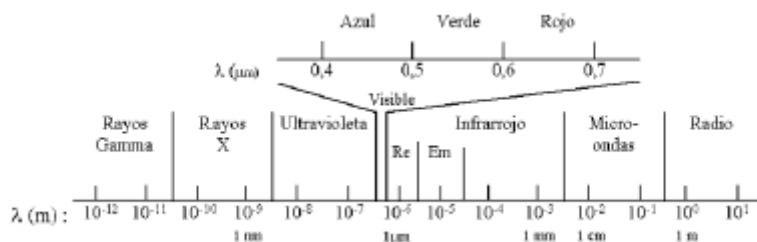


Figura1.2: Ilustración del espectro electromagnético (Hernández, 2011)

Región o Banda Espectral		Longitud de Onda (λ)	Características
Rayos Gamma		< 0.03 nm	Radiación completamente absorbida por las capas superiores de la atmósfera. No se utilizan en teledetección.
Rayos X		0.03 – 30 nm	
Ultravioleta (UV)		0.03 – 0.4 μm	La radiación con $\lambda < 0.3 \mu\text{m}$ es completamente absorbida por la capa de ozono de la atmósfera. La radiación con λ entre 0.3 y 0.4 μm se transmite a través de la atmósfera y se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles especiales.
Visible (azul, verde, rojo)		0.4 – 0.7 μm	Se puede detectar a través de fotodetectores y películas fotosensibles normales (color y B/N).
IR	Infrarrojo reflejado	0.7 – 3.0 μm	Radiación solar reflejada que no contiene información acerca de las propiedades térmicas de los materiales. El rango de longitud de onda de 0.7 a 0.9 μm se puede detectar usando películas fotosensibles y se denomina infrarrojo fotográfico.
	Infrarrojo térmico	3 – 5 μm , 8 – 14 μm	Corresponden a dos ventanas atmosféricas en la región térmica. Las imágenes son adquiridas usando sensores optico-mecánicos y sistemas Vidicom especiales, pero no es posible usar película fotosensible.
Radar (región de la microondas)		0.1- 100 cm	Radiación de grandes longitudes de onda, capaces de penetrar nubes, nieblas y lluvia.
Ondas de Radio		> 100 cm	Radiación con las mayores longitudes de onda del espectro. Se utilizan en telecomunicaciones.

Tabla 1.1: descripción del espectro electromagnético (Hernández, 2011).

La reflectividad de la materia vegetal está dominada por la presencia de pigmentos absorbentes y por múltiples reflexiones internas en las interfases entre las paredes celulares hidratadas y los espacios de aire intercelulares, lo cual produce la alta reflectividad en el infrarrojo cercano, entre 0.7 y 1.3 μm . Otros pigmentos de importancia son los carotenos y las xantofilas (las cuales dan espectros de reflectancia amarillo-naranja) y las antocianinas (rojo-violeta) entre 1.3 y 2.7 μm .

Las propiedades de reflectancia de los suelos son claramente dependientes del tipo de roca de la cual se deriva el suelo, pero también dependen fuertemente del contenido vegetal y agua, las cuales afectan la reflectividad (Aguirre, 2009).

Los principales factores que afectan el comportamiento espectral de los suelos son su composición química, textura, estructura y contenido de humedad. Cuando los suelos se encuentran secos las tierras ennegrecidas presentan mayor reflectancia, contrariamente cuando se encuentran con un alto contenido de agua poseen en promedio una reflectancia dos veces más débil que los suelos secos, registrando las mayores diferencias en la zona del infrarrojo cercano (Hernández, 2011).

Los sensores remotos pueden ser clasificados como pasivos o activos: Sensores pasivos: los sensores pasivos detectan la radiación proveniente de fuentes naturales, como la energía solar reflejada o la emisión térmica (figura1.3).

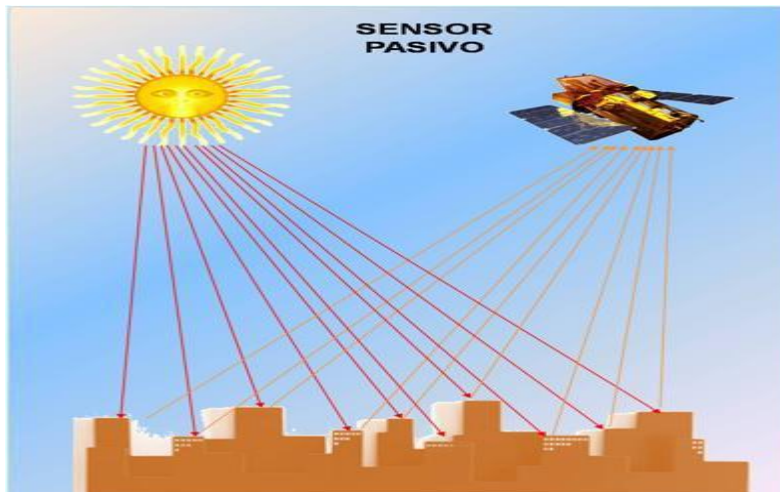


Figura1.3: Sensor pasivo (Tomado de INEGI, a).

Sensores activos: Los sistemas activos iluminan el objeto de estudio con su propia fuente de radiación (Figura 1.4) (Aguirre, 2009).

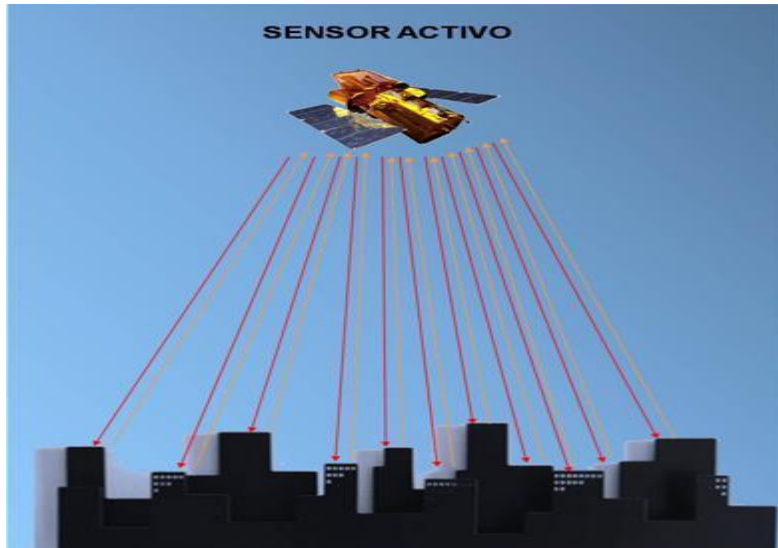


Figura 1.4: Sensor activo (Tomado de INEGI, b)

Resolución de un sistema sensor

Podemos definir la resolución de un sistema sensor como su habilidad para registrar discriminando la información que detalla (Estes y Simonett, 1975. Op cit. Chuvieco, 1995). El concepto de resolución implica al menos cuatro manifestaciones: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

- Resolución espacial: Este concepto designa al objeto más pequeño que puede ser distinguido sobre una imagen. En un sistema fotográfico, suele medirse como la mínima separación a la cual los objetos aparecen distintos y separados en la fotografía. Se mide en unidades de longitud (mm sobre la foto o metros sobre el terreno), y depende de la longitud focal de la cámara y de su altura sobre la superficie.
- Resolución espectral: Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor, por lo cual un sensor será más idóneo cuanto mayor número de bandas proporcione, ya que facilita la caracterización espectral de las distintas cubiertas.
- Resolución radiométrica: La resolución o sensibilidad radiométrica hace referencia al rango dinámico o número de nivel digital usados al digitalizar la información procedente del sensor (bits por pixel).

- Resolución temporal: Este tipo de resolución se refiere al intervalo de tiempo entre muestras sucesivas de la misma zona de la cobertura terrestre. El ciclo de cobertura depende de las características de la órbita del satélite, así como del diseño del sensor (Chuvieco, 1995).

1.2 Aplicaciones

Las imágenes satelitales constituyen una fuente de información para el conocimiento, control, previsión, gestión de recursos y actividades humanas de nuestro planeta. Representan un medio eficaz y económico para extraer valiosa información geográfica (SCRIBD, 2012. Op cit. Resendiz, 2015).

Sus usos son muy extensos pues Resendiz (2015), menciona que se utilizan en:

Agricultura

- Evaluar las superficies y producciones agrícolas.
- Anticipar los riesgos e impactos como son la contaminación, sequía, inundaciones, etc.
- Conocer las superficies forestales y seguir la evolución de plantaciones.

Defensa y seguridad

- Multiplicar las fuentes de información para reforzar la vigilancia de los territorios.
- Detectar y controlar los cambios de las zonas sensibles.

Recursos naturales

- La exploración de los recursos geológicos e hidrológicos.
- Optimizar la implantación de nuevas infraestructuras mineras o petroleras.
- Evaluar el impacto de las explotaciones sobre el medio ambiente.
- Llevar a cabo un inventario nacional de los recursos.

Telecomunicaciones

- Mantener y desarrollar las infraestructuras de las telecomunicaciones existentes.

Gestión de riesgos

- Implementar planes de prevención de riesgos naturales o industriales.

- Delimitar y vigilar zonas de áreas naturales protegidas.

Un ejemplo concreto de la aplicación de sistemas de percepción remota para el área ambiental es la modificación del uso de suelo debido a las actividades humanas que ha provocado una pérdida generalizada de la biodiversidad mundial, a través de los procesos de degradación ambiental (Ochoa y González, 2000, op cit. Aguirre, 2009).

Por lo cual para poder obtener la detección de cambio es necesario observar la cobertura vegetal y el uso de suelo a través del tiempo. Las técnicas de detección de cambio utilizan las imágenes de satélite como un insumo principal, se basan en el supuesto de que cualquier transformación en la cobertura resultará en alteraciones de los valores de reflectancia lo suficientemente grandes para ser registradas. Para el análisis de este fenómeno debe buscarse que las imágenes tengan condiciones atmosféricas, de ángulo solar y humedad del suelo similares (Singh 1989, op cit. Aguirre, 2009).

Dentro de estos análisis se tienen, entre otros, la diferencia de índices de vegetación, método empleado frecuentemente para detectar cambios en la cobertura. La fórmula de este índice puede diferir, pero el supuesto básico es la absorción de energía en el espectro visible y la gran reflectividad en el infrarrojo por parte de la vegetación. Numerosos estudios han demostrado la fuerte correlación de la biomasa vegetal y dichos índices (Anderson *et al.*, 1993, op cit. Aguirre, 2009).

1.3 Índices

En este sub capítulo sólo se van a describir las características de los índices NDMI, NDVI, RDVI, RVI y SAVI, debido a que son los índices que se aplicaron en el presente trabajo, los cuales estos se van a utilizar pues debido a las condiciones ambientales en la zona de estudio (Véase capítulo 2), utilizar un solo índice haría que los resultados no fueran muy confiables, mientras que la funcionalidad y la razón por lo cual se escogieron dichos índices en el presente estudio se dan a conocer en el capítulo 3.

1.3.1 NDMI

El Índice de Humedad de Diferencia Normalizada (NDMI), es un índice derivado de satélite, de los canales de infrarrojo cercano (NIR) e infrarrojo de onda corta (SWIR), el cual sirve para calcular la cantidad de humedad de las plantas. La reflectancia SWIR refleja cambios tanto en el contenido de humedad de la vegetación como en la estructura esponjosa del mesófilo en las cubiertas de vegetación, mientras que la reflectancia NIR se ve afectada por la estructura interna de la hoja y el contenido de materia seca de la hoja, pero no por el contenido de agua. La combinación del NIR con el SWIR elimina las variaciones inducidas por la estructura interna de la hoja y el contenido de materia seca de la hoja, mejorando la precisión en la recuperación del contenido de agua de la vegetación. La cantidad de agua disponible en la estructura interna de la hoja controla en gran medida la reflectancia espectral en el intervalo SWIR del espectro electromagnético. La reflectancia SWIR se relaciona negativamente con el contenido de agua de la hoja (Gao, 1996).

Fórmula para el cálculo del NDMI:

$$(NIR - SWIR) / (NIR + SWIR)$$

En Landsat 4-7, estas son las bandas que se utilizan para hacer dicho cálculo:

$$NDMI = (Banda 4 - Banda 5) / (Banda 4 + Banda 5).$$

En Landsat 8, estas son las bandas que se utilizan para hacer dicho cálculo:

$NDMI = (Banda\ 5 - Banda\ 6) / (Banda\ 5 + Banda\ 6).$

1.3.2 NDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) es un índice estandarizado que permite generar una imagen que muestra el verdor (biomasa relativa). Este índice aprovecha el contraste de las características de dos bandas de un conjunto de datos de trama multispectral: las absorciones de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad de los materiales vegetales en la banda de infrarrojo cercano (NIR). El NDVI a menudo se usa para monitorear la sequía, monitorear y predecir la producción agrícola, sirve para predecir zonas de incendios peligrosos y mapear el crecimiento de zonas desérticas. Se prefiere el NDVI para el monitoreo global de la vegetación porque ayuda a compensar las condiciones cambiantes de iluminación, la pendiente de la superficie, el aspecto y otros factores extraños.

La reflexión diferencial en las bandas roja e infrarroja (IR) le permite controlar la densidad e intensidad del crecimiento de la vegetación verde utilizando la reflectividad espectral de la radiación solar. Las hojas verdes comúnmente muestran una mejor reflexión en el rango de longitud de onda del infrarrojo cercano que en los rangos de longitud de onda visibles. Cuando las hojas están estresadas por el agua, enfermas o muertas, se vuelven más amarillas y reflejan significativamente menos en el rango del infrarrojo cercano. Las nubes, el agua y la nieve muestran una mejor reflexión en el rango visible que en el rango del infrarrojo cercano, mientras que la diferencia es casi nula para las rocas y el suelo sin vegetación. El proceso NDVI crea un conjunto de datos de banda única que representa principalmente vegetación. Los valores negativos representan nubes, agua y nieve, y los valores cercanos a cero representan rocas y suelo sin vegetación (ARGIS 2.2.2, 2020).

Fórmula para el cálculo de NDVI:

$$(NIR - R) / (NIR + R)$$

En Landsat 4-7, estas son las bandas que se utilizan para hacer dicho cálculo:

$NDVI = (Banda\ 4 - Banda\ 3) / (Banda\ 4 + Banda\ 3).$

En Landsat 8, estas son las bandas que se utilizan para hacer dicho cálculo:

$NDVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4).$

1.3.3 RDVI

El Índice de Vegetación de Diferencia Renormalizada (RDVI), utiliza la diferencia entre las longitudes de onda del infrarrojo cercano y rojo, para resaltar una vegetación saludable. Es insensible a los efectos de la geometría de observación del suelo y del sol. Su objetivo es linealizar (proceso de encontrar la aproximación lineal a una función en un punto dado) y las relaciones entre el índice y parámetros biofísicos (Roujean y Breon, 1995).

Fórmula para el cálculo de RDVI:

$(NIR - R) / \text{SQRT}(NIR+R)$

En Landsat 4-7, estas son las bandas que se utilizan para hacer dicho cálculo:

$RDVI = (Banda\ 4 - Banda\ 3) / (Banda\ 4 + Banda\ 3).$

En Landsat 8, estas son las bandas que se utilizan para hacer dicho cálculo:

$RDVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4).$

1.3.4 RVI

El RVI (Índice de Proporción de Vegetación), es un índice basado en pendientes propuesto por Peason y Miller (1972), el cual es considerado como de los pioneros de la historia de los índices de vegetación, el RVI es el cociente entre la reflectividad en el infrarrojo cercano y la reflectividad en la banda del rojo, estando éste basado en la diferencia espectral en la vegetación en las longitudes de onda del rojo y del infrarrojo cercano.

Fórmula para el cálculo de RVI:

R / NIR

En Landsat 4-7, estas son las bandas que se utilizan para hacer dicho cálculo:

$$RVI = (Banda 3 / Banda 4)$$

En Landsat 8, estas son las bandas que se utilizan para hacer dicho cálculo:

$$RVI = (Banda 4 / Banda 5)$$

1.3.5 SAVI

El Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), es un índice de vegetación que intenta minimizar las influencias del brillo del suelo utilizando un factor de corrección del brillo del suelo. Esto se usa a menudo en regiones áridas donde la cubierta vegetal es baja.

NIR y Red se refieren a las bandas asociadas con esas longitudes de onda. El valor L varía según la cantidad de cubierta vegetal verde. Generalmente, en áreas sin vegetación verde, cubra $L = 1$; en áreas de cubierta vegetal verde moderada, $L = 0.5$; y en áreas con cobertura vegetal muy alta, $L = 0$ (que es equivalente al método NDVI). Este índice genera valores entre -1.0 y 1.0 (Huete, 1988).

Fórmula para el cálculo del SAVI:

$$((NIR - R) / (NIR + R + L)) * (1 + L)$$

En Landsat 4-7, estas son las bandas que se utilizan para hacer dicho cálculo:

$$SAVI = ((Banda 4 - Banda 3) / (Banda 4 + Banda 3 + 0.5)) * (1.5).$$

En Landsat 8, estas son las bandas que se utilizan para hacer dicho cálculo:

$$SAVI = ((Banda 5 - Banda 4) / (Banda 5 + Banda 4 + 0.5)) * (1.5).$$

1.4 Proyecto Landsat

Landsat 1 y 2

Landsat 1 se lanzó el 23 de julio de 1972; en ese momento el satélite se conocía como el Satélite de Tecnología de Recursos de la Tierra (ERTS). Fue el primer satélite de observación de la Tierra que se lanzó con la intención de estudiar y monitorear las masas de tierra de nuestro planeta.

Para realizar el monitoreo, Landsat 1 llevó dos instrumentos: un sistema de cámara llamado Return Beam Vidicon (RBV), y el escáner multiespectral (MSS). Se suponía que el RBV era el instrumento principal, pero se encontró que los datos del MSS eran superiores. Además, el instrumento RBV fue la fuente de un transitorio eléctrico que causó que el satélite perdiera brevemente el control de altitud.

El instrumento MSS se utilizó como instrumento secundario y altamente experimental, pero este registró datos en cuatro bandas espectrales: una verde, roja y dos bandas infrarrojas.

Landsat 1 operó hasta enero de 1978, superando su vida de diseño por cinco años. La calidad y el impacto de la información resultante superaron todas las expectativas (NASA, a)

Mientras que las características de las imágenes del Landsat 2 son totalmente iguales a las del Landsat 1, el cual fue lanzado el 22 de enero de 1975 y el fin de sus operaciones fue el 25 de febrero de 1982 (NASA, b).

Satélite	Lanzamiento (fin de servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Resolución radiométrica	Sensor	Banda: intervalo espectral(μm)	Resolución espacial(m)
Landsat 1	23/7/1972 6/1/1978	917	18	8 Bits	RBV	(1). 0.48 0.57 (2). 0.58 0.66 (3). 0.70 0.83	80 80 80
					MSS	(4). 0.5 0.6 (5). 0.6 0.7 (6). 0.7 0.8 (7). 0.8 1.1	79 79 79 79
Landsat 2	22/1/1975 25/2/1982	917	18	8 Bits	Igual a Landsat 1	Igual a Landsat 1	Igual a Landsat 1

Tabla 1.2: Características de los satélites Landsat 1 y Landsat 2 (Datos tomados de Varela, s/año y Chuvieco, 1995).

Landsat 3

Este satélite fue lanzado el 5 de marzo de 1978, el cual contaba con 2 sensores remotos, los cuales eran el RBV y MSS, los mismos que sus satélites predecesores. Este satélite dejó de operar el 31 de marzo de 1983, éste se diferencia de los 2 primeros porque tenía una resolución espacial de 40x40 m, y además tenía una banda pancromática (NASA, c).

Satélite	Lanzamiento (fin de servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Resolución radiométrica	sensor	Banda: intervalo espectral (μm)	Resolución espacial (m)
Landsat 3	5/3/1978 31/3/1983	917	18	8 Bits	RBV	(1). 0.5 0.75	40
					MSS	(4). 0.5 0.6	79
						(5). 0.6 0.7	79
						(6). 0.7 0.8	79
						(7). 0.8 1.1	79
(8). 10.4 12.6	240						

Tabla 1.3: características del satélite Landsat 3 (Datos tomados de Varela, s/año y Chuvieco, 1995).

Landsat 4 y 5

En el Landsat 4 fue colocado el sensor MSS, el cual se trata de un barredor óptico electrónico que opera en 4 canales del espectro electromagnético, dos en el visible (4 y 5) y dos en el infrarrojo cercano (6 y 7).

El Landsat 5 cuenta con el sensor TM el cual es de barrido multiespectral, concebido para proporcionar una mayor resolución espacial, mejor discriminación espectral, entre los objetos de la superficie terrestre, mayor fidelidad geométrica y mayor precisión radiométrica en relación con el sensor MSS.

Operan simultáneamente en siete bandas espectrales, siendo tres en el visible una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal. Tiene una resolución espacial de 30 metros en las bandas del visible e infrarrojo medio y 120 metros en la banda del infrarrojo termal. La escena terrestre de este sensor es igual de 185 km (INEGI, c).

Satélite	Lanzamiento (fin de servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Resolución radiométrica	Sensor	Banda: intervalo espectral(μm)	Resolución espacial (m)
Landsat 4	16/7/1982 15/6/2001	705	16	8 Bits	MSS	(4). 0.5 0.6 (5). 0.6 0.7 (6). 0.7 0.8 (7). 0.8 1.1	82 82 82 82
					TM	(1). 0.45 0.52 (2). 0.52 0.60 (3). 0.63 0.69 (4). 0.76 0.9 (5). 1.55 1.75 (6). 10.4 12.5 (7). 2.08 2.35	30 30 30 30 30 120 30
Landsat 5	1/3/1984 5/6/2013	705	16	8 Bits	Igual a Landsat 4	Igual a Landsat 4	Igual a Landsat 4

Tabla 1.4: características de los satélites Landsat 4 y Landsat 5 (Datos tomados de Varela, s/año y Chuvieco, 1995).

Landsat 6

Este satélite fue lanzado el 5 de octubre de 1993, el cual contaba con el sensor ETM, pero desafortunadamente nunca logró ponerse en órbita por lo cual hubo una pérdida total y no logró capturar ninguna imagen de la tierra (NASA, d).

Landsat 7

Este satélite fue puesto en órbita el 15 de abril de 1999 y continúa operando en la actualidad, transmite diariamente unas 532 imágenes por día y pasa siempre a la misma hora de un determinado lugar.

Posee una resolución espacial de 30 m, una resolución temporal de 16 días y un total de 8 bandas, operados por el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper).

Se destaca la adición de una banda espectral (Banda Pancromática) con resolución de 15 metros. También, cuenta con mejoras en las características geométricas y radiométricas y una mayor resolución espacial de la banda térmica para 60 m. (NASA, e).

Satélite	Lanzamiento (fin de servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Resolución radiométrica	sensor	Banda: intervalo espectral (μm)	Resolución espacial (m)
Landsat 7	15/4/1999 En servicio	705	16	8 Bits	ETM+	(1). 0.45 0.52 (2). 0.53 0.61 (3). 0.63 0.69 (4). 0.78 0.9 (5). 1.55 1.75 (6). 10.4 12.5 (7). 2.09 2.35 PAN 0.5 0.90	30 30 30 30 30 120 30 15

Tabla 1.5: Características del satélite Landsat 7 (Datos tomados de Varela, s/año).

Landsat 8

Lanzado el 11 de febrero de 2013, Landsat 8 (anteriormente Misión de Continuidad de Datos Landsat, LDCM) es el satélite Landsat más reciente. Recopila datos e

imágenes valiosos utilizados en agricultura, educación, negocios, ciencia y gobierno.

La carga útil del satélite Landsat 8 consta de dos instrumentos científicos: Operational Land Imager (OLI) y el sensor de infrarrojos térmicos (TIRS). Estos dos sensores proporcionan cobertura estacional de la masa terrestre global a una resolución espacial de 30 metros (visible, NIR, SWIR); 100 metros (térmico); y 15 metros (pancromático).

OLI es un sensor de escoba con un telescopio de cuatro espejos y cuantificación de 12 bits. OLI recopila datos para bandas espectrales infrarrojas visibles, de infrarrojo cercano y de onda corta, así como una banda pancromática. Tiene una vida de diseño de cinco años. OLI proporciona dos nuevas bandas espectrales, una diseñada especialmente para detectar nubes cirrus y la otra para observaciones de zonas costeras.

TIRS recopila datos para dos bandas espectrales más estrechas en la región térmica que anteriormente estaba cubierta por una banda espectral ancha en Landsat 4–7. Los datos TIRS de 100 m se registran en los datos OLI para crear productos de datos de 12 bits con corrección radiométrica, geométrica y del terreno (NASA, f).

Satélite	Lanzamiento (fin de servicio)	Altitud (km)	Periodicidad (días)	Resolución radiométrica	sensor	Banda: intervalo espectral (μm)	Resolución espacial (m)
Landsat 8	11/2/2013 En servicio	705	16	12 Bits	OLI	(1). 0.43 0.45	30
						(2). 0.45 0.51	30
						(3). 0.52 0.60	30
						(4). 0.63 0.68	30
						(5). 0.84 0.88	30
						(6). 1.56 1.66	30
						(7). 2.10 2.30	30
						(8). 0.50 0.68	15
						(9). 1.36 1.39	30
					TIRS	(10). 10.6 11.2	100
						(11). 11.5 12.5	100

Tabla 1.6: Características del satélite Landsat 8 (Datos tomados de NASA, g).

Capítulo 2 Descripción del área de estudio

2.1 Localización geográfica

El Iztaccíhuatl o "mujer blanca", de 7 km de longitud, se localiza en la Sierra Nevada al Norte del Popocatepetl y a unos 70 km al sureste de la capital mexicana, entre las coordenadas 19° 14' 36.09" Latitud N, 98°42' 22.37" Longitud W y 19° 05' 35.55" Latitud N, 98°36' 03.54" Longitud W (Figura 2.1).

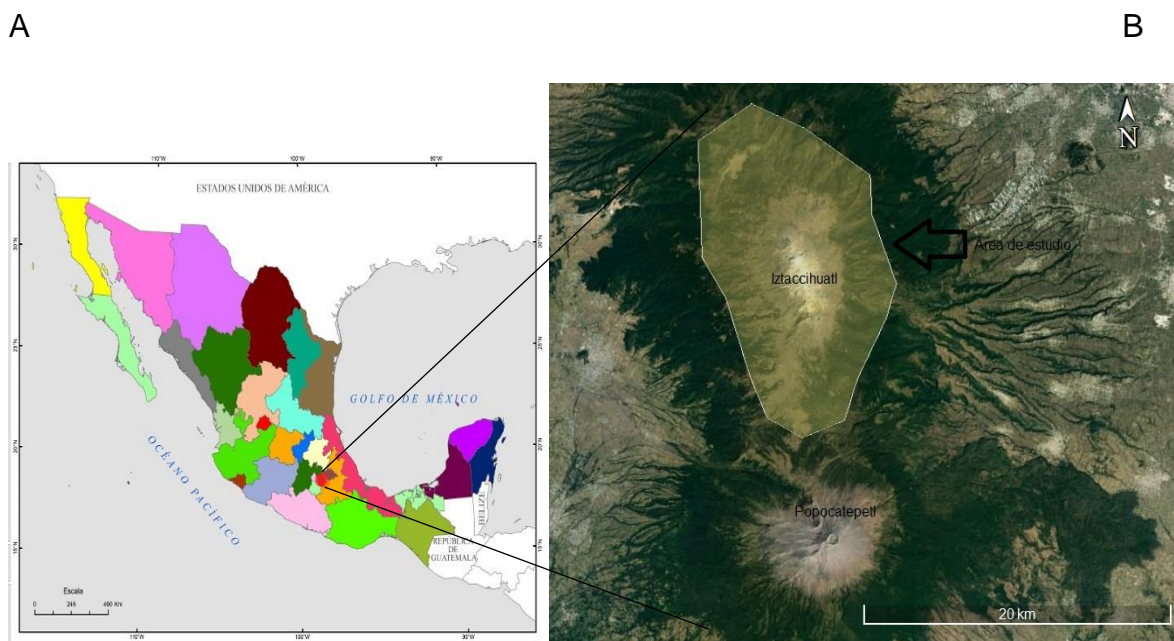


Figura 2.1: Localización geográfica del área de estudio en el volcán Iztaccíhuatl. En la imagen A (CONABIO, 2012), se muestra su localización a nivel nacional. En la imagen B (Google Earth Pro, 2020), el volcán Iztaccíhuatl al norte y al sur el volcán Popocatepetl.

El Iztaccíhuatl se encuentra dentro de la faja volcánica transmexicana (FVT), que es un conjunto de cordilleras y volcanes de diferentes edades alineados sobre una franja que cruza el territorio mexicano de oeste a este alrededor del paralelo 19° N (Espinosa y Ocegueda, 2007). La cual es originada por la subducción de las placas de Ribera y Cocos debajo del continente americano (Pasquarè *et al.*, 1987).

El Iztaccíhuatl es una dorsal volcánica de 7 km de longitud, compuesta por tres cumbres principales alineadas N-S, denominadas por las partes del cuerpo de una

mujer, a cuyo perfil se asemejan. A su vez, esa dorsal forma parte del Parque Nacional de Sierra Nevada, junto con el volcán Popocatepetl al sur y el Teyotl al norte (Andrés, *et al.*, 2010).

2.2 Geología

El volcán Iztaccíhuatl es un complejo volcánico en donde su actividad volcánica comienza con la construcción de la formación Llano Grande que es un largo escudo volcánico, y comprende la sobreposición de tres aparatos volcánicos principales: Púlpito del Diablo, Caldera Llano Grande y volcán Los Pies Ancestrales, y la emisión de domos y lavas fisúrales en los flancos de los mismos, en donde la construcción de estas estructuras ocurrió mediante la emisión de derrames lávicos y en menor cantidad por depósitos piroclásticos (García, 2008).

La actividad explosiva ocurrió con la formación de la caldera Llano Grande y la construcción del volcán Los Pies Ancestrales son principalmente secuencias de flujos de bloques y cenizas, flujos de cenizas y oleadas piroclásticas, con un carácter andesítico-dacítico, principalmente de hornblenda (García-Tenorio, 2002. Op cit. García, 2008).

Sus rocas varían de andesitas, dacitas (principalmente de hiperstena-augita y menormente de hornblenda-augita, hornblenda y olivino) a riodacitas y riolitas (de hiperstena-hornblenda). Las texturas de las rocas varían de: faneríticas, porfídicas y vitrofídicas con mesostasis hialopilíticas, pilotaxíticas, seriadas y microgranulares (García, 2008), y la edad de las rocas de esta formación es de >0.9 Ma. - 0.60 Ma. (Nixon, 1989).

Después aparece la formación Iztaccíhuatl que se caracterizó por tener un magmatismo predominantemente efusivo, con volcanismo explosivo importante, principalmente en las fases tardías de evolución. La mayoría de las lavas de esta unidad se distribuyen en las cimas del Complejo Volcánico Iztaccíhuatl (García, 2008).

Las rocas de la Formación Iztaccíhuatl están compuestas principalmente por andesitas y dacitas, y en menor proporción de andesitas-basálticas.

Mineralógicamente las andesitas y dacitas son de hornblenda, ortopiroxeno-clinopiroxeno y de olivino. La edad de las rocas de esta formación comprende un rango muy amplio, que va desde 0.58 a 0.08 Ma. En donde una serie de conos en la cima continuaron creciendo después de que la actividad volcánica en los Pies había cesado, en donde los flujos más jóvenes, datan del emplazamiento del domo dacítico Teyotl hace unos 0.08 Ma. en el flanco norte del volcán (Nixon, 1989).

2.3 Geomorfología

El Iztaccíhuatl presenta tres cimas principales que son la Cabeza (5,146 m de altitud), Pecho (5,286 m de altitud) y Pies (4,740 m de altitud) (Lugo, 1984), como se muestra en la figura 2.2.

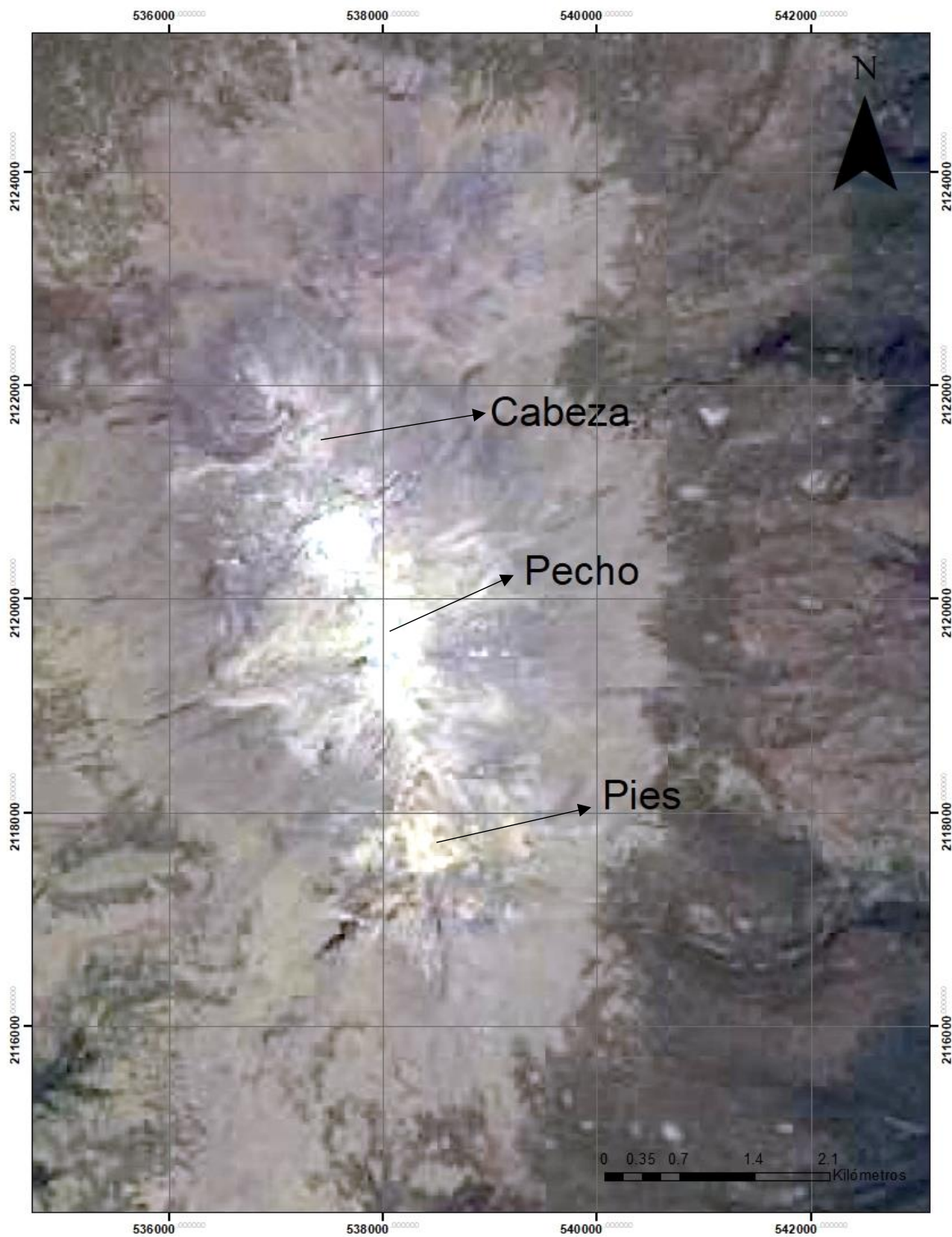


Figura 2.2: Cimas del volcán Iztaccíhuatl (Tomado de Google Earth Pro, 2020).

Entre el pecho y los pies del volcán, si se considera como la figura de una mujer, se forma una depresión que es el lecho del ventisquero actual de los flancos occidentales de la montaña. Los indígenas lo llaman Ayolocotl o Ayoloco, por la forma de corazón que presentan los circos; tiene una longitud de 350 a 450 m, su anchura es primera de 100 m y en la extremidad es de unos 20 m. En los bordes de la corriente son arrastradas gran número de piedras de todas dimensiones que dan origen a las morrenas que, al moverse bajo el hielo, se pulen y estrían en diversas direcciones (Yarza, 2003).

Sobre las morrenas de depósito glacial Hueyatenco de 4000 m de altitud, que a su vez fueron pulidas y estriadas por un glaciar que se movió al noroeste desde la cabecera del valle del norte de la cabeza. En el pecho hay basalto porfídico de hiperstena y andesita negra, en corrientes de lava que buzan hacia afuera en todas direcciones, en donde sus fragmentos están en las morrenas del depósito glacial Ayoloco en la cabecera de valle de Ayolotepito, a más de 4500 m de altitud (White, 1962).

Uno de los procesos dinámicos erosivos formadores del relieve que actúan en las laderas de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl es:

Volcánico-erosivo: que se registra en la porción superior de la montaña aproximadamente hasta los 4700 a 4900 metros de altitud, o sea hasta los frentes de los glaciares y los mantos permanentes de nieve. Su límite inferior se encuentra a una altitud de 4000 metros de altitud con variaciones según la exposición de las vertientes (White, 1962).

En el Iztaccíhuatl este nivel altitudinal de las laderas muestra un modelado considerable, pues la disección se aprecia especialmente a lo largo de las fracturas originales de la ladera, o entre los espacios que quedan entre dos estructuras (Lugo, 1984).

2.4 Suelo

De acuerdo a la carta de Edafología, escala 1:250,000 de INIFAP-CONABIO, (1995), (Figura 2.3), se identificaron 6 unidades de suelo en la zona de estudio y áreas adyacentes del volcán Iztaccíhuatl.

Al norte de la zona de estudio se encuentran pequeños manchones de andosol húmico que se caracteriza por ser suelo de origen volcánico, constituidos principalmente de ceniza la cual contiene alto contenido de alófono, que le confiere ligereza y untuosidad al suelo, además de una gran cantidad de materia orgánica, también hay manchones de cambisol húmico, que se caracteriza por ser suelo joven y poco desarrollado, pero igual cuentan con una buena cantidad de materia orgánica, además de ser suelo ácido.

Al suroeste se tiene fluvisol dístico que es un suelo muy poco desarrollado, medianamente profundo y presenta generalmente estructura débil, además de que es suelo ácido, rico en nitrógeno, pero pobre en otros nutrientes como el calcio, magnesio y potasio.

Al sureste de la zona de estudio se encuentra regosol eútrico el cual es un suelo con poco desarrollo y por ello no presentan capas muy diferenciadas entre sí. En general son claros o pobres en materia orgánica, suelen ser también suelos ácidos.

El tipo de suelo más abundante de esta área del volcán Iztaccíhuatl es el regosol dístico que a diferencia del tipo de suelo mencionado anteriormente es un suelo con menor fertilidad, por lo cual este es un factor importante de que conforme aumenta la altitud la producción de suelos fértiles es menor, por consiguiente la cantidad de materia vegetal es menor y solo aquellas plantas adaptadas a tener pocos nutrientes son las que logran prosperar, el cual es uno de los factores por el cual se desarrolla la pradera de alta montaña.

En las partes más elevadas del volcán Iztaccíhuatl, por encima de los 4000 m. de altitud, se caracterizan por albergar litosol que es un suelo de una profundidad menor a 10 centímetros, con mucha pedregosidad y susceptible a la erosión (INEGI, 2004). Por esta razón la presencia de vegetación vascular es muy escasa pues el

factor edáfico juega un papel muy importante que determina el límite de la pradera de alta montaña.

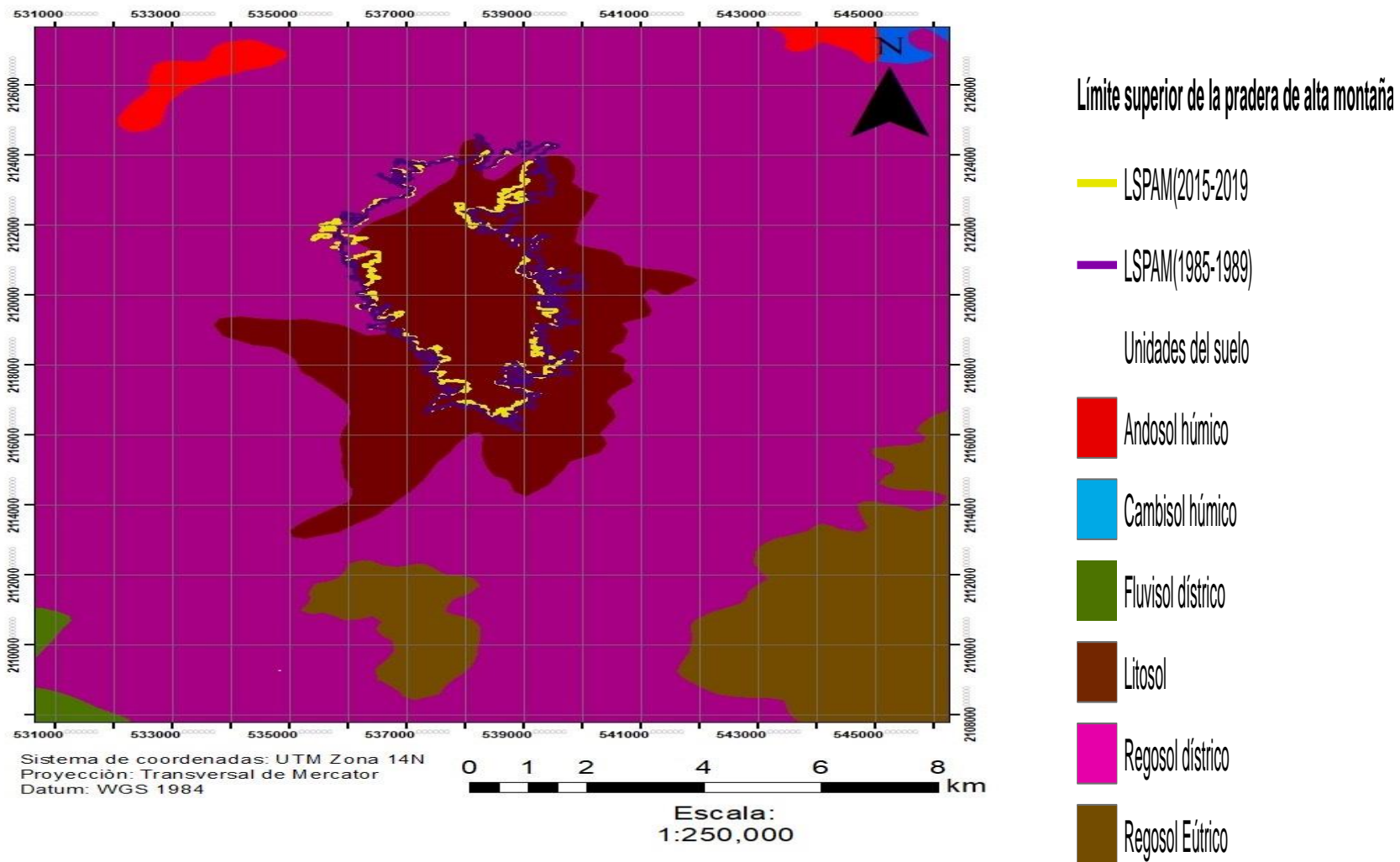


Figura 2.3: Mapa de suelos del volcán Iztaccíhuatl, con el límite superior de la paradera de alta montaña, con sus respectivos periodos (Fuente: INIFAP-CONABIO, 1995).

También la presencia de permafrost influye en gran medida en la abundancia de la vegetación, pues el Iztaccíhuatl carece de permafrost continuo ya que carece de la altitud necesaria bajo el clima actual. El permafrost discontinuo aparecería en torno a los 4.900 m de altitud y el aislado a los 4.640 m de altitud, con variaciones según las orientaciones. La actividad periglacial se puede decir que comienza a los 4.300/4.400 m. de altitud y la actividad de los ciclos de hielo/deshielo, aunque enorme en ocasiones, en superficie, decrece bruscamente en profundidad y desaparece a los pocos centímetros, porque la acción de la helada penetra de forma mínima en el suelo. Su distribución no está directamente relacionada con la altitud, sino sobre todo con la orientación, siendo especialmente intensa en laderas abruptas que miran al norte (Andrés, *et al.*, 2010). Por lo cual en aquellos sitios con presencia de permafrost afectará en el desarrollo de la pradera de alta montaña, ya que no ayuda al desarrollo de la vegetación, y resulta en un factor limitante. .

2.5 Clima

En la zona del volcán Iztaccíhuatl hay 3 tipos de climas que son los semifríos, los fríos y los muy fríos (García, 1998).

El primero es el más abundante en esta montaña el cual se caracteriza por presentar temperaturas medias entre 5° y 12°C, abarca entre los 2400 y los 3250 m de altitud, es un semifrío subhúmedo, Cb'(w₂), que se caracteriza por tener lluvias en verano (Hernández y Carrasco, 2007).

En la zona de estudio que es en donde se desarrolla la pradera de alta montaña se caracteriza por tener clima frío E(T)H, este clima se localiza en altitudes superiores a los 4000 m de altitud, registra una temperatura media anual entre -2 y 5°C, por esta razón las plantas poseen una breve estación de crecimiento donde pueden efectuar su ciclo evolutivo en unas cuantas semanas tales como helechos, musgos y líquenes, así como algunas herbáceas (Rzedowski, 1994, op cit. Hernández y Carrasco, 2007).

En la cima del volcán Iztaccíhuatl se encuentra el clima muy frío, E(F)H, en donde la temperatura de todos los meses se mantiene por debajo de los 0°C, debido a

esto, el terreno se mantiene cubierto por hielos perpetuos y no hay ningún tipo de vegetación. Este clima se encuentra por encima de los 5000 m de altitud (Hernández y Carrasco, 2007), por esta razón el clima es un factor limitante para el desarrollo de la pradera de alta montaña.

En cuanto a la precipitación, ésta asciende inicialmente con la altitud, con 1.000 mm anuales a los 2.700 m, 1.200 mm a los 3.000 m y 1.300 mm a los 3.200 m. A partir de aquí, la precipitación disminuye, con 1.200 mm a los 4.000 m de altitud (Beaman, 1962, op cit. Andrés, *et al.*, 2010).

2.6 Vegetación

Entre los 2400 y 3500 m, encontramos bosques de Oyamel (*Abies religiosa*), hacia los 3600 m de altitud se establece el bosque de pino (*Pinus hartwegii*) tolerante a las temperaturas bajas, frecuentes nevadas y probablemente uno de los pinos más adaptados a los incendios superficiales, en donde hay individuos que se establecen sobre los 4200 m (Figura 2.4), el cual es el límite altitudinal arbóreo en México (CONANP, 2013).



Figura 2.4. Volcán Iztaccíhuatl donde se observan algunos individuos de *Pinus hartwegii*, por arriba de los 4000 m de altitud (Foto de Ulysses Ramírez, 2015).

Después de los 4000 m de altitud se encuentra la pradera de alta montaña (Figura 2.5), la cual lo forman comunidades de poca altura, con aspecto cespitoso, amacollado o arrosetado. Las gramíneas más bien altas (hasta de 1 m) que crecen con amplios macollos, son las que imparten una fisonomía particular a esta comunidad vegetal, que, por tal razón, se ha denominado: zacatonal o páramo de altura, pues presenta similitud con la vegetación de alta montaña de los Andes, donde recibe los nombres de Páramo (INEGI, 2014).



Figura 2.5. Pradera de alta montaña en el volcán Iztaccíhuatl a unos 4200 m de altitud aproximadamente (Foto de Ulysses Ramírez, 2015).

A continuación se describe como Neyra, (2012), divide a la pradera de alta montaña en 2 grandes zonas: el zacatonal y el superzacatonal y menciona sus respectivas características.

El primero se subdivide en zacatonal bajo, abarca desde los 3900 hasta los 4150 m, de altitud que se caracteriza por la presencia de macollos de pastos de *Festuca toluensis* y *Calamagrostis toluensis*, es el área más densa de la pradera de alta montaña (Neyra, 2012).

A mayor altitud se localiza el zacatonal alto que se extiende entre los 4150 y 4300 m de altitud en donde dominan los macollos de la gramínea *Calamagrostis tolucensis*, también se encuentra la asociación *Festuca lívida-Arenaria bryoides*, que se caracteriza por poseer pocas especies herbáceas, es abierta y de bajo porte, se desarrolla en laderas inestables e inclinadas, sobre suelos someros, arenosos, permeables y poco estables (Almeida-Leñero *et al.*, 2007). También en esta zona se localiza el grupo *Draba jorullensis-Calamagrostis tolucensis*, el cual se caracteriza por tener comunidades herbáceas dominadas por gramíneas amacolladas de porte mediano o bajo (Almeida-Leñero *et al.*, 2004, op cit. Almeida-Leñero *et al.*, 2007).

La otra gran zona de la pradera de alta montaña es el superzacatonal el cual se subdivide en superzacatonal bajo, forma una franja que se desarrolla entre los 4300 y 4400 m de altitud. Los pastos son de talla pequeña, de unos 10 centímetros de alto, crecen en donde no se presentan afloramientos de roca o donde estos son incipientes, en donde dominan los pastos de *Festuca lívida* y *Arenaria bryoides*, así como la asociación *Draba nivicola-Plantago tolucensis*, que se distribuye entre los 4160 y 4490 m de altitud, es una asociación herbácea con macollos pequeños, presente en laderas de pendiente moderada, con un 60% de suelo descubierto (Almeida-Leñero *et al.*, 2007). Este es el límite superior de la vegetación vascular, así como de la pradera de alta montaña (Figura 2.6), pues se observa que conforme aumenta la altitud la biodiversidad vegetal va disminuyendo y, además las plantas son de menor tamaño, debido a que se van incrementando las condiciones hostiles del medio.



Figura 2.6. Límite superior de la pradera de alta montaña en el volcán Iztaccíhuatl a unos 4500 m de altitud aproximadamente (Foto de Ulysses Ramirez, 2016).

Por último, se tiene la zona del superzacatonal alto o franja subnival, que abarca desde los 4400 m hasta unos 4800 m de altitud, casi el límite de los glaciares. En donde no hay vegetación vascular, en esta zona solamente se encuentran musgos y líquenes, después de los 4800 m de altitud aproximadamente, donde termina la zona de superzacatonal. Se tiene un área de periglacialismo en donde no hay ningún tipo de vegetación y las nevadas pueden ocurrir en cualquier época del año y más arriba de los 5000 m de altitud, se da el paso a la zona glacial (Neyra, 2012), (Figura 2.7).



Figura: 2.7. Zona glacial del volcán Iztaccíhuatl a unos 5100 m de altitud aproximadamente (Foto de Ulysses Ramirez, 2015).

Capítulo 3 Metodología

3.1 Método FAO 1996

Se utilizó la metodología de la FAO de 1990, la cual consta de 3 etapas que son:

3.1.1 Diseño de muestreo

Para estudiar el cambio en la cubierta vegetal en un área se hace una superposición de imágenes Landsat de varias fechas, en donde se delimita el área de estudio, en este caso el volcán Iztaccíhuatl. Por lo que solo se seleccionaron aquellas imágenes que tuvieran una buena calidad para poder trabajar, que no tuvieran nubosidad y también aquellas en donde la montaña no estuviera completamente cubierta de nieve, esto para poder tener datos más fidedignos.

Se descargaron las imágenes Landsat de la Agencia Espacial Norteamericana (NASA). En particular del Landsat 5, que utiliza el sensor TM (Thematic Mapper), y Landsat 8 con el sensor OLI. Se escogieron estas imágenes y sensores por su resolución espacial de 30 m. Se descargaron solo las imágenes que cumplieran con las características del presente estudio de Landsat 5 desde 1985 hasta 1989 y Landsat 8 desde el 2015 hasta el 2019.

Después de descargar dichas imágenes se procedió a hacer la corrección atmosférica, así como de radiancia y reflectancia (Véase anexo).

Luego se procedió a unir las bandas que se iban a utilizar en una sola imagen (archivo layer starck) de cada uno de los días seleccionados, por lo que para este trabajo solo se utilizaron las bandas en Landsat 5, 1, 2, 3, 4, 5 y 6, y para Landsat 8 se usaron las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, las cuales son las bandas que se necesitaron con el que el programa ERDAS IMAGINE 2014 detecto los sensores con los que se trabajaron (Véase anexo) y el cálculo de los índices utilizados.

Se hicieron compuestos del promedio de cinco años de ambos periodos de tiempo, en donde se utilizaron 5 índices diferentes para observar los cambios en el límite superior de la pradera de alta montaña, ya que debido a sus condiciones

ambientales (Véase capítulo 2), un sólo índice podrían dar datos erróneos de la cubierta vegetal de la zona de estudio. Por lo que también en base a las características de los índices utilizados (Véase capítulo 1), se menciona a continuación la razón por la que se usaron dichos índices.

El NDMI, debido a que las zonas sin vegetación dan los niveles más bajos que puede proporcionar este índice en cuanto humedad y aquellas zonas con vegetación tendrán mayores valores en humedad, para discriminar zonas con zacatonal o sin vegetación.

El NDVI, al ser el índice más usado en vegetación, ayuda a hacer una diferenciación en zonas con zacatonal y sin vegetación.

El RDVI, se utilizó, debido a que la zona de estudio topográficamente es muy irregular, este índice ayuda a dar mejores resultados en aquellas áreas donde la superficie está más accidentada ya que es más sensible a la geometría del suelo.

El RVI, al ser un índice basado en pendientes, es excelente para la zona de estudio, dada su topografía accidentada.

El SAVI, se caracteriza al hacer una diferenciación más específica para el suelo y la vegetación pues detecta aquellas superficies con baja densidad vegetal, y el límite superior de la pradera de alta montaña, se caracteriza por ser una zona de baja densidad vegetal.

3.1.2 Modelo analítico

Los datos recopilados de la interpretación del par de imágenes de satélite en una ubicación de muestra se procesan y se crea una base de datos con los resultados sobre el estado y el cambio de la cubierta vegetal, esta última en forma de matrices de cambio.

Posteriormente ya creados los archivos layerstarck se calcularon los índices: NDVI, NDMI, RVI, SAVI y RDVI, en el programa ERDAS IMAGINE 2014.

Con estos índices se procedió a obtener el promedio de cada uno, obteniendo los compuestos correspondientes a los dos periodos analizados: 1985-1989 y 2015-2019.

Después se procedió a digitalizar el mapa de vegetación de la zona de estudio, con base en los compuestos ya elaborados para los dos periodos. Esto se hizo píxel por píxel, ósea que si en un pixel 2 índices marcaban un valor, pero los otros 3 índices marcaban un valor diferente, pues se digitalizaba ese pixel de acuerdo como me representaban la mayoría de los índices indican ese valor el cual esa discriminación se dio en el borde superior de la vegetación de pradera de alta montaña. Como las imágenes Landsat con las que se trabajó tienen una resolución espacial de 30 metros (Véase capítulo 1) los mapas se hicieron a una escala cartográfica de 1:50,000, pues esta es la escala cartográfica máxima de acuerdo con la resolución de las imágenes, además de que se eliminaron áreas menores a 6.25 hectáreas ya que es el área mínima cartografiable de acuerdo con Lencinas y Siebert, (2009) y Marquina y Mogollón (2017). Se utilizó el ARGIS 2.2.

Después de obtener los mapas de los 2 periodos (ver capítulo 4), se procedió a hacer una matriz de cambio, en donde se utilizó la herramienta UNION, para unir los datos de ambos periodos. Con ello al grupo Suelo sin vegetación del periodo 1985-1989 se le dio el valor de 10 y para el periodo de 2015-2019 se le dio el valor de 1, para el grupo pradera de alta montaña para el periodo 1985-1989 se le dio el valor de 20 y para el periodo de 2015-2019 se le dio el valor de 2 (Tabla 3.1), mientras que para los grupos zona de transición y bosque no se les dio valor pues ya que es vegetación que no se investigó.

Grupo	Valor
Suelo sin vegetación 1985-1989	10
Suelo sin vegetación 2015-2019	1
Pradera de alta montaña 1985-1989	20
Pradera de alta montaña 2015-2019	2

Tabla 3.1: Valores de cada uno de los grupos.

En donde si el resultado de un valor es 11, el grupo suelo sin vegetación se mantuvo igual, un valor de 21, pasó de pradera de alta montaña a suelo sin vegetación, el valor de 12, pasó de suelo sin vegetación a pradera de alta montaña y un valor de 22 el grupo pradera de alta montaña se mantuvo igual (Tabla 3.2).

	Periodo 1985-1989 Valor 10	Periodo 1985-1989 Valor 20
Periodo 2015-2019 Valor 1	11	21
Periodo 2015-2019 Valor 2	12	22

Tabla 3.2: matriz de cambio en donde los valores 10 y 1 son suelo sin vegetación y los valores 20 y 2 son pradera de alta montaña.

Por lo que esta matriz de cambio es la representación de cómo ha variado el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989 al periodo 2015-2019.

Al final en la tabla de atributos se creó el FILD “Cambio” y se utilizó la herramienta Field calculator, esto con el objetivo de sumar los valores de ambos periodos de tiempo tanto de suelo sin vegetación como de pradera de alta montaña, para que en la capa “cambio” se viera en que puntos hubo un cambio en el LSPAM.

3.1.3 Clasificación

Permite una descripción significativa de los cambios de la cobertura vegetal, incluyendo todas las clases de interés para la evaluación del estado. En donde después de obtener la matriz de cambio se obtuvieron variables físicas de la zona de estudio, así como a calcular otros valores que a continuación se mencionaran para así poder hacer un a mejor interpretación del presente trabajo.

También se calculó el área total del grupo “suelo sin vegetación” de cada uno de los periodos estudiados, esto en km² para conocer cuánto ha variado el área de esta clasificación, pues con ello se podrá saber si la pradera de alta montaña ha ganado o perdido más altitud.

Para obtener el área de cambio de suelo sin vegetación a pradera de alta montaña y de pradera de alta montaña a suelo sin vegetación se creó una COLUMNA llamada “área cambio” en tabla de atributos del archivo vectorial (Shaphefile) de la matriz de cambio, en esta COLUMNA se calculó el área de los grupos suelos desnudo y pradera de alta montaña en kilómetros. Después de ello para obtener el total de un periodo a otro y ver cuánto vario el área, en la misma tabla de atributos se sumaron los valores de los polígonos con la opción “Summarize”.

También se obtuvieron variables físicas para unirlas en una sola capa, todas estas de un CEM (Continuo de elevaciones mexicano), de INEGI con una resolución de 15 metros.

ALTITUD

La altitud es un factor determinante para el desarrollo de la vegetación, para se utilizó el CEM, donde se obtuvo la altimetría del volcán Iztaccíhuatl, en ARGIS 2.2 con la herramienta 3D analyst tolos, esto con el objetivo de dar los valores altimétricos a la montaña y observar en que altitud se da el LSPAM y ver como esta ha variado con el tiempo, pues con este elemento se puede observar si hubo un cambio, con lo cual también se pueden obtener datos estadísticos en que puntos y el motivo de porque se ha modificado el LSPAM.

ORIENTACIÓN DE LAS LADERAS

Es un factor importante pues de esta depende mucho la radiación solar, la exposición a los vientos, la dirección de los flujos de agua, etc. En el desarrollo de la vegetación es importante, pues como influye en los elementos abióticos ya mencionados va a afectar de manera importante el LSPAM.

Por ellos se utilizó la herramienta Spatial Analyst Tools - Surface - Aspect

PENDIENTES DE LAS LADERAS

Este factor ambiental desarrolla un papel fundamental en el desarrollo del suelo pues cuando mayor es la pendiente el desarrollo edáfico es menor, por consecuencia el asentamiento de vegetación será menor en laderas con mucha pendiente en comparación con otras de poca pendiente.

Para ello se utilizó la herramienta Spatial Analyst Tools - Surface - Slope.

GEOMETRIA DEL RELIEVE

Es un factor muy importante pues de esta depende mucho el asentamiento de vegetación pues esta muestra la forma del relieve así como en que sitios esta es cóncava o convexa, pues con ellos se comprende mejor los procesos de erosión y escorrentía de las laderas, para ello se elaboró la geometría en el volcán Iztaccíhuatl.

Esto se hizo con la herramienta Spatial Analyst Tools – Surface - Curvature, en donde se agregaron las salidas en planta y en perfil.

En la salida en perfil sirvió para poder observar la aceleración y desaceleración del flujo el cual influye en la erosión, la cual se da más en superficies convexas, como son las laderas del volcán Iztaccíhuatl, pues esto afecta en el desarrollo vegetal, pues entre más convexa y más erosionado este el terreno el desarrollo de las plantas será menor.

Mientras que en la salida en planta se puede observar la convergencia y divergencia del flujo, esto influirá en ver en qué zonas hay más humedad pues este factor está relacionado con el desarrollo de la vegetación y se puede dar en superficies con tendencias más cóncavas pues hay una mayor concentración de agua.

DIRRECCION DE FLUJO

La dirección de las corrientes fluviales es muy importante pues la erosión fluvial en esta montaña es constante (Véase capítulo 2), para clasificar las direcciones fluviales se basó en la utilización de un modelo de punto de fluidez (Figura 3.13), se utilizó la herramienta Spatial Analyst Tools – Hydrology – Flow direction, y para

rellenar los errores del geoproceto se utilizó Spatial Analyst Tools – Hydrology – Fill. (Jenson *et al.*, 1988, op cit. ESRI, 2015).

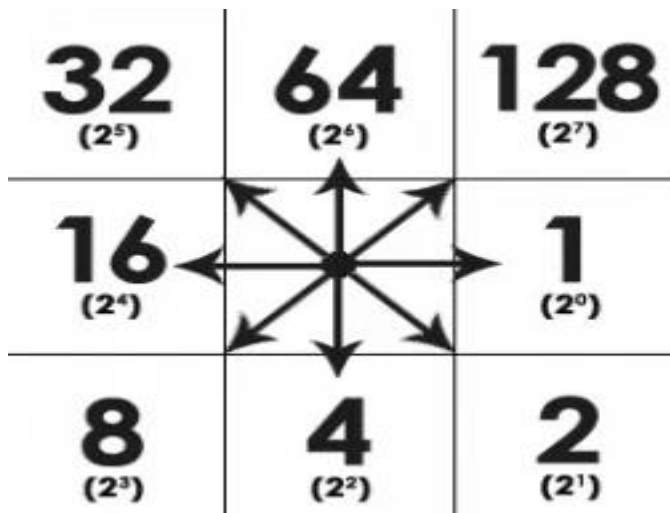


Figura 3.1: Modelo de punto de fluidez de ocho direcciones (Tomado de Arcgeek, 2018).

RADIACION SOLAR

Conocer donde hay mayor radiación solar es importante pues donde hay mayor radiación afecta en la humedad del suelo y por ello al desarrollo vegetal, se utilizó la herramienta *Spatial Analyst Tools – Solar Radiation – Area Solar Radiation*.

CAPA DE SUELOS

Se usó el shaphefile de la carta de Edafología, escala 1.250 000 (INIFAP-CONABIO, 1995), para ello se usó la herramienta Merge para agregar las unidades del suelo a los puntos de los diferentes periodos de tiempo del área de estudio.

En el siguiente esquema se explica cómo se agregaron a los shapefiles del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989 y el periodo 2015-2019, los elementos físicos ya mencionados para así poder hacer una mejor interpretación de porque en algunos puntos hubo un cambio en el LSPAM.

ESQUEMA DE CAPAS GEOGRÁFICAS

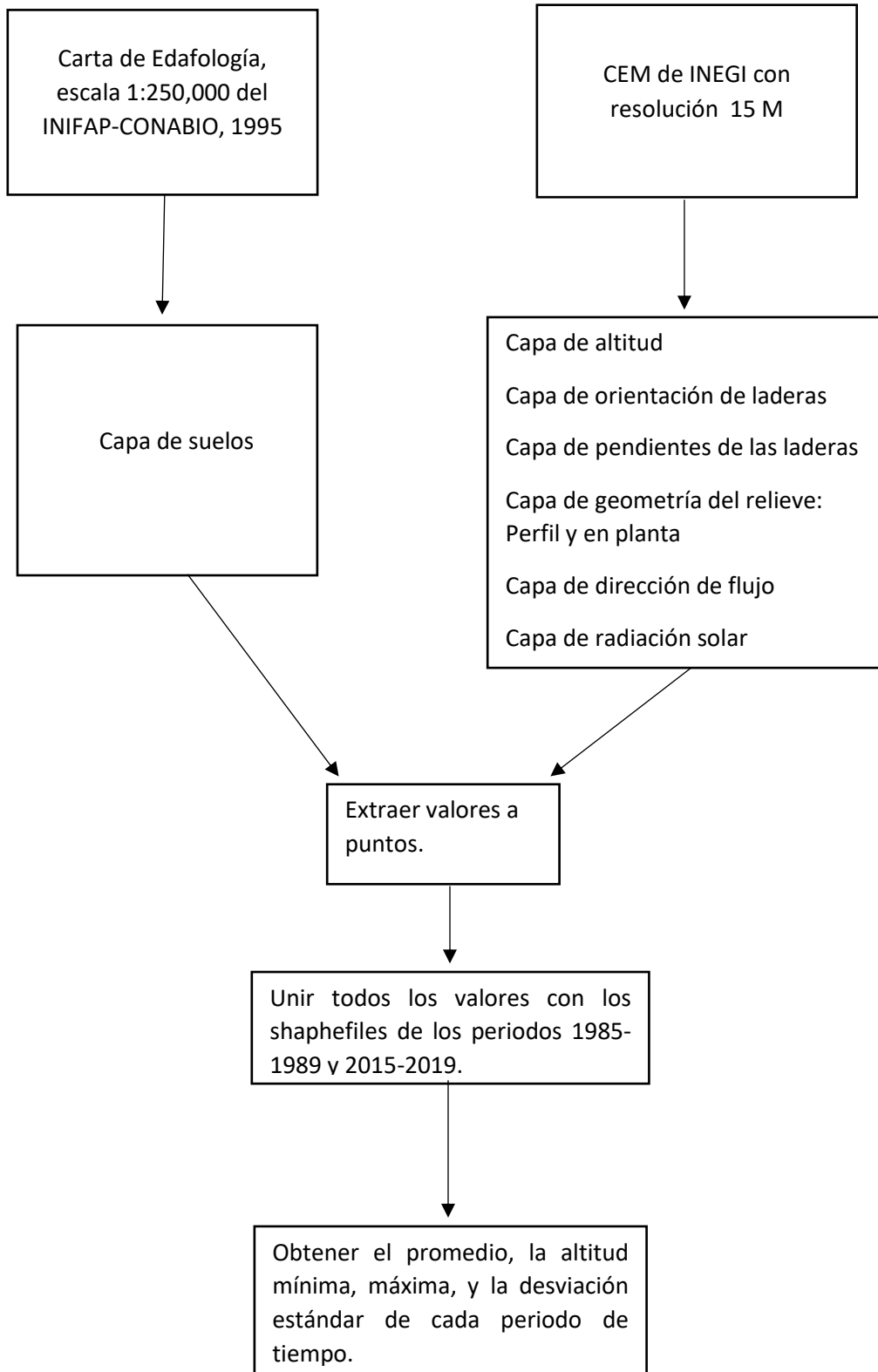


Figura 3.2: Esquema de obtención y elaboración de los datos geográficos.

Capítulo 4 Análisis de resultados

4.1 Distribución actual de la vegetación

4.1.1 Mapas de vegetación del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989 y el periodo 2015-2019

Se muestran los resultados que son los mapas de vegetación del volcán Iztaccíhuatl de los periodos 1985-1989 y 2015-2019 (Figura 4.1 y figura 4.2), en donde se puede observar cómo ha variado el límite superior de la pradera de alta montaña.

En donde a primera instancia pareciera que no ha habido cambios o estos son muy escasos en el LSPAM, pero en escala de tiempo humano estos cambios menores son grandes debido a la perturbación antrópica y natural, en donde se infiere que si no hubiera presencia de perturbación antrópica estas transformaciones que se observan hubieran tardado centenas de años en darse y no solo unas cuantas décadas.

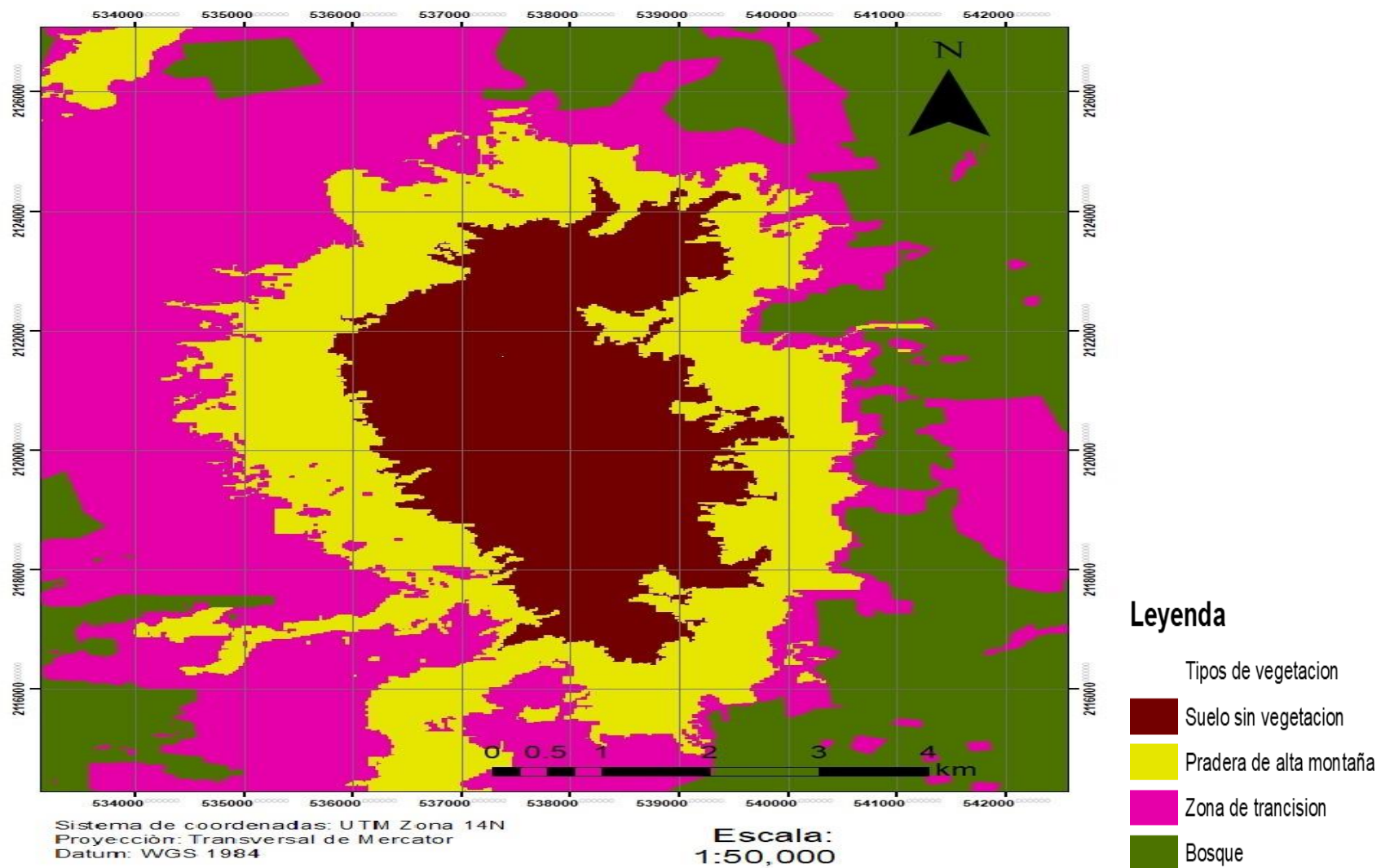


Figura 4.1: Mapa de vegetación del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989.

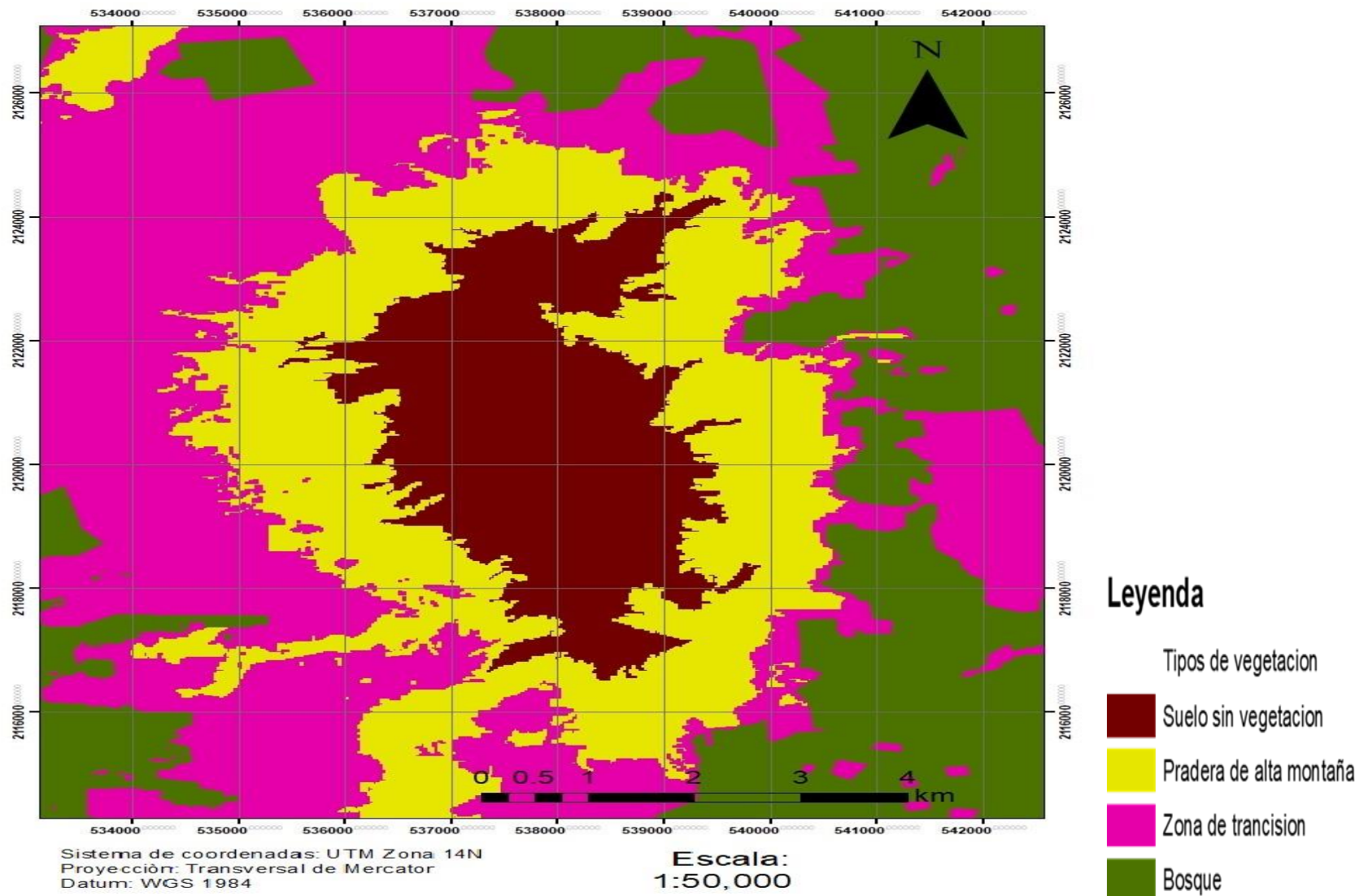


Figura 4.2: Mapa de vegetación del volcán Iztaccíhuatl del periodo 2015-2019.

4.1.2 Mapa de cambio del LSPAM del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989 al periodo 2015-2019

En la figura 4.3 se observa el mapa de cambio, en donde se hace énfasis en las capas de suelo sin vegetación y pradera de alta montaña, en donde se observó en qué partes hubo cambios de suelo sin vegetación a pradera de alta montaña y viceversa en el periodo de tiempo de 1985-1989 al 2015-2019. Se observa que hubo una mayor ganancia de la capa pradera de alta montaña, sobre la capa suelo sin vegetación.

Por lo que es probable que esto haya sido por el aumento en la temperatura local, pues las condiciones ambientales fueron idóneas para que la pradera de alta montaña ocupara zonas de suelo desnudo.

También se observa que los cambios en el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl no fueron iguales en toda la montaña pues en la parte Noreste de la montaña y en el Oeste de la misma el incremento en el LSPAM fue más notorio, por lo cual para conocer cuáles fueron las causas específicas en estas modificaciones es necesario hacer futuras investigaciones.

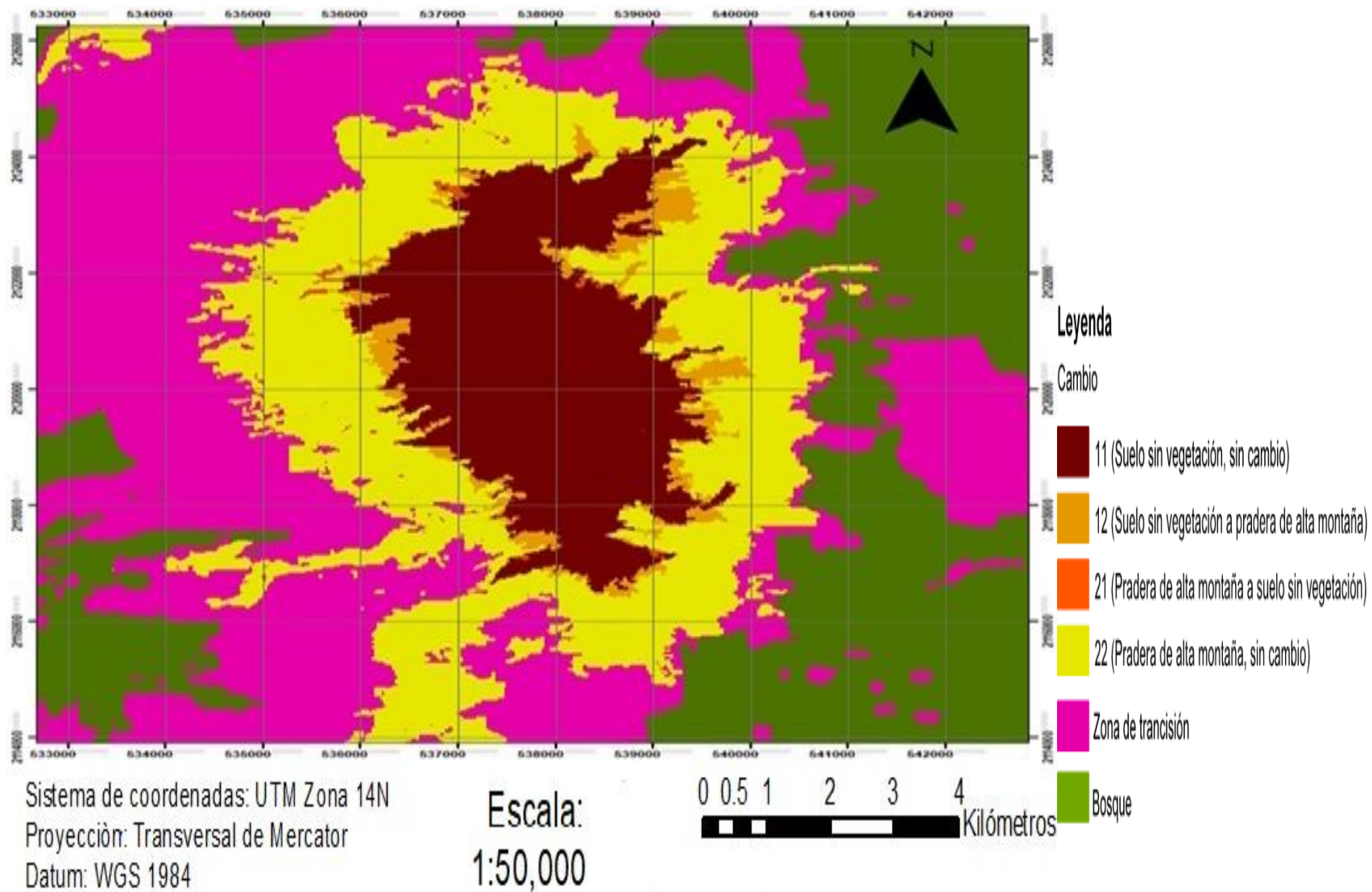


Figura 4.3: Mapa de cambio del límite superior de la pradera de alta montaña del periodo 1985-1989 al periodo 2015-2019.

4.1.3 Mapa de altimétrico del volcán Iztaccíhuatl con el límite superior de la pradera de alta montaña del periodo 1985-1989 y el periodo 2015-2019

En la figura 4.4 se muestran las líneas del LSPAM del Iztaccíhuatl de los periodos analizados: 1985-1989 y 2015-2019, en la cual se observa cómo este límite ha variado, en donde principalmente tiende a variar hacia una mayor altitud, aunque hay zonas en donde el LSPAM ha descendido.

Por lo cual de manera general se observa que la pradera de alta montaña ha sufrido alteraciones en su límite superior debido a la perturbación antrópica y natural, pues ahora lo importante es hacer futuros estudios para saber cuáles son las causas específicas de estas modificaciones tanto en ascenso y en descenso del LSPAM del volcán Iztaccíhuatl, con lo cual esto servirá para hacer mejores programas de manejo y restauración en este ecosistema.

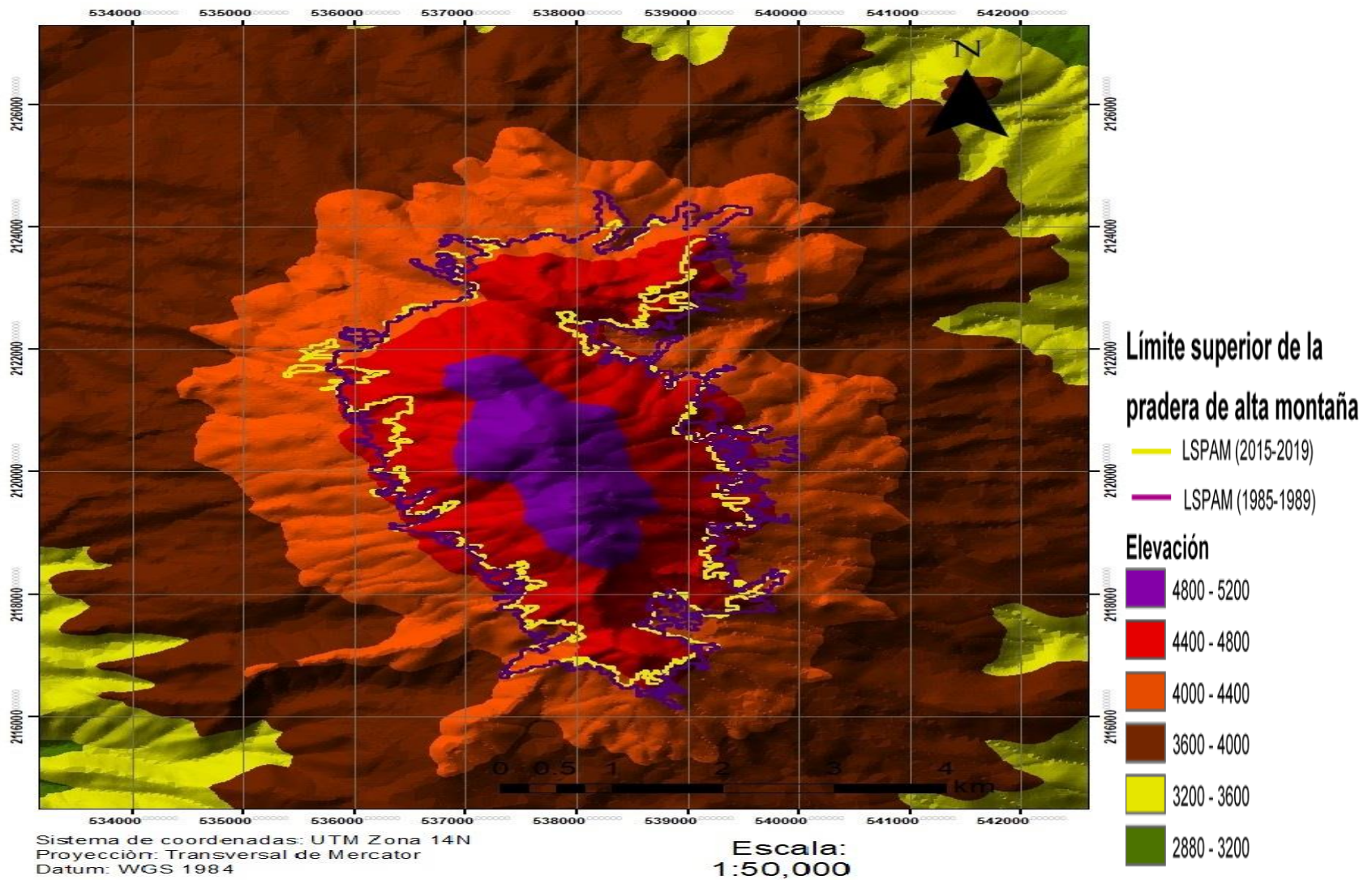


Figura 4.4: Mapa altimétrico de volcán Iztaccíhuatl con el límite superior de la pradera de alta montaña con sus respectivos periodo.

4.1.4 Áreas de las capas

Para poder obtener los datos estadísticos del presente trabajo se utilizó la estadística de la tabla de atributos de los mapas ya elaborados, los cuales se hicieron en el programa ARGIS 2.2.2.

A continuación, se presenta el área (km²) de cambio de suelo sin vegetación a pradera de alta montaña y de pradera de alta montaña a suelo sin vegetación en la tabla 4.1.

Cambio	Área de cambio (km ²)
De suelo sin vegetación a pradera de alta montaña	3.824 km ²
De pradera de alta montaña a suelo sin vegetación	1.220 km ²

Tabla 4.1: Área de cambio de suelo sin vegetación a pradera de alta montaña y de pradera de alta montaña a suelo sin vegetación del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989 al 2015-2019.

En forma cuantitativa se puede medir el cambio de área que ha sufrido el LSPAM, en donde se pudo observar que la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl ha ganado más superficie que la que ha perdido en el periodo de 1985-1989 al periodo 2015-2019.

Se obtuvo el área de la zona suelo sin vegetación para ambos periodos en km², para saber si esta capa aumentó o disminuyó su área en los periodos de tiempo estudiados, lo cual esto se hizo para observar si el LSPAM vario con el tiempo y si esta variación fue ascendente o descendente, esto se muestra en la tabla 4.2.

Periodo	Área (km ²)
1985-1989	19.203
2015-2019	16.600

Tabla 4.2: Área del grupo suelo sin vegetación del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989 y el periodo 2015-2019.

Como se puede ver la capa suelo sin vegetación decreció en el periodo de tiempo estudiado, lo que se podría considerar que la capa pradera de alta montaña ocupó parte del área que antes era de suelo desnudo, el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl tuvo un ascenso, principalmente.

La temperatura al igual que las anteriores variables físicas también es un factor importante de cambio, la cual está ligada con la altitud ya que el gradiente térmico de la región ha sido calculado entre los -0.69°C y -0.61°C por cada 100 metros de ascenso altitudinal por Andrés *et al.*, (2010); Torres (2012) calculó la temperatura media anual en 2006 que va de 4.6 a 4.8°C para una altitud de $4,000$ m, con base en esta información se calculó que la temperatura media es de 0.5°C y 1.2°C aproximadamente, sobre los 4600 m de altitud; a más de 4000 m de altitud, esta zona se caracteriza por tener un clima frío E(T)H, con temperaturas medias anuales entre -2 y 5°C , por esta razón las plantas poseen una breve estación de crecimiento donde pueden efectuar su ciclo evolutivo en unas cuantas semanas tales como helechos, musgos y líquenes, así como algunas herbáceas (Rzedowsky, 1994, op cit. Hernández y Carrasco, 2007), Almeida *et al.*, (1994), menciona que la pradera de alta montaña puede prosperar a una temperatura media anual de 0°C .

4.1.5 Diferencias y análisis entre el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989 al periodo 2015-2019

En la tabla 4.3, se muestra la altitud del LSPAM del volcán Iztaccíhuatl de ambos periodos de tiempo, esto para observar las variaciones que ha tenido la vegetación.

	LSPAM (1985-1989)	LSPAM (2015-2019)
# de puntos	2210	1519
Longitud (km)	93.925	72.294
Altitud mínima (m.s.n.m.)	3976	3976
Altitud máxima (m.s.n.m.)	4650	4650
Promedio (m.s.n.m.)	4383	4422
Desviación estándar	91.879	120.108

Tabla 4.3: Estadísticas de la altitud del límite superior de la pradera de alta montaña del periodo 1985-1989 y el periodo 2015-2019.

Se puede observar que la longitud del LSPAM del volcán Iztaccíhuatl varía en ambos periodos de tiempo, pues en el periodo 1985-1989, la longitud (93.925 km) es mayor con respecto al periodo 2015-2019 (72.294 km), esto es debido a que el LSPAM, tuvo un incremento en altitud, por lo que su longitud disminuye. Este ascenso del LSPAM, también se ve en el promedio de ambos periodos analizados, pues en el periodo 1985-1989 el promedio del LSPAM era de 4383 m de altitud y el del periodo 2015-2019 es de 4422 m de altitud, por lo que se ve una diferencia de 39 metros en promedio del LSPAM de un periodo a otro, el cual es debido a que la densidad de la pradera de alta montaña haya aumentado en los últimos años, por lo que es probable que ya existieran manchones de pradera de alta montaña y que para el periodo de tiempo más actual analizado, éstos hayan colonizado nuevos espacios por lo que su superficie aumento, ya que los sensores remotos con lo que se trabajó (Capítulo 1) los pudieron detectar.

Como aparece en la tabla 4.3, se aprecia que tanto la altitud mínima como la máxima del LSPAM del volcán Iztaccíhuatl, en ambos periodos fue de 3976 m y de 4650 metros respectivamente, datos que fueron medidos en los mismos puntos de altitud, de lo que se puede inferir que debido a las condiciones ambientales a una mayor altitud del punto máximo registrado, siguen siendo hostiles para la pradera de alta montaña por lo que no hubo un ascenso para el último periodo de tiempo en ese punto.

En la tabla 4.4, se muestran los valores de altitud del LSPAM, de los dos periodos analizados.

	Promedio del periodo del LSPAM del periodo 1985-1989 y el periodo 2015-2019
# de puntos	64
Altitud mínima (m.s.n.m.)	4007
Altitud máxima (m.s.n.m.)	4362
Promedio (m.s.n.m.)	4233
Desviación estándar	96.123

Tabla 4.4: Valores de altitud del LSPAM de los periodos 1985-1989 y 2015-2019.

Se observó (tabla 4.4), que la diferencia de la altitud mínima que es de 4007 m de altitud, con la de cada periodo de tiempo, no varía mucho (3976 m.s.n.m. LSPAM ambos periodos), el promedio de 4233 m de altitud, es más cercano al LSPAM del periodo 1985-1989 (4383 m.s.n.m.) que al del LSPAM del periodo 2015-2019 (4422 m.s.n.m.), mientras que la altitud máxima que es de 4362 m de altitud es mayor con respecto a la de ambos periodos de tiempo que es la misma (4650 m.s.n.m.). Esto es debido a que hay mayor cantidad de más puntos entre los 4200 y 4300 m de altitud, para ambos periodos, por lo cual se puede inferir que los mayores cambios se realizaron en esta franja, debido a las condiciones ambientales, pues conforme aumenta la altitud el medio físico es más hostil para el desarrollo de la pradera de alta montaña, como ya se mencionó; la densidad vegetal aumento más entre los 4200 y 4400 m de altitud, pues las condiciones físicas como la pendiente, orientación, etc., fueron las adecuadas para el desarrollo de la pradera de alta montaña.

4.2 Relación de los resultados con las consecuencias que trae la perturbación antrópica y natural en los servicios ambientales del ecosistema de pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl.

Los factores naturales y antrópicos actualmente juegan un papel importante en el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl, pues la combinación de ambos ha hecho que esta se modifique.

En casi toda la montaña, hubo cambios en el LSPAM, pero sólo se analizaron aquellas áreas en donde dichas modificaciones fueron significativas, con base en el análisis de los factores naturales y antrópicos, para inferir cuales fueron las causas que ocasionaron dichas perturbaciones.

Como ya se mencionó en la metodología, se hizo un análisis de diferentes variables físicas que se unieron en una sola capa (CEM), de donde se obtuvo la información que se menciona para cada uno de los sitios analizados, los resultados del lado norte de la montaña, donde hubo un crecimiento en el LSPAM fueron: que fue de un cambio altitudinal de los 4330 m a los 4380 m, la radiación solar es alta, ya que es de 2404 kWh/m², tiene una orientación de entre 270° y 330° de la montaña, el tipo de suelo predominante es el Regosol dístico, la pendiente no es mayor a los 15°, en donde en las partes bajas el relieve tiende a ser más sub horizontal, pero conforme aumenta la altitud éste se hace más convexo, en la dirección de flujo varía entre el oeste, noroeste, norte y noreste.

En esta zona se puede inferir que el principal factor determinante en el LSPAM, fue la morfología de la montaña, pues se caracteriza por ser convexa, la cual hace que tenga pendientes superiores a los 15° de inclinación, además conforme aumenta la altitud pasando de los 4000 m la unidad de suelo dominante deja de ser el Regosol distrito y pasa a ser Litosol, que de acuerdo con INEGI (2004), es un suelo más arenoso, lo cual ocasiona que la vegetación no se pueda asentar.

Otra área donde hubo también un fuerte incremento en el LSPAM, fue al noreste de la montaña, que fue de una altitud de 4310 m a 4540 m, se caracteriza por tener una fuerte radiación solar de 2466 kWh/m², una geometría sub horizontal, una

pendiente no mayor a 15° de inclinación, aunque la mayoría de los puntos de la zona están en una inclinación menor a 10°, una orientación entre 30° y 100°, una dirección de flujo hacia el este y el sureste, el tipo de suelo predominante fue litosol, y la altitud fue de 4300 m a 4600 m,

Por lo que se podría decir que estos grandes cambios en el LSPAM en esta área, se podrían deber a que las condiciones físicas fueron propicias porque es una zona que recibe mucha radiación solar, ya que es la primera al recibir los rayos solares, así como de humedad, al estar situada al noreste de la montaña pues reciben la humedad de los vientos alisios provenientes del Golfo de México (Lauer, W. 1978, op cit. Torres, 2012), también es una zona muy benéfica para el desarrollo de la vegetación, ya que la inclinación es baja, al ser una geometría sub horizontal, el suelo no influyó en nada, ya que es una zona localizada sobre Litosol que es un suelo pobre en nutrientes (INEGI,2004).

En la cara este también hubo un crecimiento en el LSPAM, el cual paso de una altitud de 4300 m a 4510 m, ésta se caracteriza por una radiación solar que tiende a ser media, la cual es de 2397 kWh/m², la geometría del relieve es principalmente sub horizontal, aunque la mayor parte se caracteriza por tener una pendiente entre 14° y 19° de inclinación, posee una orientación entre 60° y 100°, la mayoría de los puntos están a 80° de orientación, una dirección de flujo de este a sureste y el suelo predominante es el Litosol, el crecimiento del LSPAM en esta zona paso de 4350 m a 4500 m de altitud.

La humedad proveniente del este, es un factor importante que favoreció al cambio en el LSPAM, igual también influyó que es una superficie sub horizontal, aunque tenga una inclinación superior a los 15°.

Otro sitio donde hubo un crecimiento importante del LSPAM del volcán Iztaccíhuatl, fue la cara oeste, el cual fue de una altitud de 4440 m a 4610 m, éste se caracteriza por tener una radiación solar alta, que es de 2399 kWh/m², la geometría del relieve tiende a ser convexa y posee una pendiente que oscila entre los 14° y 28° de inclinación, posee una orientación entre los 233° y 275°, así como una dirección de flujo al oeste, el suelo en las zonas más bajas del LSPAM de esta zona es el Regosol

dístrico y conforme aumenta la altitud el tipo de suelo predominante es el Litosol, el cambio altitudinal fue entre los 4400m y 4637 m.

La alta radiación solar juega un papel importante para el crecimiento de la vegetación, al igual que el tipo de suelo, pues cuando comenzó a ser de tipo Litosol, hubo una menor colonización de la pradera de alta montaña, al igual la altitud fue otro factor limitante para el desarrollo de la misma pues casi no hay zacatonal por encima de los 4600 m, la pendiente no fue un factor determinante pues incluso creció vegetación de manera abundante hasta los 28° de inclinación.

El cambio climático también es un factor importante pues de acuerdo con Torres (2012), identificó que a partir de 1977 se puede observar un incremento de la temperatura, con un evidente cambio de tendencia de la temperatura a partir de este año, pues con ello se puede inferir que entre los 4300 m y 4600 m de altitud, se dio este aumento de la temperatura promedio el cual podría ser un elemento del crecimiento del LSPAM, en las zonas mencionadas.

En la cara noroeste hubo un descenso en el LSPAM, donde se caracteriza por tener una radiación solar media de 2208 kWh/m², una geometría del relieve convexa, una pendiente no mayor a 20°, una orientación de 310° a 360°, la mayoría de la dirección de flujo va de oeste a noroeste, la diferencia en altitud fue de 4410 m a 4340 m y el tipo de suelo predominante fue Regosol dístrico.

Es probable que este descenso del LSPAM en esta zona del volcán Iztaccíhuatl, haya sido por un movimiento de remoción en masa, pero igual la perturbación antrópica haya tenido que ver, pues esta es una zona de senderismo para los excursionistas según Neyra (2012), lo cual hace que se creen rutas de acceso originando, un patrón cuadrículado de la vegetación, pues ésta modifica la fisionomía, composición florística y las condiciones físicas (Rzedowski, 1978, 1979, op. cit. Hernández y Carrasco, 2007), también otro impacto antrópico es el pastoreo en las grandes altitudes, ya que se han observado vacas por arriba de los 4000 m de altitud hasta los 4650 m de altitud en el Iztaccíhuatl, justo donde es el LSPAM (Neyra, 2012), pero esto no significa que esta zona haya quedado totalmente libre de vegetación sino que es probable que la densidad vegetal haya disminuido y

como los sensores remotos con los que se trabajó cuentan con una resolución espacial de 30 m (Véase capítulo 1), ya no pudieron detectar zacatonales.

En el lado este de la montaña, hay un descenso en el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl, sitio que se caracteriza por tener una alta radiación solar de 2353 kWh/m², una geometría de relieve convexa, una pendiente superior a los 20° de inclinación, una orientación de 277° y 325°, una dirección de flujo de oeste y noroeste, el suelo predominante es el Regosol dístico, en donde la altitud tuvo un descenso aproximado entre 4379 m y 4233 m. Por lo que se infiere que este descenso pudo deberse a un movimiento de remoción en masa o a la ganadería.

4.3 Medidas de mitigación y conservación con miras al manejo del ecosistema de la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl.

En la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl se necesitan emplear distintas medidas de mitigación y conservación, para que este ecosistema siga siendo integro, es por ello que aquí se dan los puntos clave del programa de manejo del parque Izta-Popo Zoquiapan: por parte de la CONANP (2013):

- Realizar actividades de restauración y protección de cambio de uso de suelo.
- Realizar reuniones en las comunidades para difundir la normatividad ambiental en materia de cambios de uso de suelo.
- Realizar recorridos permanentes para evitar los cambios de uso de suelo en áreas con regeneración natural.
- Realizar acciones de restauración de los ecosistemas con el propósito de recuperar la cubierta forestal, evitar la erosión, los deslizamientos y mitigar el cambio climático.

- En coordinación con las dependencias competentes establecer estrategias para estabular el ganado.
- Promover la investigación que contribuya a generar conocimiento para entender e interpretar el cambio climático y sus impactos en la biodiversidad
- Promover la investigación científica sobre las especies que capturan el carbono, su hábitat y las amenazas que enfrentan.
- Difundir información clara y precisa sobre la problemática y estrategias frente al cambio climático.
- Difundir el valor del Parque Nacional como sumidero de carbono.

De igual forma es muy importante la investigación científica de este ambiente, por lo cual este trabajo servirá para que se elaboren futuros estudios sobre el volcán Iztaccíhuatl, para poder identificar las problemáticas específicas de cada ecosistema de la montaña y así poder dar soluciones integrales.

Conclusiones

A partir de que se obtuvo el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl de los dos periodos, 1985-1989 y 2015-2019, se confirma un cambio que se traduce principalmente como un ascenso en el LSPAM en los últimos 30 años, el cual en promedio este límite de la vegetación ascendió 39 m en altitud.

En la mayoría de los casos la pendiente y la presencia de suelo arenoso, como el Litosol y el Regosol distrito no fue un factor limitante en el ascenso de la pradera de alta montaña, pues esta vegetación prospera en sitios en los cuales las características del suelo impiden el desarrollo de otras formas de vida, pues son plantas bien adaptadas a condiciones de deficiencia de drenaje, de inundaciones periódicas, así como su asentamiento en suelos inmaduros derivados de depósitos volcánicos de edad poco avanzada, así como, a veces, sobre laderas muy inclinadas (Rzedowski, 2006).

Cabe destacar que aunque el LSPAM del volcán Iztaccíhuatl, haya cambiado, en los casos donde hubo un ascenso, no significa que antes no hubiera vegetación, sino que la densidad vegetal aumentó, por lo que los sensores Landsat con una resolución espacial de 30 m que se utilizaron los pudieron detectar, por lo que es probable que aun haya más individuos de la pradera de alta montaña a mayor altitud, es por ello que los sitios donde hubo más cambios fue en la franja de los 4200m y 4300 m de altitud que es la zona del zacatonal alto que se caracteriza por ser uno de los sitios de mayor abundancia vegetal, además de que los zacatonales que ahí se encuentran son de mayor tamaño (Véase capítulo 2) lo mismo, para las zonas donde el LSPAM descendió, pero no significa que se hayan convertido en un área completamente libre de plantas, sino que la densidad vegetal descendió y no pudieron ser detectados por los sensores remotos.

Este trabajo donde el ascenso de la vegetación de la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl en los últimos años, coincide en parte con el de Torres (2012), donde describe cómo el límite superior del bosque asciende, comparando los años de 1955 con el 2012, donde describe cómo las variables físicas actuaron en este

cambio, dando énfasis que el principal factor fue un aumento en la temperatura local, es por ello que se puede observar cómo la perturbación antrópica y natural está ocasionando modificaciones en la distribución de la vegetación del volcán Iztaccíhuatl, en donde las plantas tienden a ascender cada vez más a mayor altitud, derivado en parte por el aumento de la temperatura local y al cambio climático.

De los factores antrópicos y naturales que pudieron contribuir a los cambios en el LSPAM, del volcán Iztaccíhuatl, específicamente en la zona del superzacatonal que se caracteriza por tener zacatonales de tamaño reducido (Véase capítulo 2), se infiere que en la mayoría de los sitios donde hubo un ascenso del LSPAM se puede decir que principalmente fue provocado por el cambio climático y el aumento de temperatura local, mientras que en las zonas donde hubo un descenso del LSPAM, se infiere a que en la mayoría de los sitios fue provocado por actividades antrópicas, en específico, según Neyra (2012), por los alpinistas de la zona que fragmentan la vegetación para hacer nuevos senderos y por la ganadería de altura, ya que los rebaños se alimentan de la pradera de alta montaña.

Por ello es importante hacer investigaciones en diferentes zonas del LSPAM del volcán Iztaccíhuatl, para determinar en cada uno de estos sitios, cuál es el factor o los factores ya sean físicos, ambientales o antrópicos en específico, que han modificado el LSPAM, para así con ello tener mejores estrategias de conservación y mitigación ambiental de la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl.

El cambio climático es una amenaza real para este ecosistema, pues Steinmann *et al.*, (2019), menciona que la distribución actual de la vegetación alpina es pequeña, está sumamente fragmentada y depende de condiciones extremadamente frías para su desarrollo, existe la posibilidad de que durante el transcurso del siglo XXI este ecosistema se extinga o sea reemplazado por bosques que prosperan en condiciones menos frías. Pero en este estudio se pudo observar que la pradera de alta montaña se está adaptando por sí misma al cambio climático, es por ello que se observó cómo este ambiente aumentó su densidad vegetal a mayores altitudes y cómo en general el LSPAM, aumento en altitud, por ello se puede afirmar que este

ecosistema no está en riesgo de desaparecer en este siglo, pero sí muchas especies endémicas que habitan la pradera de alta montaña.

Una de las consecuencias que trae consigo abrir nuevos senderos para los alpinistas es que trae consigo una mayor concentración de visitantes, los cuales ocasionan, una mayor acumulación de basura, pisoteo de la vegetación, extracción de plantas y presencia de fauna exótica, como los perros (Maza-Villalobos, *et al.*, 2019), lo que daña considerablemente a la pradera de alta montaña, perjudicando los servicios ambientales que proporcionan, como son la captación de agua y retención de suelo, pues los zacatonales son capaces de retener el agua de la neblina y del deshielo, filtrándola hacia el suelo que retienen con sus raíces (Maza-Villalobos, *et al.*, 2019 op cit. Holdsworth, D y Mark, A. 1990) y su perturbación provocaría una menor captación de agua de estas plantas, haciendo el ambiente más seco, lo cual perjudicaría en la biodiversidad del lugar.

Es necesario hacer más estudios de alta montaña, incluyendo al volcán Iztaccíhuatl, pues aunque sea un área natural protegida, aún falta mucho por estudiar y por lo mismo no se tiene un manejo eficiente de este parque nacional y se considera que no se está protegiendo de manera eficiente la biodiversidad que ahí alberga, ya que las áreas de conservación son sitios para conservar la biota que se encuentra en ella (Morrone y Escalante, 2016 op cit. Margules Y Pressey, 2006), en donde su papel es proteger a los elementos de la biodiversidad de los procesos que amenazan su existencia silvestre (Morrone y Escalante, 2016 op cit. Margules y Pressey, 2000),

Es importante tener un mayor conocimiento de las problemáticas de la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl y los demás ecosistemas que conforman esta montaña, además de tener una mejor regulación con el turismo y el ganado, ya después de hacer las pertinentes investigaciones, se tendría que hacer la restauración de este ecosistema para garantiza la prosperidad de la biodiversidad, el esparcimiento humano y la creación de una conciencia colectiva en sentido ambiental, ya que se valorará más este sitio al ser un lugar prioritario para poder mitigar los efectos del cambio climático y otras problemáticas ambientales.

El presente trabajo sirvió para observar como la distribución espacial de la pradera de alta montaña del volcán Iztaccíhuatl se ha ido modificando por causas naturales y antrópicas, por lo cual sirve para hacer futuras soluciones para mitigar los efectos negativos hacia la población la perturbación que está habiendo en este ecosistema.

Se concluye que aunque estos cambios en escala de tiempo de vida humana sean mínimos y aparentemente no tengan consecuencias, en escala de tiempo geológico estas modificaciones si son significativas, por lo cual es probable que en las próximas décadas, estas alteraciones puedan traer graves repercusiones a la población local.

Bibliografía

- Aguirre, Raúl. 2009. Conceptos de geomática y estudios de caso en México. Colección: Geografía para el siglo XXI. Serie: Libros de investigación, num. 5. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Almeida-Leñero, L., Cleef, A., Herrera, A., Velázquez, A y Luna, I. 1994. El zacatonal alpino del volcán Popocatepetl, México, y su posición en las montañas tropicales de América. *Phytocoenologia* 22: 391-436.
- Almeida-Leñero, L., Escamilla, M., Giménez de Azcárate, J., González-Trápaga, A. y Cleef, M. A. 2007. Vegetación alpina de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Nevado de Toluca. En: Luna, I., Morrone, J. J. y Espinosa, D. (Eds.). *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana*. Facultad de Estudios Superiores Zaragoza e Instituto de Biología. UNAM. Ciudad de México, México. 179-198.
- Andres, N., Palacios, D., Zanonano, J y Vazquez-Selem, L. 2010. Distribución del permafrost e intensidad de los procesos periglaciares en el estratovolcán Iztaccíhuatl (México). *Ería*, 83. pp. 291-310.
- Arcgeek. 2018. Flow Direction calcula la dirección del agua usando la pendiente. Recuperado el 4/3/2020 en: <https://acolita.com/flow-direction-calcula-la-direccion-del-agua-usando-la-pendiente/>.
- Beaman, J. H. 1962. The timberline of Iztaccihuatl and Popocatepetl, Mexico. *Ecology* 43: 377-385.
- Beaman, J. H. 1965. A preliminary ecological study of the alpine flora of Popocatepetl and Iztaccihuatl. *Bol. Soc. Bot. Mex.* 29: 63-75.

- Bocco, G., Mendoza, M y Maserá, O. (2001). La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación (parte 1), Investigaciones Geográficas pp. 18-38.
- Camacho-Sanabria, J., Pérez, J., Pineda, N., Cadena, E., Bravo, L y Sánchez, M. 2015. Cambios de cobertura/uso del suelo en una porción de la Zona de Transición Mexicana de Montaña. Madera y Bosques vol. 21, núm. 1: 93-112.
- CONABIO.1999. Uso de suelo y vegetación modificado por CONABIO. Escala 1: 1000000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Ciudad de México, México. Recuperado el 12 de febrero del 2020.En: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/layouts/usva1mgw>
- CONABIO. 2006. Capital natural y bienestar social. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- CONAGUA.2005.Percepción remota “Fundamentos de teledetección Espacial”. Subdirección general de programación subgerencia de informática y sistema geográfico del agua jefatura de control cartográfico.
- CONANP.2013. Programa de Manejo Parque Nacional Iztaccíhuatl Popocatepetl. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Ciudad de México. México. 38 pp.
- Delgadillo M. C. 1971. Phytogeographic studies on alpine mosses of Mexico. The Bryologist 74: 331-346.
- Escamilla, E. 2007. La vegetación de la alta montaña del Volcán Iztaccíhuatl, México: un enfoque fitosociológico. Tesis de Maestría. Posgrado de Ciencias. UNAM.

Espinosa, D y Ocegueda, S. (2007). Introducción. En Biodiversidad de la faja volcánica transmexicana (57-72). Ciudad de México, México: Instituto de Biología. UNAM.

ESRI. ARGIS Desktop. 2.2.2. Recuperado el 28/2/2020. En:

<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-flow-direction-works.htm>

FAO (Food and Agriculture Organization). 1996. Forest resources assessment. Survey of tropical forest cover and study of change processes. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Recuperado el 2 de Diciembre del 2017 En:

<http://www.fao.org/docrep/007/w0015e/W0015E03.htm#ch2>

FAO (Organización de las naciones unidas para Agricultura y la Alimentación). 2009. Situación de los bosques del mundo. Subdivisión de Políticas y Apoyo en Materia de Publicación. Electronic División de Comunicación. Roma, Italia.

Gao, B. 1996. NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment 58: 257-266.

Galicia, L., García, A., Gómez-Mendoza, L y Ramirez, I. 2007. Cambio de uso del suelo y degradación ambiental. Ciencia. Research gate. pp. 50-60.

García, E.1998. Climas, escala 1: 1, 000,000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

García, F. 2008. Avalancha de escombros del Pleistoceno Tardío del cono Los Pies, Complejo Volcánico Iztaccíhuatl. Tesis de maestría en ciencias en geología:

Opción riesgos geológicos. Escuela superior de ingeniería y arquitectura, Sección de estudios de posgrado e investigación. Unidad Ticoman. IPN.

Hernández, J. 2011. Procesamiento digital de imágenes. Apuntes de clase. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. 38 pp. ISBN 978-956-353-324-8. (Actualización del capítulo Percepción Remota. en: Hernández, De La Maza y Estados (Eds) 2007. Manejo y Conservación de Recursos).

Hernández, M y Carrasco, G. (2007). Rasgos climáticos más importantes. En Biodiversidad de la faja volcánica transmexicana. Ciudad de México, México: Instituto de Biología. UNAM.

Huete, A. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment.

INEGI, a y b. Imágenes del Territorio. Recuperado el 12/11/19. En: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/elementos.aspx>

INEGI, c. Aspectos técnicos en las imágenes landsat. Dirección general de Geografía y medio ambiente. Recuperado el 8/11/19. En: https://www.academia.edu/27797124/ASPECTOS_T%C3%89CNICOS_DE_LAS_IM%C3%81GENES_LANDSAT_INEGI_Direcci%C3%B3n_General_de_Geograf%C3%ADa_y_Medio_Ambiente

INEGI. 2004. Guía para la identificación de la cartografía. Edafología. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, México.

- INEGI. 2014. Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000: serie V / Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- INEGI. 2017. Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250,000: serie VI / Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. México.
- INIFAP-CONABIO.1995. Edafología, escala 1:250,000. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales y Agropecuarias y la Comisión Nacional PARA EL Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.
- Johnston, R. 1979. Geography and geographers. Anglo American Human Geography since 1945. Ed. Arnold. London.
- López, V., Balderas, M., Chávez, M., Juan, J y Gutiérrez J. 2014. Cambio de uso de suelo e implicaciones socioeconómicas en un área mazahua del altiplano mexicano. Ciencia ergo-sum. Vol. 22-2. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, México. pp. 136-144.
- Lugo, J. 1984. Geomorfología del sur de la cuenca de México. Instituto de Geografía. Serie Varia T.1 Núm. 8. México. 35 pp.
- Marquina, J y Mogollón, A. 2017. Niveles y escalas de levantamiento de información geográfica de sensores remotos. Revista geográfica venezolana. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Escuela de Geografía, Departamento de Cartografía y Métodos. Mérida, Venezuela. Vol. 59(1). pp. 42—52.
- Maza-Villalobos S., Cotler, H., Almeida-Leñero, L., Hoth, J., Steinmann, V., Mastretta, A y Hernández, R. 2019. "Conservando el pastizal alpino mexicano.

Conocimientos, amenazas y esperanzas” Biodiversitas. Boletín bimestral de la Comisión Nacional para uso y Conocimiento de la Biodiversidad. Num. 142. Págs. 12- 16.

Morrone J y Escalante T. 2016. Introducción a la biogeografía. Facultad de Ciencias. Las prensas de ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México. Págs. 320.

NASA, a. Landsat 1. Landsat science. Recuperado el 12/2/2020. En:
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-1/>

NASA, b. Landsat 2. Landsat science. Recuperado el 8/11/19. En:
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-2-2/>

NASA, c. Landsat 3. Landsat science. Recuperado el 8/11/19. En:
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-3-2/>

NASA, d. Landsat 6. Landsat science. Recuperado el 8/11/19. En:
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-6-2/>

NASA e. Landsat 7 Science Data Users Handbook. National Aeronautics and Space Administration. Recuperado el 8/11/19. En:
https://landsat.gsfc.nasa.gov/wpcontent/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf

NASA f. Descripción de landsat 8. Landsat science. Recuperado el 8/11/19. En:
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview/>

NASA g. Landsat 8 bandas. Landsatscience. Recuperado el 12/11/19. En:
<https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-bands/>

- Neyra, J. 2012. Guía de las altas montañas de México y una de Guatemala. CONABIO. CDMX, México.
- Nixon, G. T. (1989). The Geology of Iztaccihuatl Volcano and Adjacent Areas of Sierra Nevada and Valley of Mexico. The Geological Society of American, Special Paper, núm. 219, pp. 1-58.
- Pasquarè, G. L. Vezzoli y Zanchi, A. (1987): Morphological and structural model of Mexican Volcanic Belt. Geofísica Internacional, núm. 26, pp. 159-176.
- Pearson, R. and Miller, L. 1972, Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the short-grass Prairie, Pawnee National Grassland, Colorado: 8th international symposium on remote sensing of environment, p. 1357-1381.
- Resendiz, A. 2015. Análisis y tratamiento digital de imágenes SPOT 5 aplicados al medio ambiente. Tesis de ingeniería geomática, Facultad de Ingeniería. UNAM.
- Roujean, J and Breon, F. 1995."Estimating PAR Absorbed by Vegetation from Bidirectional Reflectance Measurements." Remote Sensing of Environment 51: 375-384
- Rzedowski, J. 1975. An ecological and phytogeographical analysis of the grasslands of México. Taxón. Vol. 24 (1): 67-80.
- Rzedowski, J. 1994. Diversidad y orígenes de la flora fanerogámica de México. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Rzedowski, J. 2006. 1ra. Edición digital, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México.

- Santos, J. 1999. Las nuevas corrientes geográficas y didácticas y su repercusión en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la Geografía (el caso de la Geografía Urbana). Espacio, Tiempo y Forma. Serie VI. Geografía, t. 12. págs. 99-121.
- Steimann, V., Arredondo, Y., Ramirez, S., Maza-Villalobos, S., Hernández, R y Mastretta, A. 2019. "La vegetación alpina mexicana: Islas frías sobre las nubes" Biodiversitas. Boletín bimestral de la Comisión Nacional para uso y Conocimiento de la Biodiversidad. Núm. 142. Págs. 2- 6.
- Torres, C. 2013. Análisis de los cambios del límite superior del bosque en el volcán Iztaccíhuatl. Tesis de Licenciatura en Geografía, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM.
- Trucíos, R, González, M., Ramírez, G., Ávalos, J y Cerano, J. 2013. Análisis sobre el cambio de uso de suelo en dos escalas de trabajo. Tierra Latinoamericana. 31: 339-346.
- Varela, A. s/año. Landsat. Sistemas de Comunicación Vía Satélite. Kimerius. 40 pp.
- White, S. E.1962. El Ixtaccíhuatl: acontecimientos volcánicos y geomorfológicos en el lado Oeste durante el Pleistoceno Superior. Instituto Nacional de Antropología e Historia. México, D.F. 80 pp.
- Yarza, E.2003. Los volcanes del Sistema Volcánico Transversal. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 50, pp. 220-23.

Anexos

ANEXO A

MAPAS E IMÁGENES DE SATELITE

NDMI

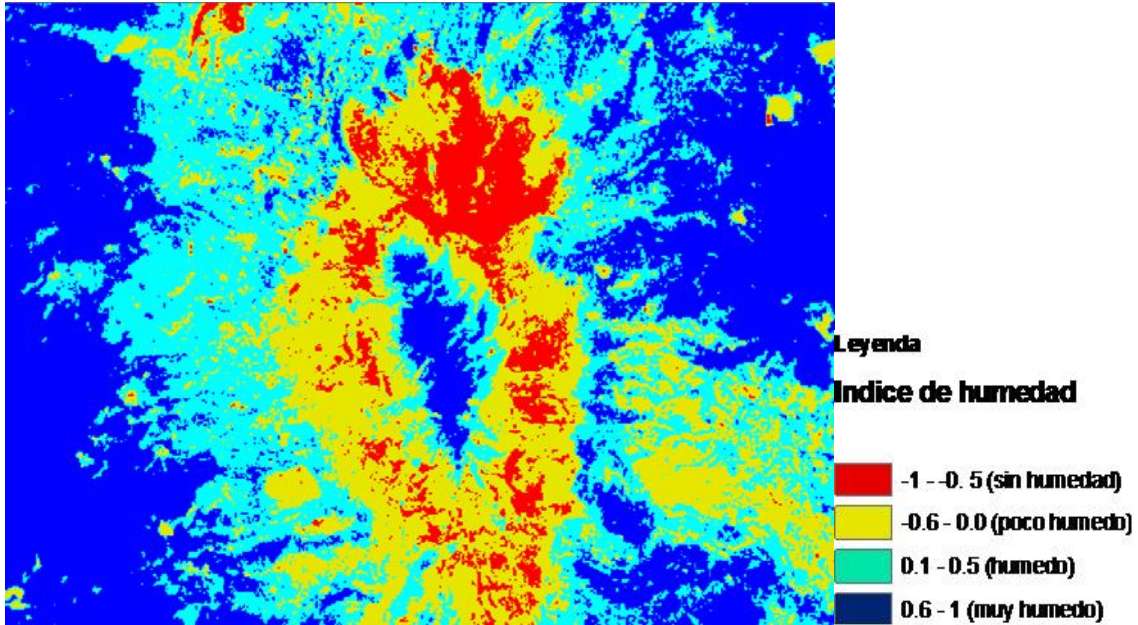


Figura 1: Imagen del promedio del índice NDMI del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989.

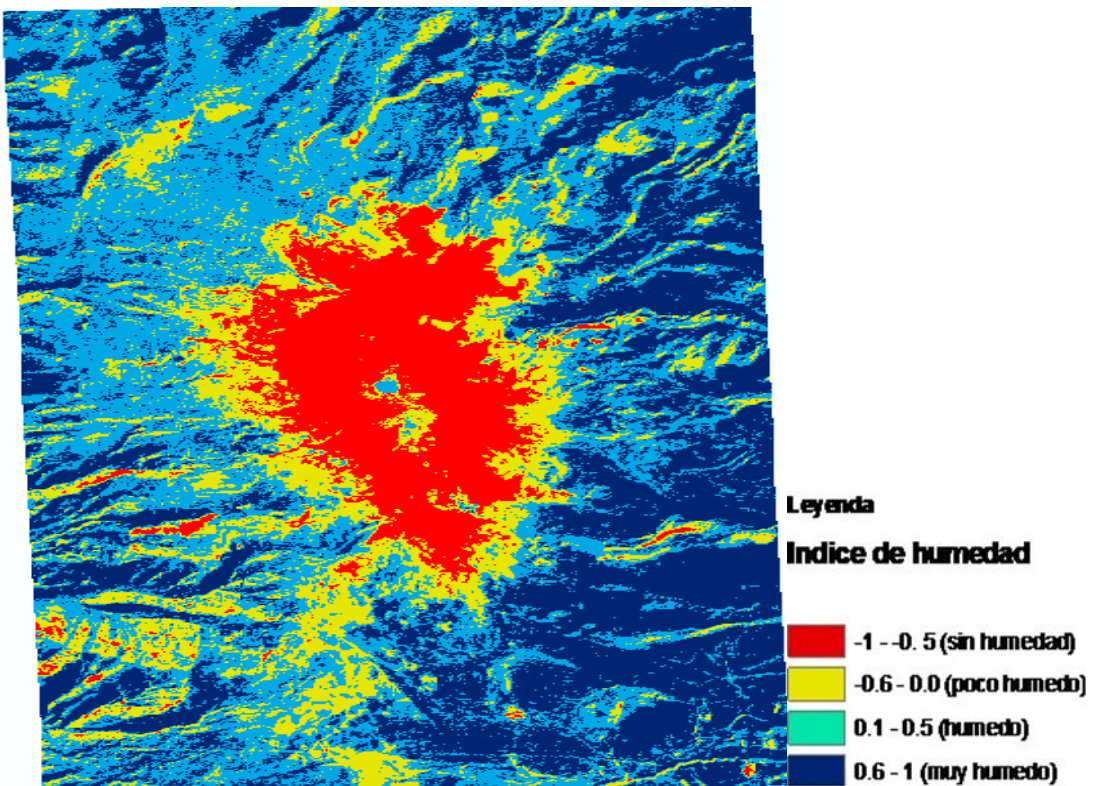


Figura 2: Imagen del promedio del índice NDMI del volcán Iztaccíhuatl del periodo 2015-2019.

NDVI

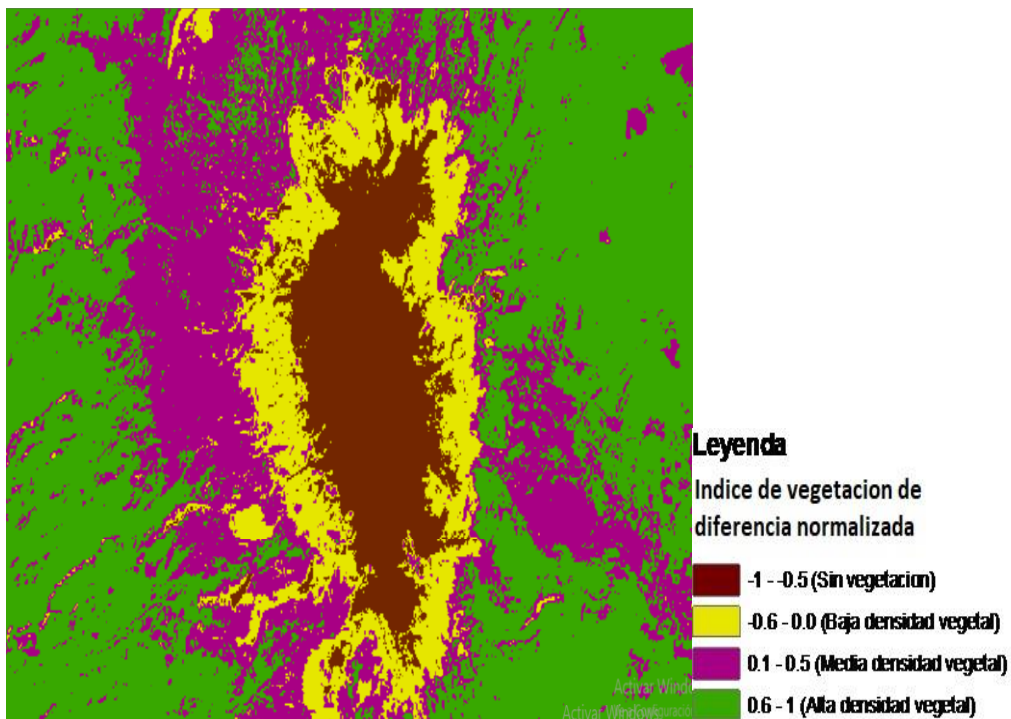


Figura 3: Imagen del promedio del índice NDVI del volcán Iztaccihuatl del periodo 1985-1989.

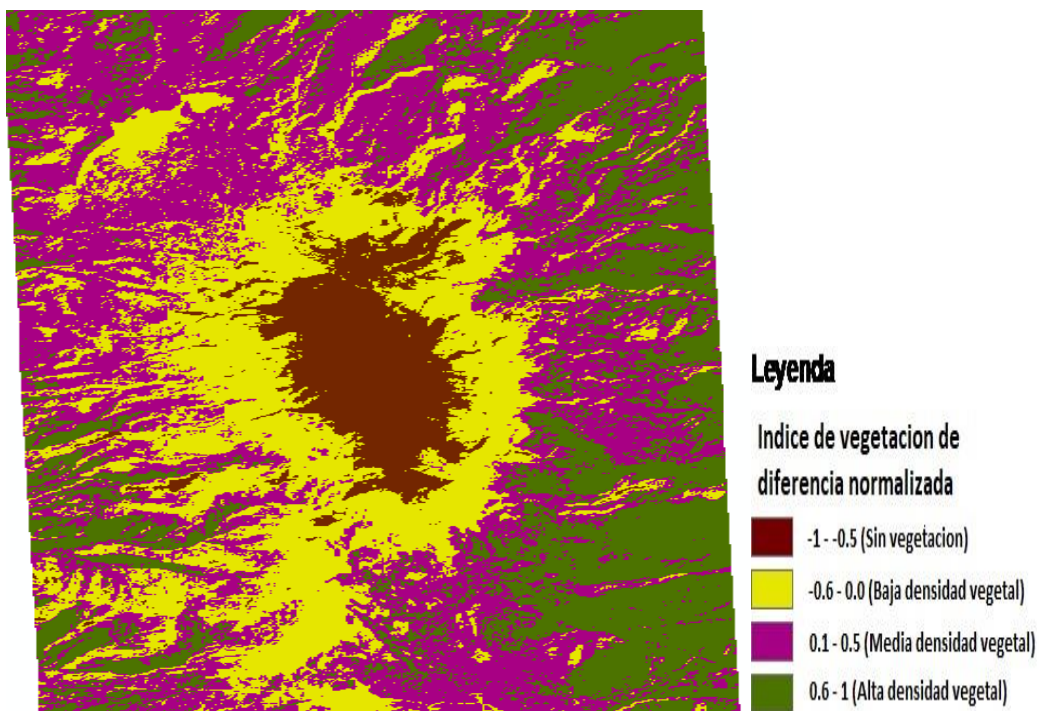


Figura 4: Imagen del promedio del índice NDVI del volcán Iztaccihuatl del periodo 2015-2019.

RDVI

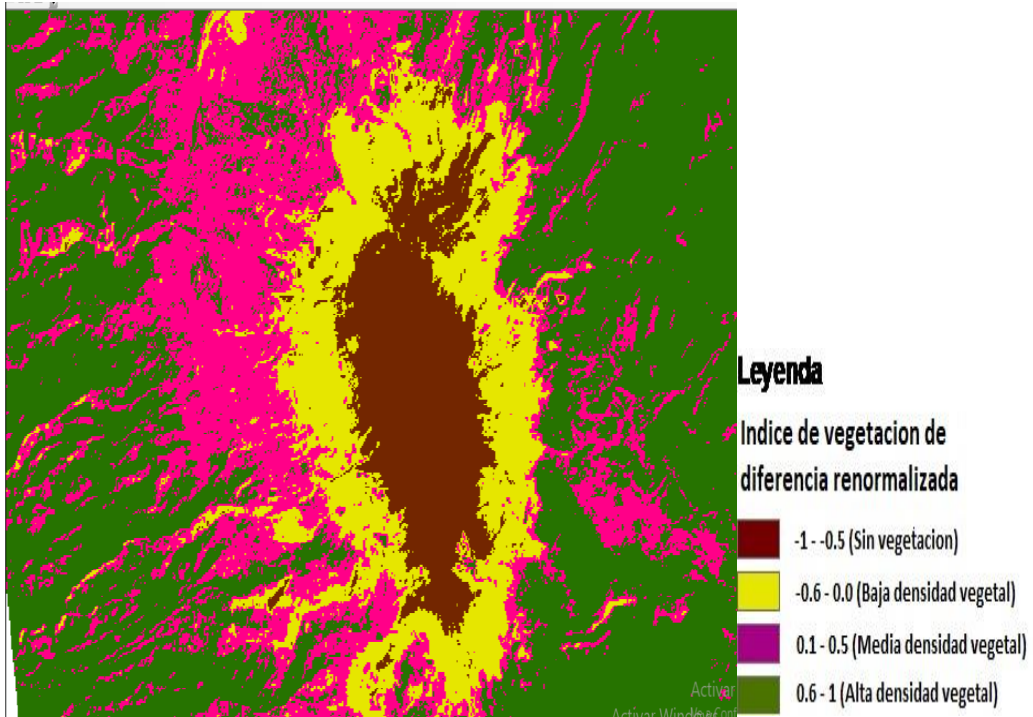


Figura 5: Imagen del promedio del índice RDVI del volcán Iztaccihuatl del periodo 1985-1989.

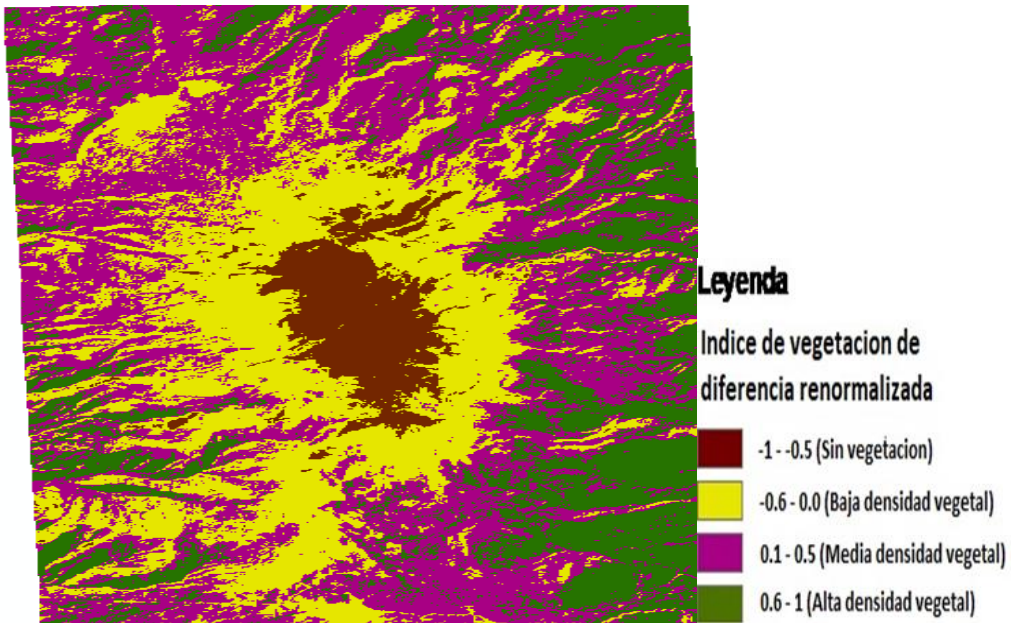


Figura 6: Imagen del promedio del índice RDVI del volcán Iztaccihuatl del periodo 2015-2019.

RVI

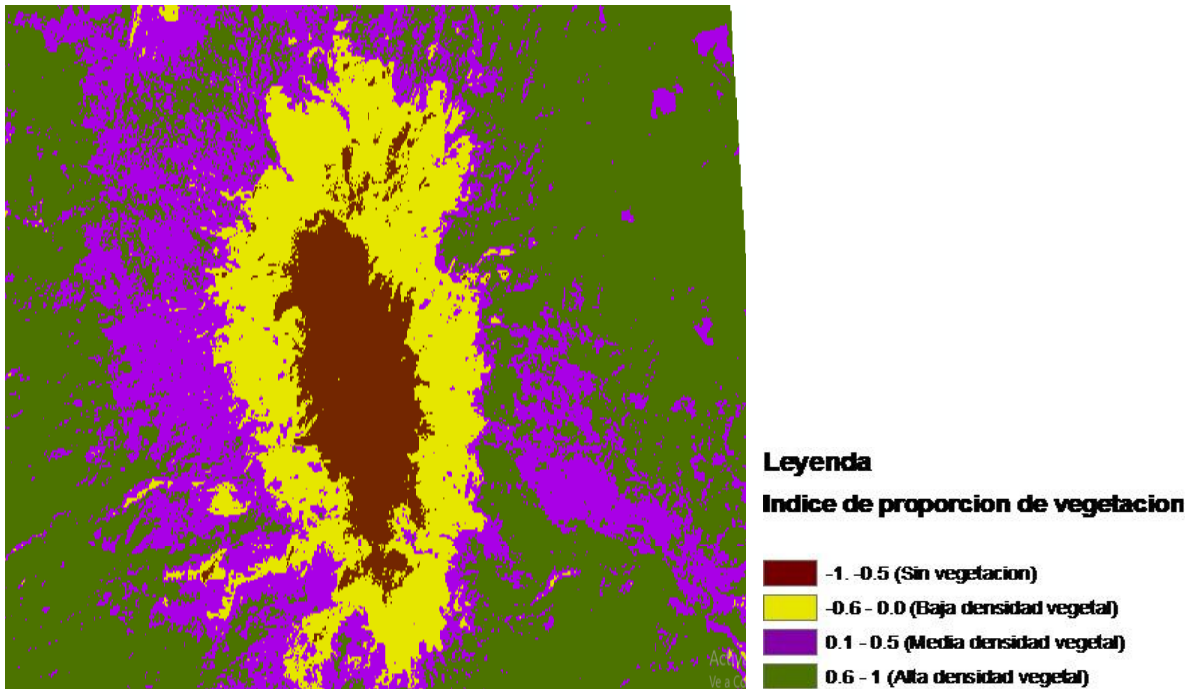


Figura 7: Imagen del promedio del índice RVI del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989.

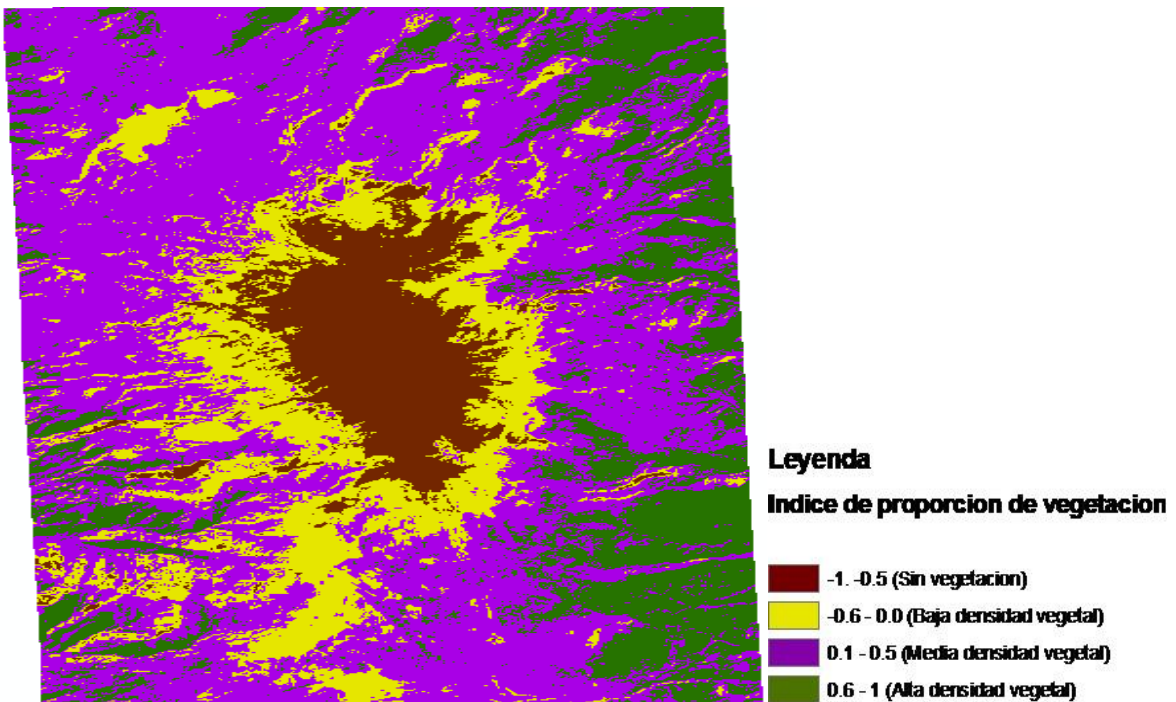


Figura 8: Imagen del promedio del índice RVI del volcán Iztaccíhuatl del periodo 2015-2019.

SAVI

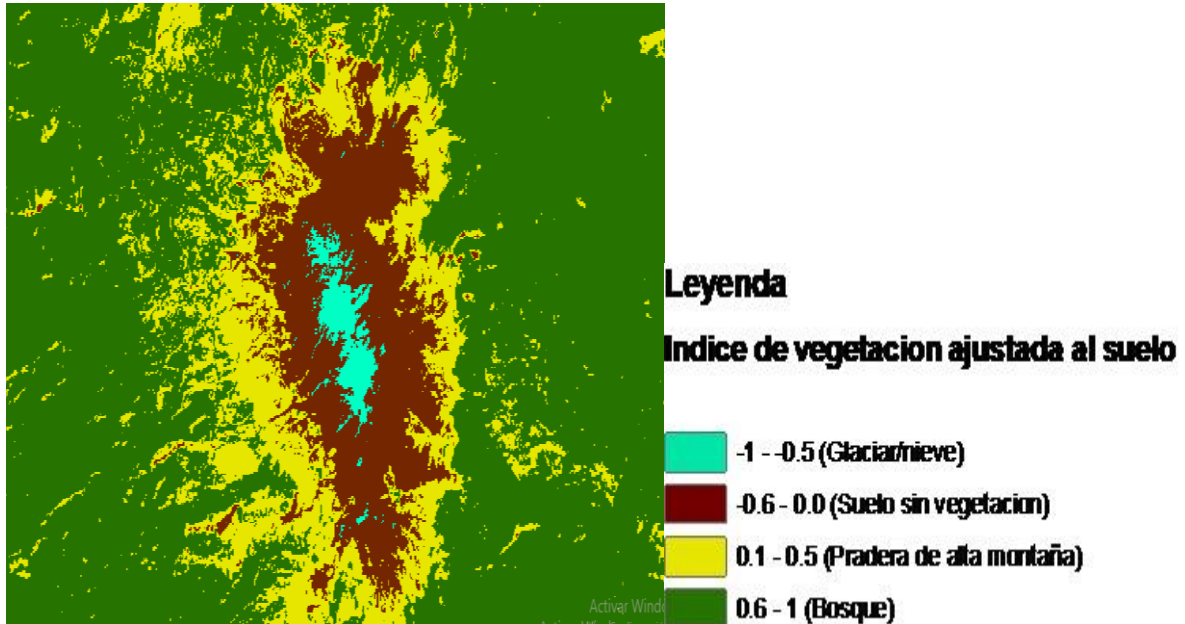


Figura 9: Imagen del promedio del índice SAVI del volcán Iztaccíhuatl del periodo 1985-1989.

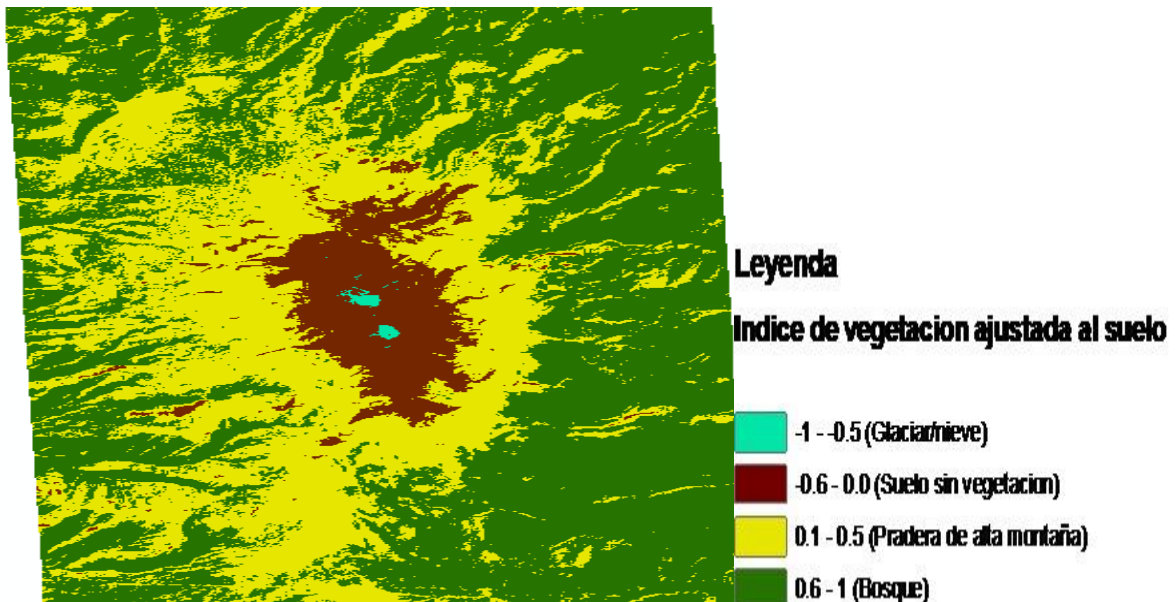


Figura 10: Imagen del promedio del índice SAVI del volcán Iztaccíhuatl del periodo 2015-2019.

MAPA DE CURVAS DE NIVEL DEL VOLCAN IZTACCIHUATL

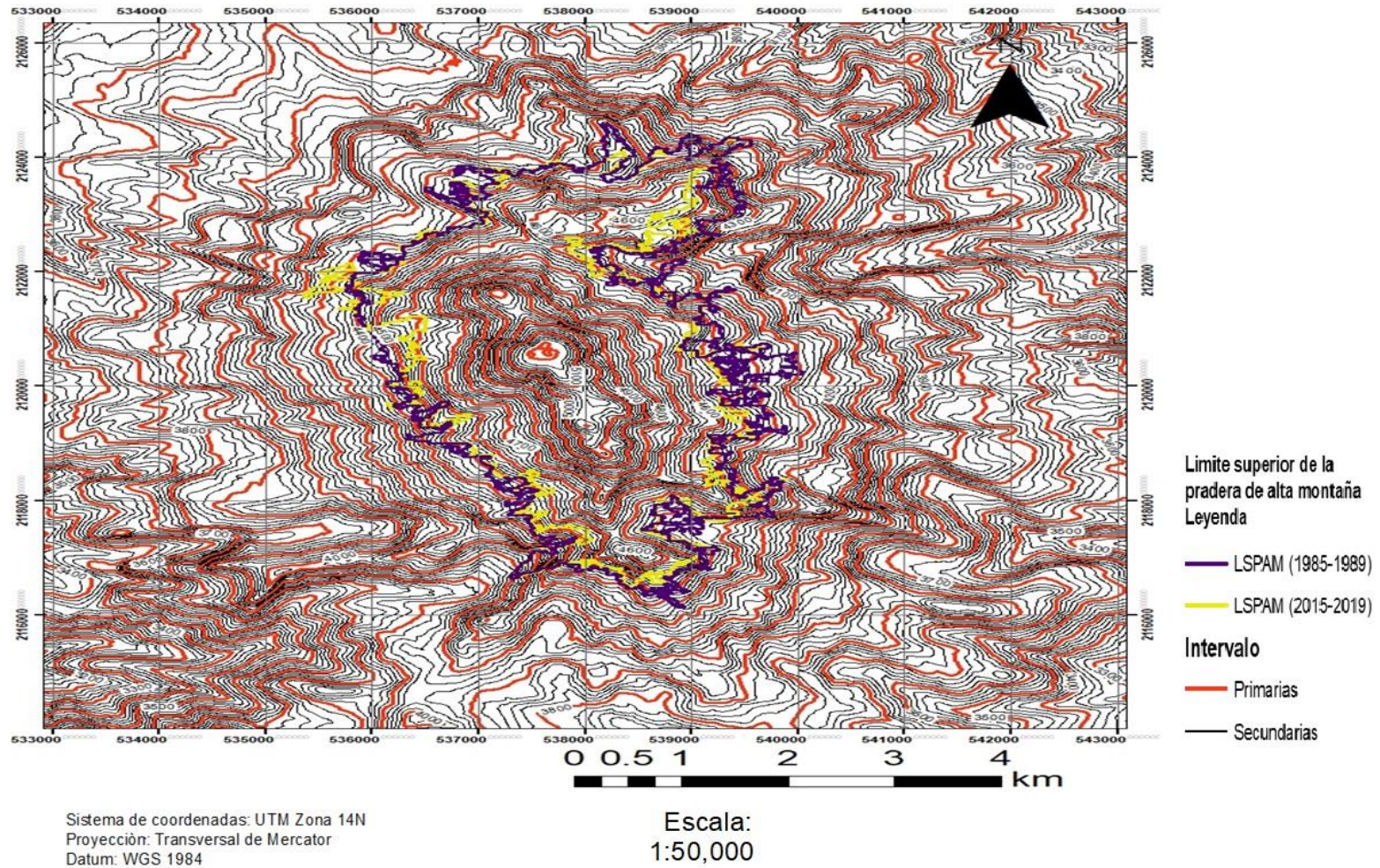


Figura 11: mapa de curvas de nivel del volcán Iztaccíhuatl con el límite superior de la pradera de alta montaña con su respectivo periodo.

MAPA DE RADIACION SOLAR DEL VOLCAN IZTACCIHUATL

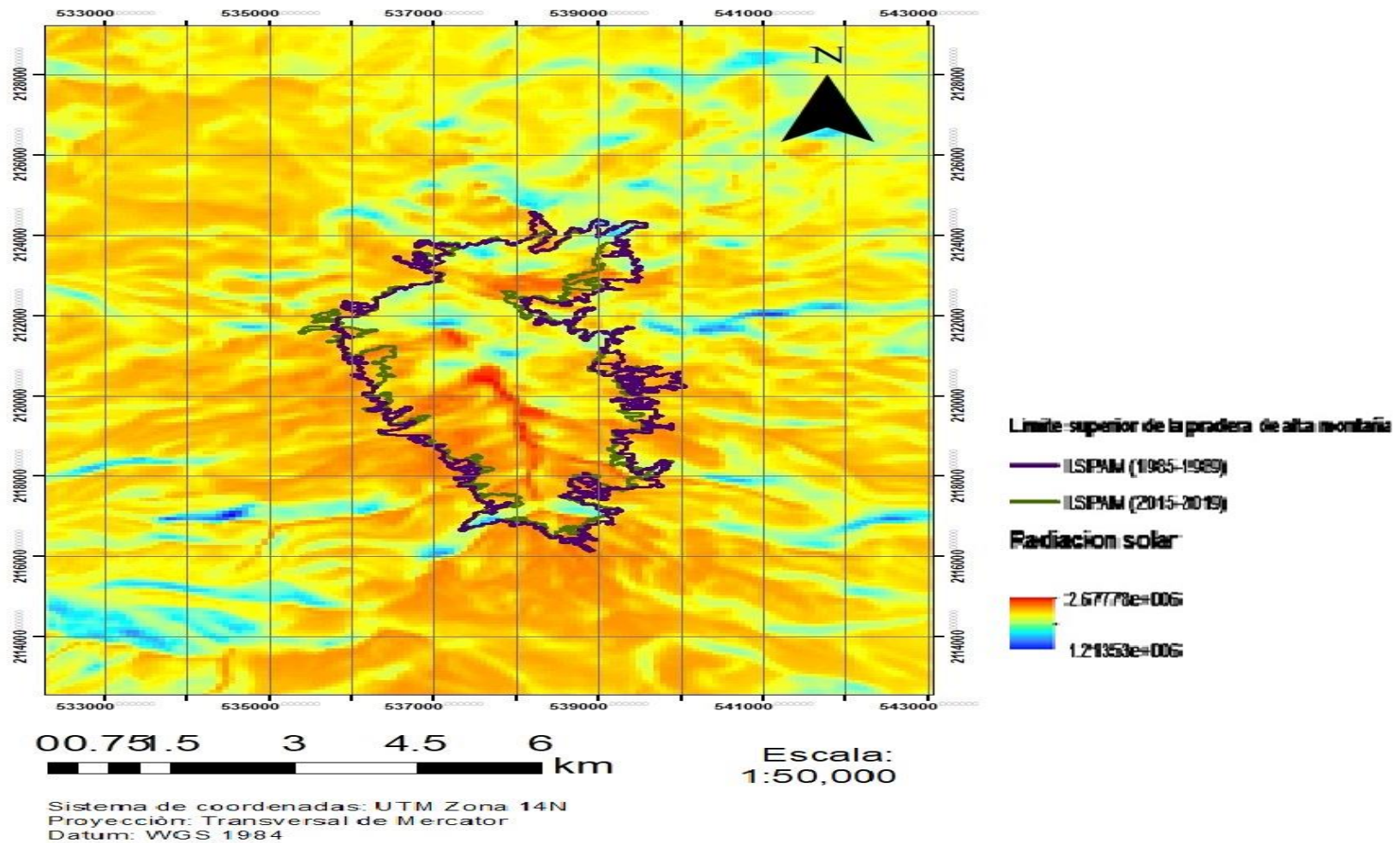


Figura 12: Mapa de radiación solar del volcán Iztaccíhuatl con el límite superior de la pradera de alta montaña con su respectivo periodo.

MAPA DE DIRECCIONES DE FLUJO DEL VOLCAN ÍZTACCIHUATL

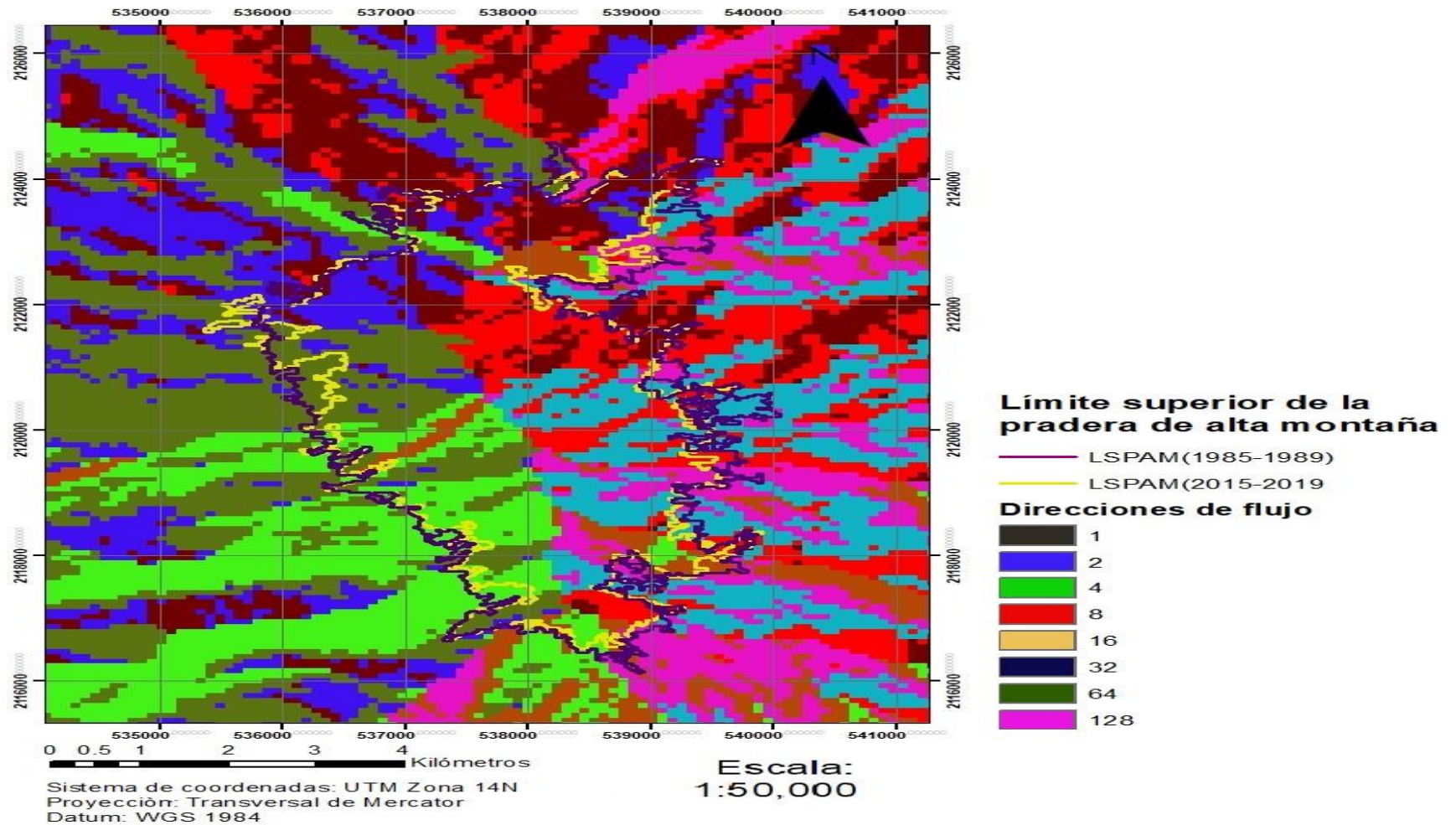


Figura 13: Mapa de direcciones de flujo del volcán Iztaccíhuatl con el límite superior de la pradera de alta montaña con su respectivo periodo.

MAPA DE GEOMETRÍA DEL RELIEVE EN PLANTA

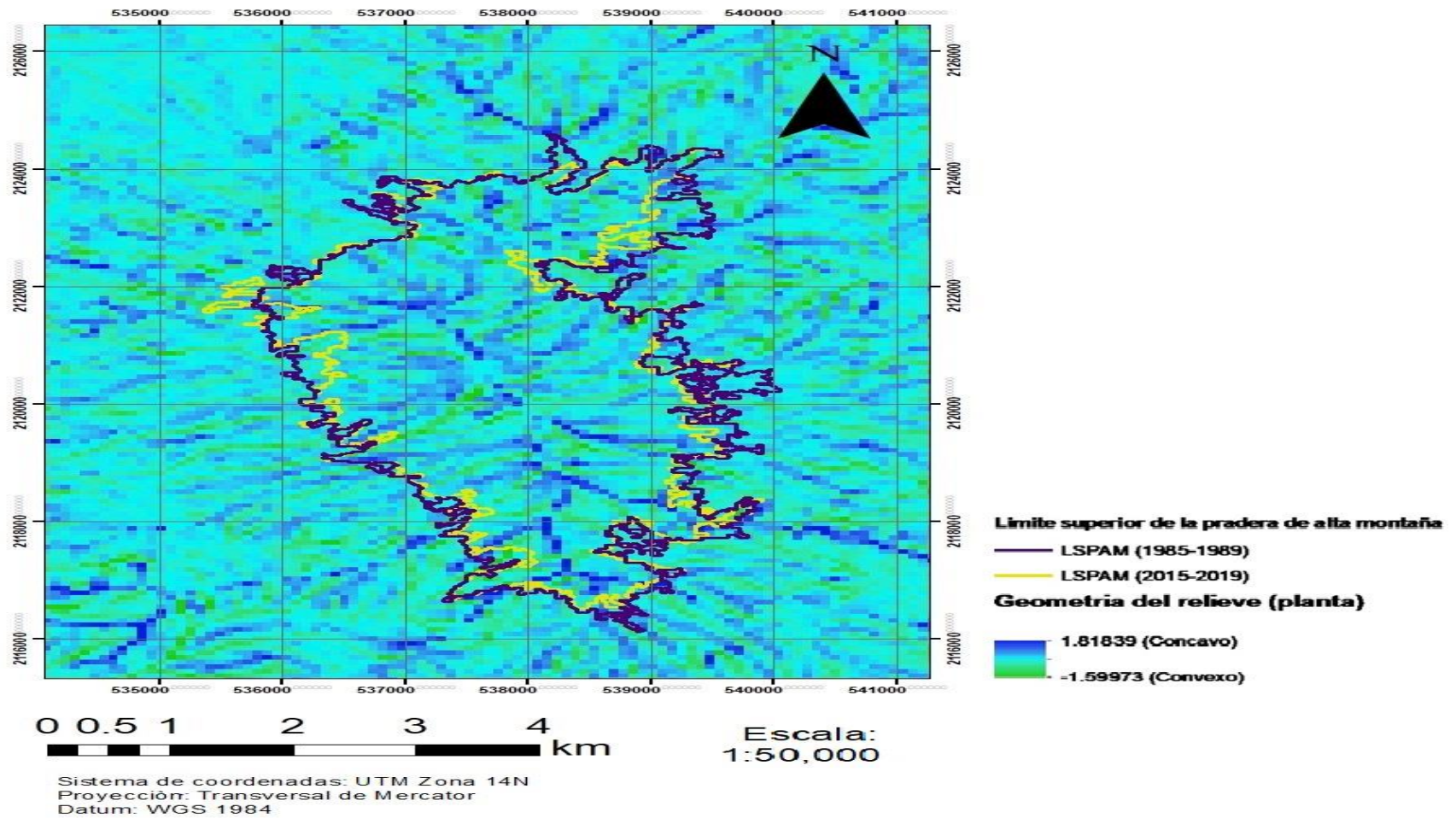


Figura 14: Mapa de geometría del relieve en planta del volcán Iztaccíhuatl con el límite superior de la pradera de alta montaña con su respectivo periodo.

MAPA DE GEOMETRIA DEL RELIEVE EN PERFIL

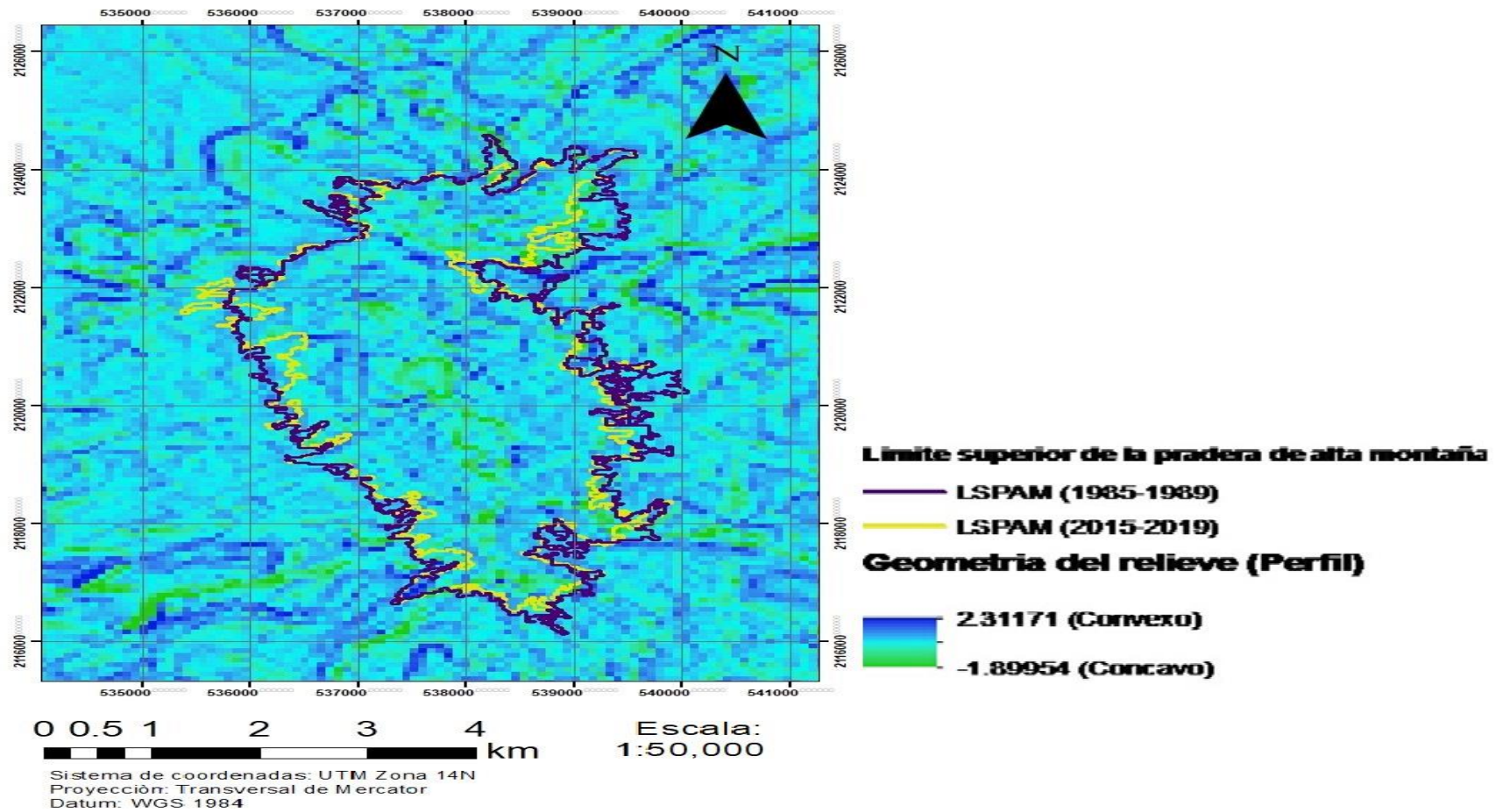


Figura 15: Mapa de geometría del relieve en perfil del volcán Iztaccíhuatl con el límite superior de la pradera de alta montaña con su respectivo periodo.

MAPA DE ORIENTACION DEL VOLCAN IZTACCIHUATL

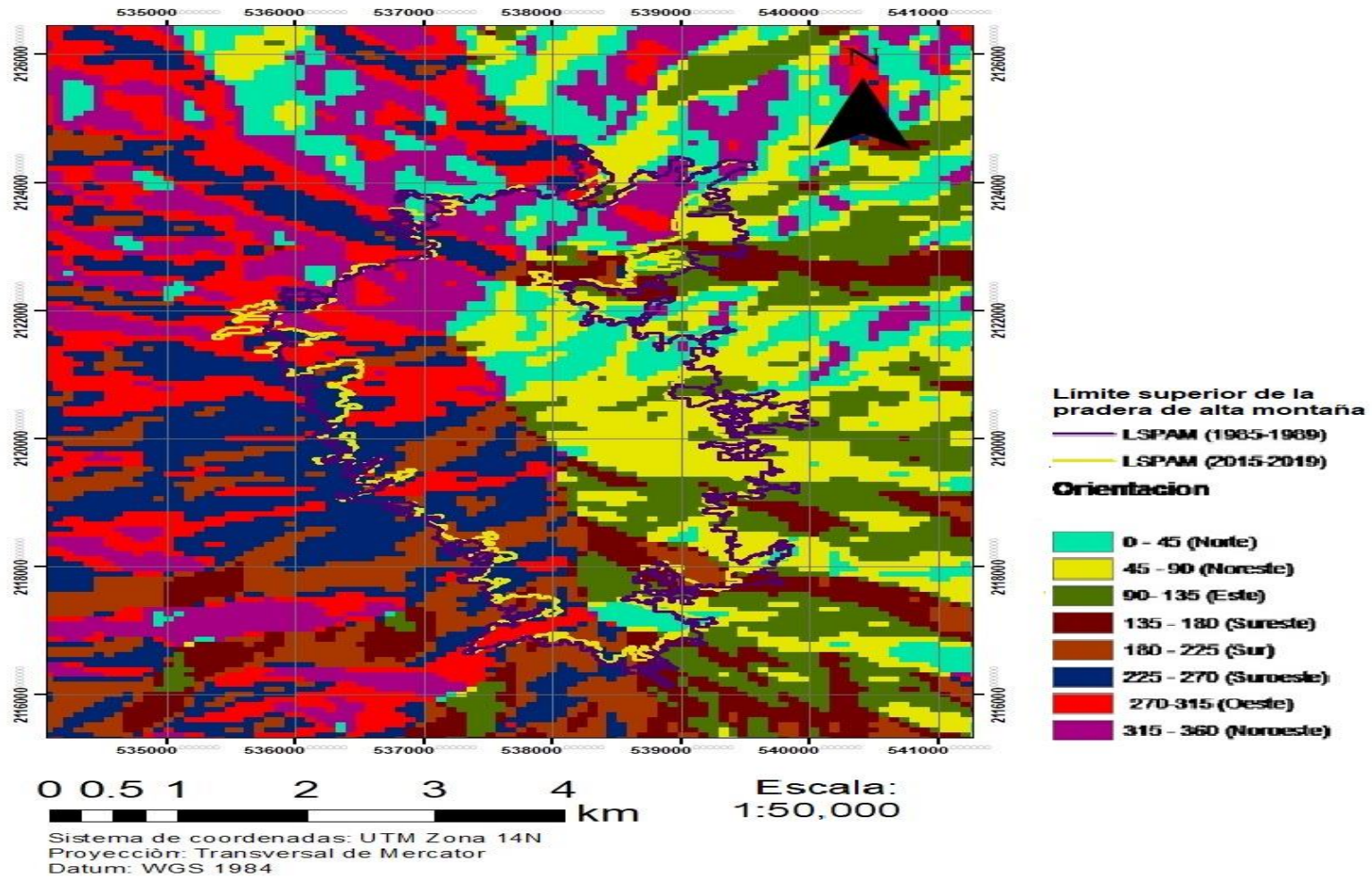


Figura 16: Mapa de orientación del volcán Iztaccíhuatl con el límite superior de la pradera de alta montaña con su respectivo periodo.

MAPA DE PENDIENTES DEL VOLCAN IZTACCIHUATL

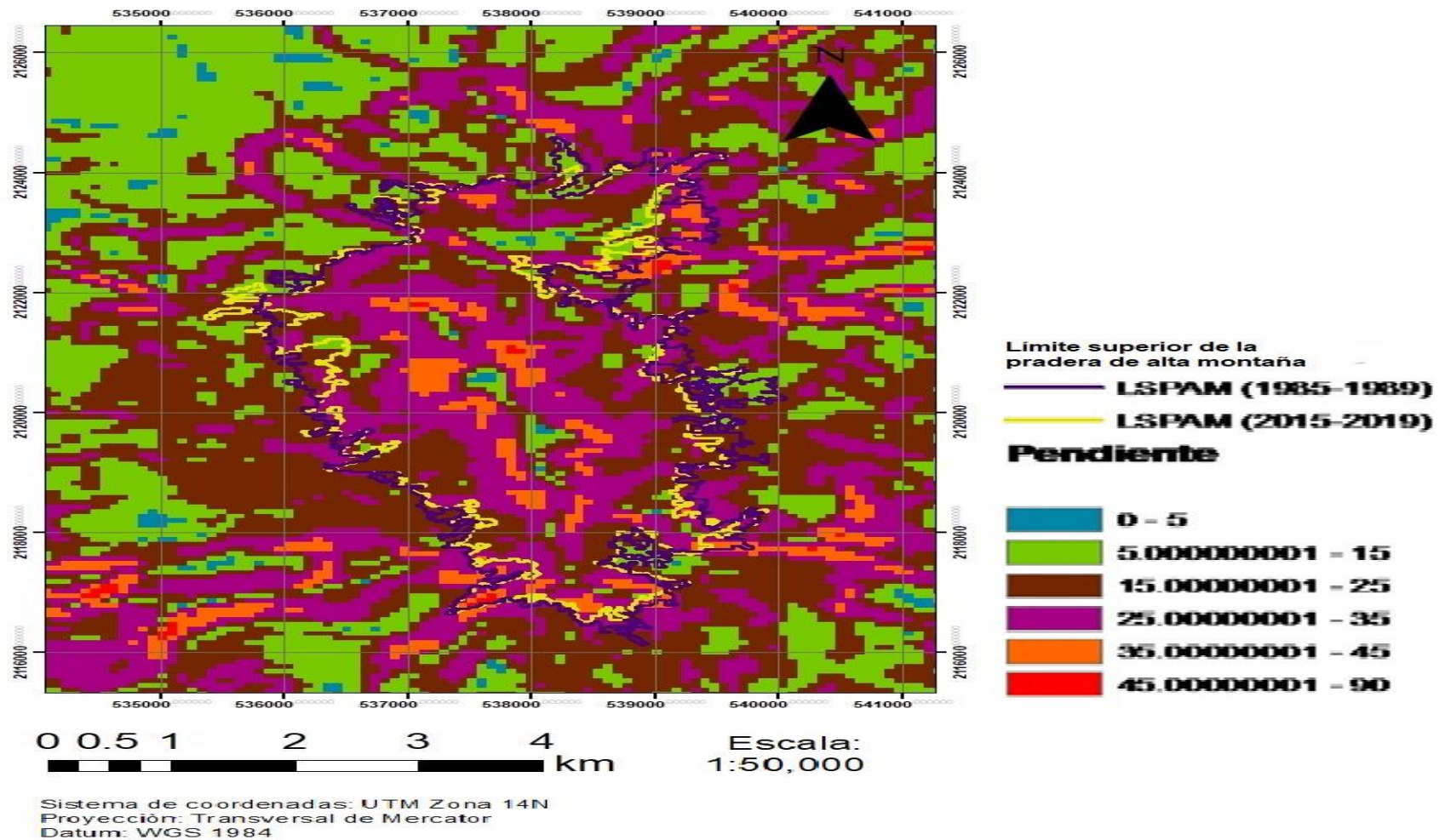


Figura 17: Mapa de pendientes del volcán Iztaccíhuatl con el límite superior de la pradera de alta montaña con su respectivo periodo.

ANEXO B
GEOPROCESOS

Se descargaron las imágenes LANDSAT de la Agencia Espacial Norteamericana (NASA), de la página web: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

De las imágenes que se descargaron fueron de LANDSAT 5, utilizando el sensor TM (Thematic Mapper), y LANDSAT 8 utilizando el sensor OLI, de LANDSAT 5 desde 1985 hasta 1989 y LANDSAT 8 desde el 2015 hasta el 2019.

Estas son las imágenes de Landsat 5 que se descargaron:

1985-1-31

1985-10-30

1986-3-23

1987-12-15

1989-2-3

1989-3-7

Estas son las imágenes de Landsat 8 que se descargaron:

2016_1_21

2016_12_6

2016_2_22

2016_12_22

2017_1_23

2017_11_07

2018_1_10

2018_5_18

2019_1_26

2019_12_15

Después de descargar dichas imágenes se pasó a descomprimirlas para hacer la corrección atmosférica

Esto se hizo en ARGIS 2.2 con la herramienta Landsat 8, primero se seleccionaron las imágenes a trabajar, en una carpeta todas sus bandas en Pan-sharpened composit (Figura 18), donde se agregó el texto de los metadatos, así como un shaphefile del área de trabajo para recortar las bandas de las imágenes de satélite.

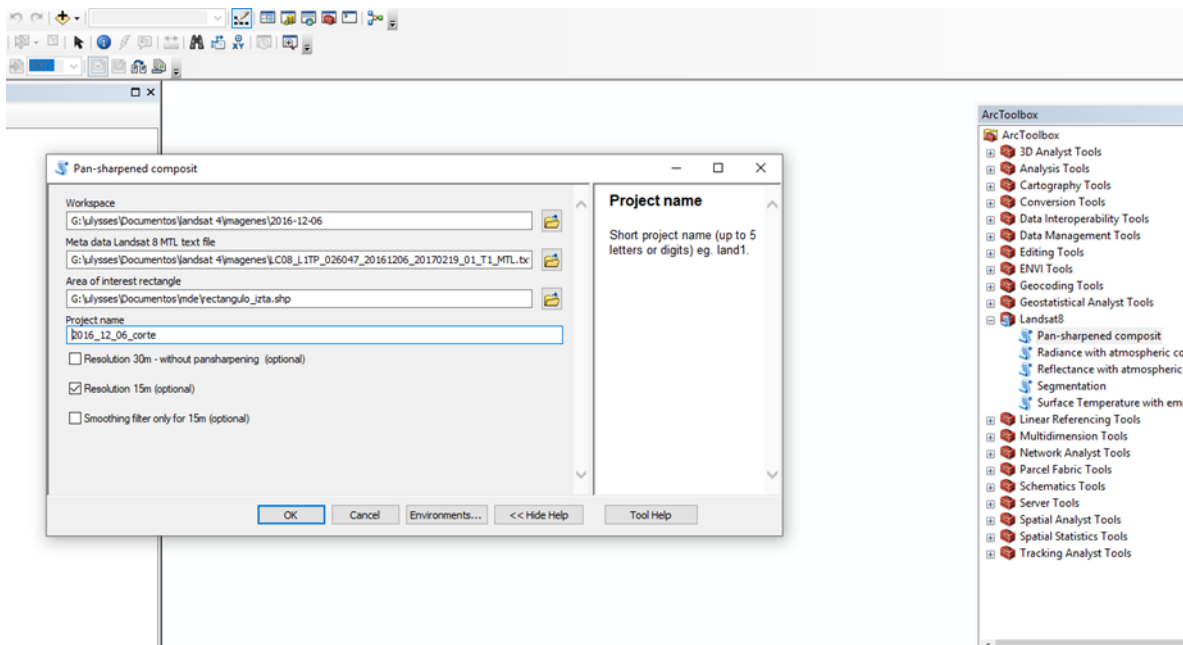


Figura18: Pan-sharpened composit.

Después se obtuvo la radiancia y la corrección atmosférica, dentro de la misma herramienta de landsat 8 (Figura 19).

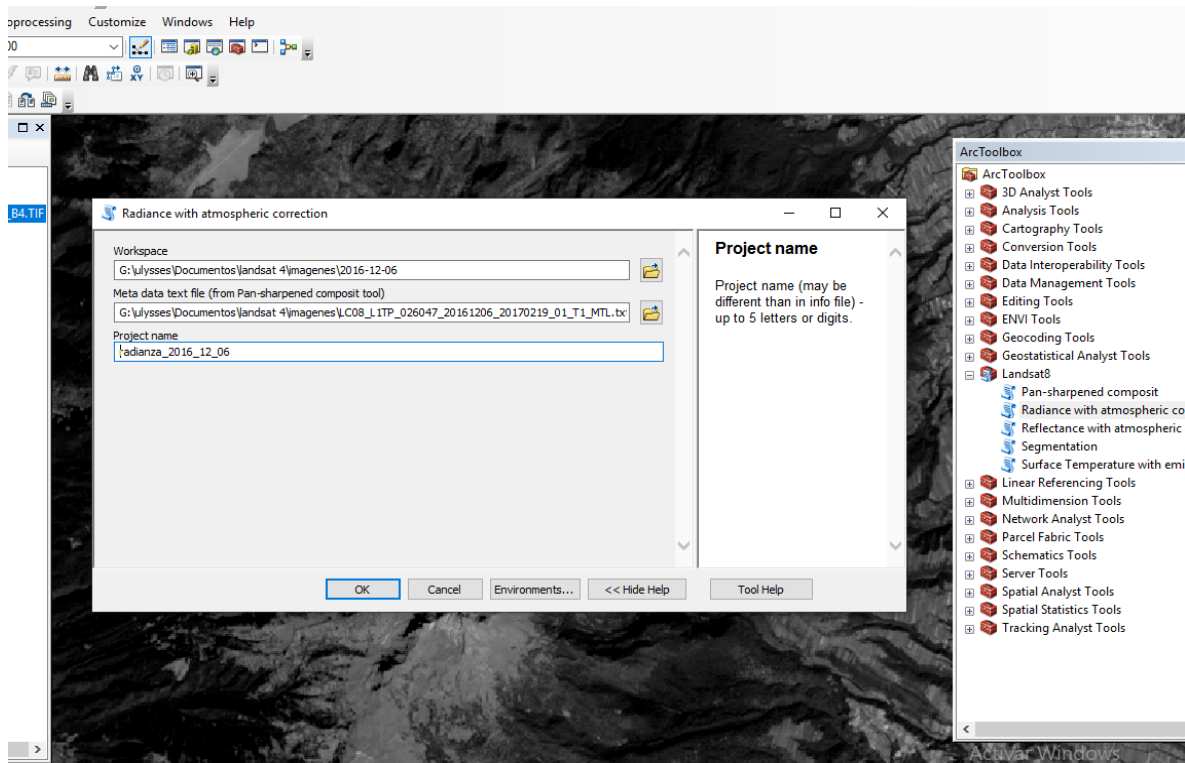


Figura 19: radiancia y corrección atmosférica.

E igualmente para la reflectancia se hizo lo mismo (Figura 20).

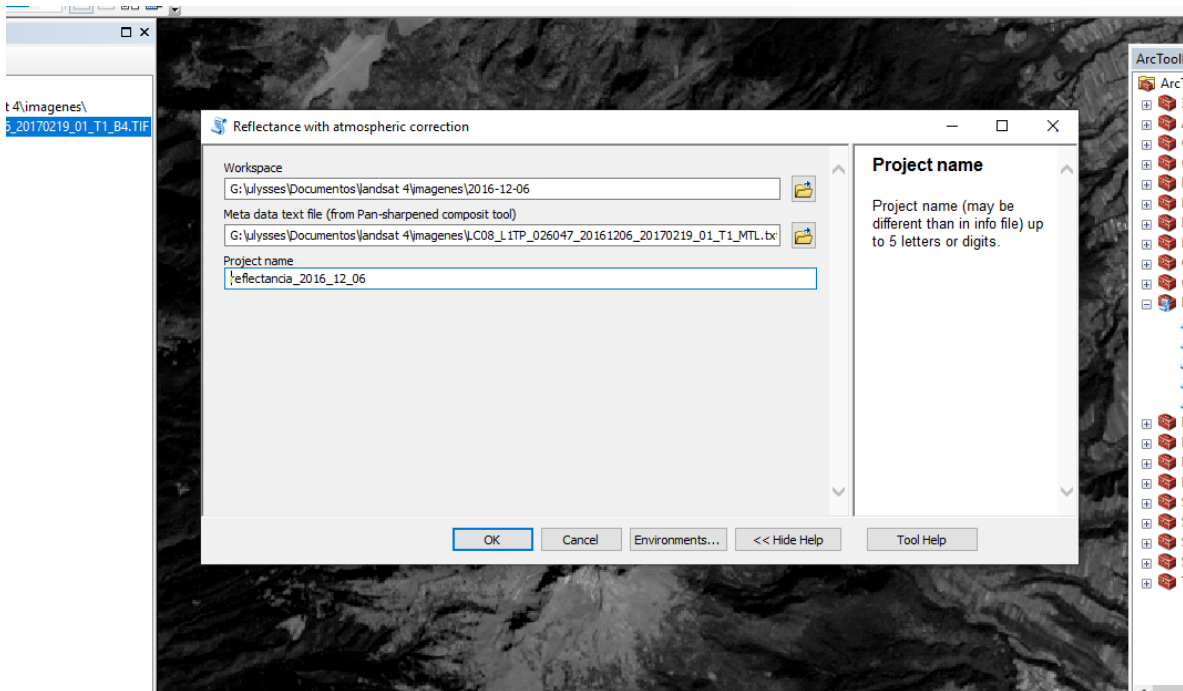


Figura 20: Reflectancia y corrección atmosférica.

Luego se procedió en crear un archivo layer starck de cada una de las imágenes ya descargadas, por lo cual en Landsat 5 se utilizaron las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 6, y para Landsat 8 se utilizaron las bandas 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8.

En el programa ERDAS IMAGINE 2014, en la parte de RASTER se seleccionó la herramienta Spectral y en la opción Layer Starck (Figura 21), fue la que se seleccionó para hacer la combinación de las bandas de las imágenes ya descargadas y corregidas.

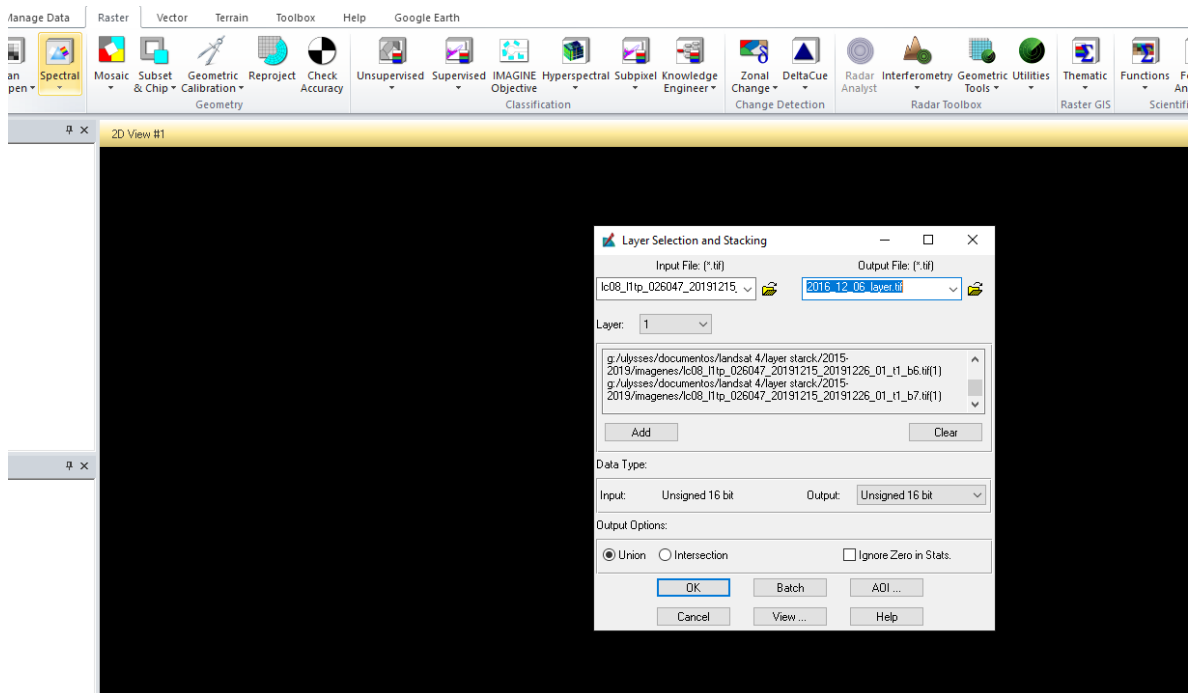


Figura 21: creación de layer starck.

Posteriormente ya creados los layerstarck se procedió a calcular los índices, los cuales fueron los de NDVI, NDMI, RVI, SAVI y RDVI, en el programa ERDAS IMAGINE 2014.

Por ello en dicho programa en la parte de RASTER, se seleccionó la opción de unsupervised, después la herramienta índices, ya ahí en el input se selecciona el layer starck a utilizar, se selecciona el sensor que se va a utilizar, después selecciona el índice a trabajar, así como asegurarse que las bandas que se seleccionaron sean las correctas y por último se le da la carpeta de salida para guardar la imagen con su índice ya calculado (Figura 22).

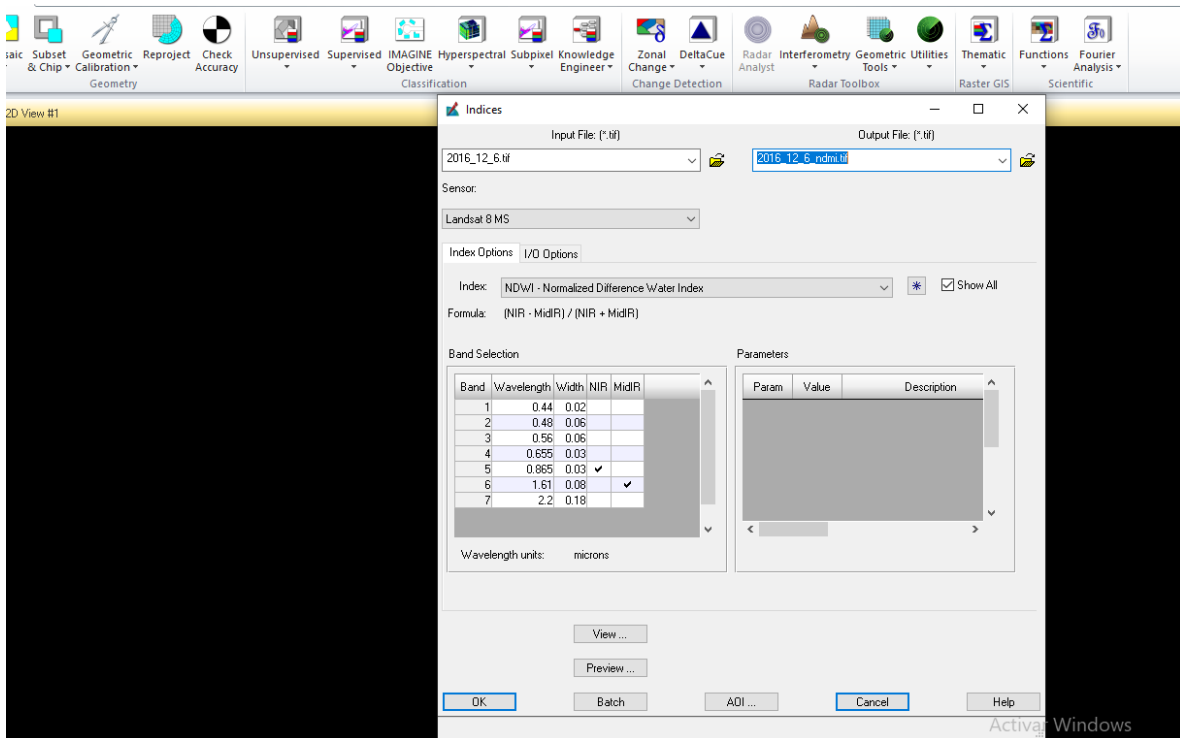


Figura 22: cálculo de índices.

Ya calculados dichos índices se procedió a obtener el promedio de cada índice con su respectivo periodo de tiempo, por lo cual se hicieron compuestos, esto se realizó en el programa ERDAS IMAGINE 2014.

Donde se fue a la parte de toolbox, después se seleccionó model marker y se volvió a seleccionar model marker, para hacer los compuestos.

Ya en model marker se procedió a hacer los inputs, los cuales fueron las imágenes con sus índices ya calculados respectivamente de un determinado periodo, y el geoproceso que se utilizó fue ANALYSIS, o sea el de obtener el promedio seleccionando la opción MEAN (Figura 23).

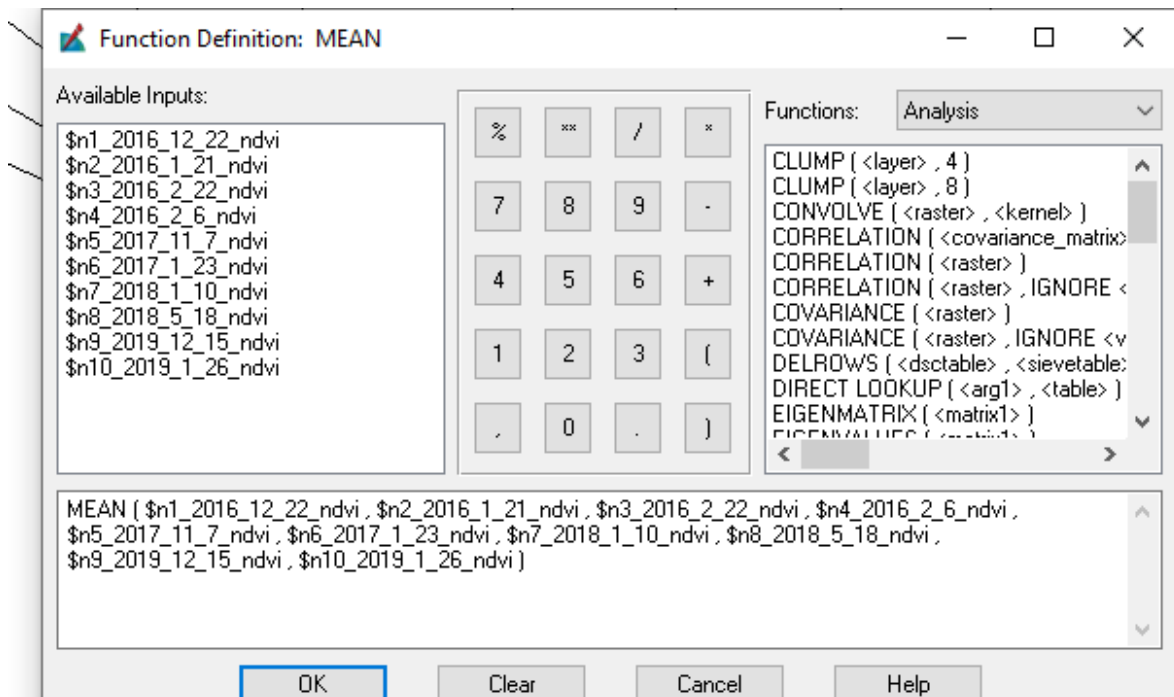


Figura 23: Geoproceso en model marker.

Después se Creó el output en donde sirvió para obtener el promedio de cada índice de un determinado periodo, con eso ya estaba el modelo de cada compuesto (Figura 24).

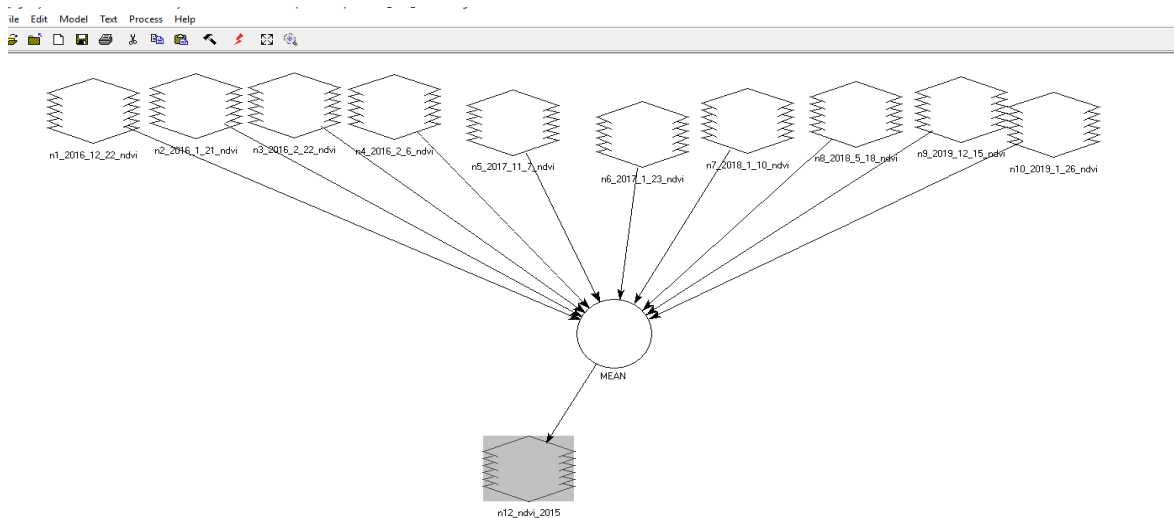


Figura 24: modelo del promedio del NDVI, periodo 2015-2019.

Después de digitalizar los mapas de ambos periodos de tiempo se obtuvo el área de todos los polígonos del grupo suelo sin vegetación esto fue en la tabla de atributos en donde el field para hacer la sumatoria total fue FID_izta_s, en donde se le pidió calcular dicha área en kilómetros (Figura 25).

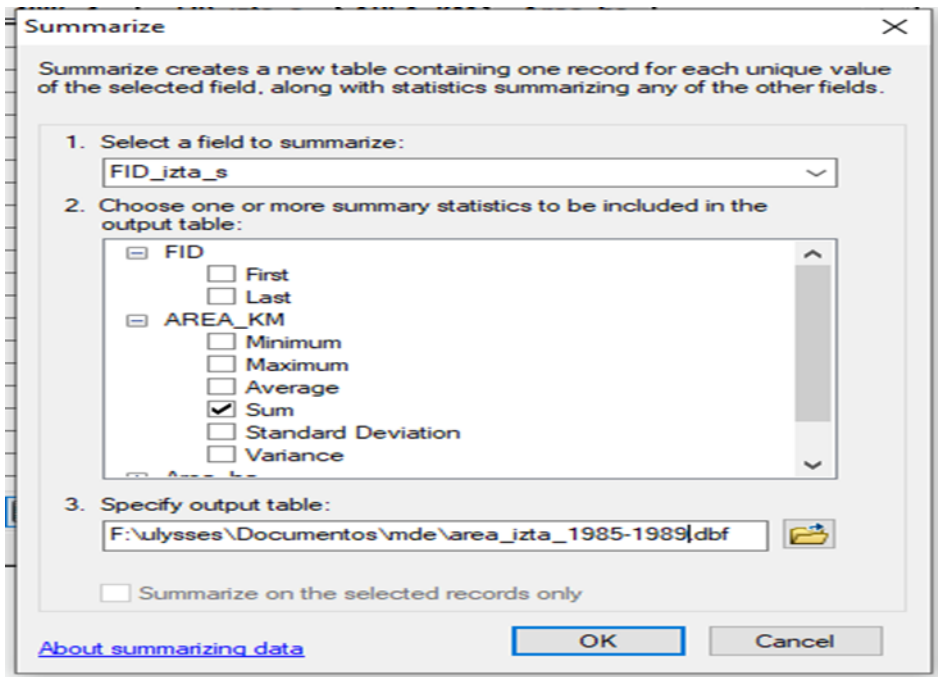


Figura 25: herramienta summarize de la tabla de atributos del periodo 1985-1989.

Para obtener las áreas de la matriz del cambio de suelo sin vegetación a pradera de alta montaña y de pradera de alta montaña a suelo sin vegetación, se abrió la tabla de atributos del shaphile matriz_de_cambio y se utilizó la herramienta summarize, en donde el field para hacer la sumatoria total fue área_cambi, en donde se le pidió calcular dicha área en kilómetros (Figura 26).

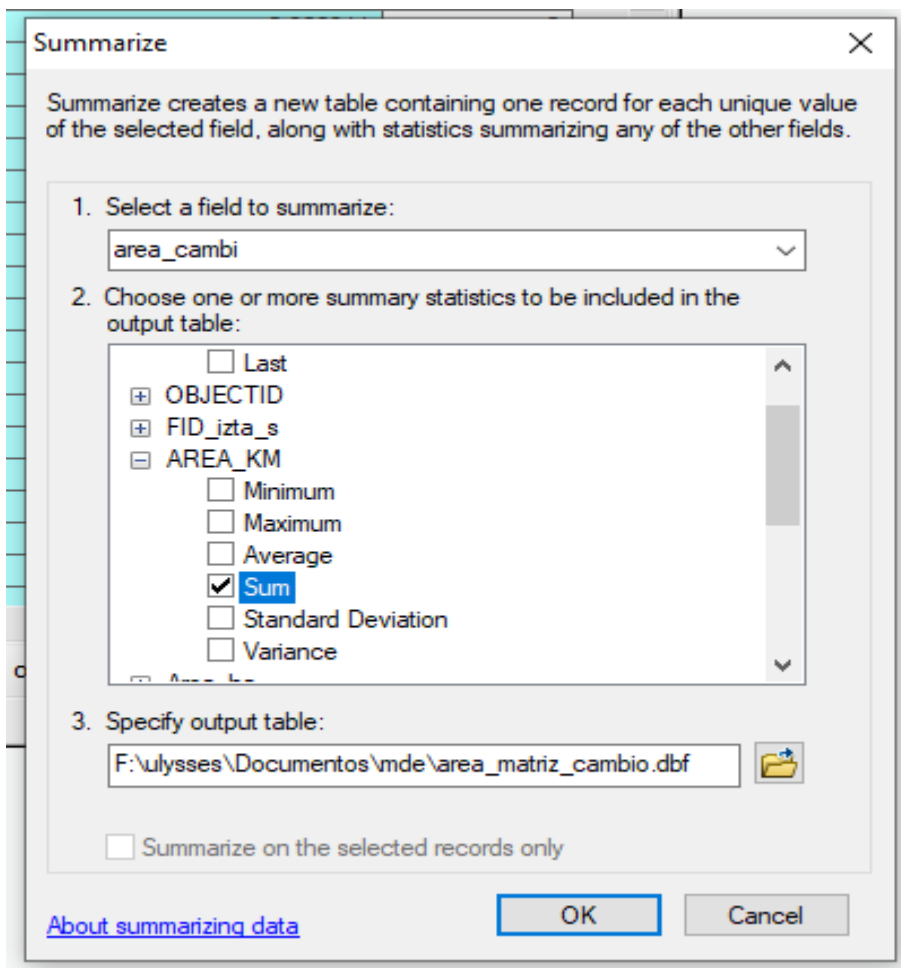


Figura 26: herramienta summarize de la tabla de atributos de la matriz de cambio.