



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS  
COLEGIO DE GEOGRAFÍA**

**CAMBIOS RECIENTES EN EL LÍMITE  
SUPERIOR DEL BOSQUE DEL VOLCÁN  
POPOCATÉPETL**

**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE:  
LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

PRESENTA:

**ALEJANDRA FRANCO CORONA**

DIRECTOR DE TESIS:

**DR. LORENZO VÁZQUEZ SELEM**



Ciudad Universitaria, México D.F., 2015



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.

*Para mi estrella que brilla en el cielo*

*Aunque no estás en presencia pero sí en esencia, esto va por ti, mi  
segunda madre Gabi.*

## ***Dedicatoria***

Para la persona que más admiro en la vida, mi fuente de inspiración, mi madre, gracias por todo el apoyo que me has brindado en mi vida académica y personal, por nunca dudar de mí, por enseñarme que todo lo que empezaba no sólo debía terminarlo, sino hacerlo bien, este logro es tuyo, gracias mami.

A mi hermana Fer, porque por ti es mi esfuerzo diario, gracias por todo tu apoyo, compañía, consejos, paciencia y por complementar mi vida. Al Pibe, hermano, aún en la distancia estás presente, por tus palabras, regaños y por tu apoyo, gracias. A Magui, mi hermana adquirida en la vida, gracias por tus palabras de aliento que me ayudan siempre.

A mi querida Hana, ya que en ti ví el ímpetu por salir adelante pese a los peores panoramas en los que nos coloca la vida, un gran ejemplo a seguir, gracias por representar eso en mi vida. A mis prim@s, Lety, Cecy y Carlos por estar siempre presentes, porque por ustedes uno se motiva a salir adelante día a día, gracias por esa perseverancia que siempre demuestran. A los más pequeños: Liz, Kary, Lalito, Fercho, Andy, Gaby y Jaz, por ustedes me esfuerzo en ser el mejor de los ejemplos.

A toda la familia, y al pilar de ésta, don Juan, por ser un ejemplo de vida y por tener siempre la mejor anécdota que contar mismas que han sido un motivo para continuar y seguir sobresaliendo en la vida. A mis tías Lulu, Rosi e Isa de quienes he recibido siempre cariño y apoyo. A mi tío Nico, gracias por sus consejos tan acertados, por aquellas pláticas vespertinas que me permitieron tomar mejores decisiones en mi vida, espero no defraudarlos.

A mis compañeros y amigos de la Licenciatura de quienes tengo el mejor de los recuerdos, en especial a Estef, mi amiga, hermana y confidente, por atreverse a tomar junto conmigo un camino diferente de la Geografía. A Adri, Diana y Jezie, por ser más que amigas, por estar presentes en los buenos y no tan buenos momentos. A Sandy (niña buena) aunque tu rumbo fue otro siempre estás. A Luis por ayudarme en lo más mínimo. Gracias chicos por alentarme a continuar siempre, por su apoyo, cariño y porque con ustedes la estancia durante la carrera fue más amena y divertida.

A las personas que más que amigos han sido como hermanos y a pesar de las circunstancias y el tiempo siguen estando presentes de una u otra manera: Laura, Liliana, Rox, Pau y Omar .

A todos y cada uno de ustedes gracias por su cariño, y apoyo, pero sobre todo por creer en mí e impulsarme a seguir siempre adelante, los quiero, aprecio y.

Este logro es una muestra de que por muy difícil y complicado que parezca se puede salir adelante y nos podemos poner de pie nuevamente, gracias vida!!!

## ***Agradecimientos***

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por permitirme la oportunidad y el orgullo de pertenecer a esta máxima casa de estudios desde mi formación a nivel medio superior, en mi paso (aunque pequeño) por la FES-Zaragoza, y por finalmente haberme formado como geógrafa.

A la Dra. Lety Gómez, porque por usted conocí a quien fue mi asesor de tesis. Gracias por revisar mi trabajo y por estar al tanto de éste, por sus observaciones y comentarios, mismos que han permitido mejorarlo.

A la Dra. Rebeca Granados y al Dr. Arturo García Romero, por su calidez y gentileza, por sus observaciones y comentarios que mejoraron el contenido de la tesis.

Al Mtro. Pedro Montes gracias por aceptar ser parte del sínodo, y por enseñarme el campo de conocimiento de la Geomorfología aplicada además porque en tus clases pude tener un primer acercamiento a la dendrocronología.

Muy en especial quiero agradecer al Dr. Lorenzo Vázquez, asesor de esta tesis, por todo el apoyo que me ha brindado desde que lo conocí, por sus enseñanzas, por su paciencia infinita, por su generosidad, calidad humana y por confiar en mí. Sin sus observaciones y ayuda, este trabajo no estaría materializado, gracias Dr.!!!

A las personas que se tomaron la molestia de ayudarme y resolver mis dudas por más pequeñas que éstas fueran, a Carla Torres, a Quique, a mis compañeros del cubículo, Osvaldo Franco y Gonzalo, gracias. A Osvaldo por haberme transmitido sus conocimientos en dendrocronología y por hacer que me interese cada vez más en esta técnica.

A la beca que me fue otorgada por parte del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT) de la UNAM, dentro del proyecto: *Evolución de los ambientes de montaña del centro de México durante el Holoceno con base en registros geomorfológicos, dendrocronológicos y paleoecológicos* con clave de registro IN105213 de la cual fui beneficiaria durante la elaboración de esta tesis.

Finalmente agradezco al Colegio de Geografía y a su planta docente que me forjaron como geógrafa, por sus enseñanzas y aprendizajes adquiridos y al Instituto de Geografía por tener un espacio de trabajo para mí en donde pude desarrollar la tesis.

## ÍNDICE

<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo I. Marco conceptual y antecedentes del Límite Superior del Bosque</b> .....	5
1.1. Definición .....	6
1.2. Desarrollo de los estudios sobre el Límite superior del Bosque .....	11
1.3. Estudios sobre el LSB en México.....	13
1.4. La actividad volcánica como modeladora del LSB .....	17
1.5. Peligros volcánicos asociados a la vegetación.....	22
<b>Capítulo II. Aspectos Físico- Geográficos del volcán Popocatepetl</b> .....	28
2.1. Localización .....	28
2.2. Geología .....	29
2.3. Geomorfología .....	31
2.4. Vegetación .....	32
2.5. Clima .....	36
2.6. Suelo.....	41
<b>Capítulo III. Trazado del Límite Superior del Bosque</b> .....	46
3.1 Trazado de límites.....	46
3.2 Variables biofísicas, extracción de valores .....	53
Modelo Digital de Elevaciones (MDE).....	53
Capa de orientación (Aspect) .....	53
Capa de Pendientes (Slope) .....	54
Capa de geometría del relieve (Curvature).....	55
Capa de radiación solar .....	55
Capa de acumulación del flujo .....	56
Capa de temperaturas.....	57
Capa de tipo de suelos .....	62
3.3 Segmentos del LSB y extracción de valores para cada límite.....	62

3.4 Análisis estadístico aplicado al Límite Superior del Bosque del Popocatepetl.....	64
3.5 Dendrocronología .....	66
<b>Capítulo IV. Resultados y discusión.....</b>	<b>68</b>
4.1. Cambios recientes en el LSB, 1955 a 2014 .....	68
4.1.1. Cambios en el <i>Timberline</i> y en el <i>Treeline</i> .....	68
4.1.2. Cambios en el <i>Tree species line</i> .....	72
4.2. Relación de la altitud con diversas variables biofísicas .....	73
4.3. La temperatura como variable que incide en el LSB .....	76
4.4. Diferencias entre segmentos del <i>Timberline</i> y <i>Treeline</i> de 1955 .....	79
4.5. Diferencias entre segmentos del <i>Timberline</i> y <i>Treeline</i> de 1995-1999 .....	83
4.6. Diferencias entre segmentos del <i>Timberline</i> y <i>Treeline</i> de 2014 .....	86
4.7. Segmentos del LSB con cambios altitudinales de importancia de 1955 a 2014 .....	89
4.7.1. Segmentos con cambios en el <i>Timberline</i> y <i>Treeline</i> de 1955 a 2014 .....	89
4.7.2. Segmentos con cambios en el <i>Timberline</i> y <i>Treeline</i> de 1955 a 1995-1999 .....	91
4.7.3. Segmentos con cambios en el <i>Timberline</i> y <i>Treeline</i> de 1995-1999 a 2014 .....	92
4.8. Dendrocronología y observaciones de campo .....	93
4.9. La dinámica volcánica como modeladora del Límite Superior del Bosque .....	98
4.10. El LSB de un volcán activo respecto a uno inactivo .....	101
<b>Conclusiones .....</b>	<b>104</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>109</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>113</b>
Anexo A (Mapas)	
Anexo B (Pruebas estadísticas)	

## ÍNDICE DE TABLAS Y FIGURAS

### Introducción

Figura 1 Imagen en donde se observa la posición del <i>Treeline</i> global de acuerdo a su latitud.....	2
---	---

### Capítulo I. Marco conceptual y antecedentes del Límite Superior del Bosque

Figura 1. 1 Imagen que ilustra el LSB y su distribución.....	7
Figura 1. 2 <b>A.</b> Trazo del LSB en una imagen de Google Earth de abril de 2014 del volcán Popocatepetl. <b>B.</b> Representación de los límites considerados en el trabajo.....	10
Figura 1. 3 Representación de Humboldt y Bondpland en donde se observa los pisos de vegetación a nivel mundial.....	11
Tabla 1. 1 Resumen de los impactos de los peligros volcánicos en la vegetación.....	23

### Capítulo II. Aspectos Físico- Geográficos del volcán Popocatepetl

Figura 2. 1 Localización del volcán Popocatepetl en pequeña y gran escala.....	28
Figura 2. 2 Perfil de las comunidades vegetales de la Sierra Nevada.....	33
Figura 2. 3 <b>A.</b> Imagen de las fotografías aéreas en donde aún se observa un área considerable de glaciación. <b>B.</b> Mosaico de ortofotos. La comparación entre imágenes muestra un área cubierta por hielo glaciación y nieve entre 1955 1995-1999.....	40
Figura 2. 4 Mapa de tipo de suelos del volcán Popocatepetl.....	44

### Capítulo III. Trazado del Límite Superior del Bosque

Figura 3. 1 Esquema de las fases de investigación de la tesis.....	47
Figura 3. 2 Mosaico con las fotografías aéreas de 1955.....	50
Figura 3. 3 Mosaico con las ortofotos del período de 1995-1999.....	51
Figura 3. 4 LSB en imágenes satelitales de Google Earth de abril de 2014.....	52
Tabla 3. 1 Estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio.....	58
Tabla 3. 2 Temperaturas promedio obtenidas.....	59



Figura 3.5 Gráfica de regresión lineal del promedio de temperatura histórica respecto a la altitud.....	60
Figura 3. 6 Imagen de Google Earth con los 14 segmentos del LSB.....	63
Figura 3.7 Imagen de la localización de los pinos muestreados en campo.....	67

#### **Capítulo IV. Resultados y discusión**

Tabla 4. 1 Estadísticos descriptivos de cada LSB.....	68
Figura 4. 1 Gráfica de la Altitud media del <i>Timberline</i> y <i>Treeline</i> .....	69
Tabla 4. 2 Prueba ANOVA del <i>Timberline</i> de las tres fechas.....	70
Figura 4. 2 Gráfica de Altitud media del <i>Timberline</i> .....	71
Figura 4. 3 Gráfica de la Altitud media del <i>Treeline</i> .....	72
Tabla 4. 3 Estadísticos descriptivos del <i>Tree species line</i> .....	73
Tabla 4. 4 Tabla resumida de correlaciones entre variables de cada LSB por fecha.....	74
Figura 4. 4 Gráfica de la temperatura promedio anual de Amecameca de Juárez.....	77
Figura 4.5 Gráfica de la temperatura promedio anual de Alponocan.....	77
Tabla 4. 5 Prueba ANOVA por segmento del <i>Timberline</i> de 1955.....	80
Tabla 4. 6 Prueba ANOVA por segmento del <i>Treeline</i> de 1955.....	81
Figura 4. 6 Mosaico de fotografías aéreas con los segmentos del LSB de 1955.....	82
Tabla 4. 7 Prueba ANOVA por segmento del <i>Timberline</i> de 1995-1999.....	83
Tabla 4.8 Prueba ANOVA por segmento del <i>Treeline</i> de 1995-1999.....	84
Figura 4. 7 Imagen de las ortofotos digitales de INEGI con los segmentos del LSB de 1995-1999.....	85
Tabla 4. 9 Prueba ANOVA por segmento del <i>Timberline</i> de 2014.....	86
Tabla 4. 10 Prueba ANOVA por segmento del <i>Treeline</i> de 2014.....	87
Figura 4. 8. Imagen de Google Earth con el LSB de 2014 y sus segmentos.....	88
Tabla 4. 11 Comparación de los cambios altitudinales del <i>Timberline</i> y del <i>Treeline</i> de 1955 a 2014.....	90
Tabla 4. 12 Comparación del <i>Timberline</i> y <i>Treeline</i> de 1955 a 1995-1999.....	91

Tabla 4. 13 Cambios altitudinales del <i>Timberline</i> y del <i>Treeline</i> de 1995-1999 a 2014.....	92
Figura 4. 9 Fotografía de los pinos más jóvenes encontrados en la barranca de Tenenepanco-Huiloac.....	94
Figura 4.10 Manchón de pinos muestreados en la barranca de Tenenepanco-Huiloac.....	95
Tabla 4. 14 Localización de las muestras y edad de cada individuo de <i>Pinus hartwegii</i> .....	95
Figura 4. 11 Perfil a través de la barranca de Tenenepaco.....	96
Tabla 4. 15 Edad de los individuos muestreados cerca del refugio Tlamacas.....	96
Figura 4. 12 Fotografía del pino a mayor altitud muestreado.....	97
Figura 4. 13 Comparación del LSB de una fotografía del s. XIX y 2014.....	98

## INTRODUCCIÓN

El Límite Superior del Bosque (LSB) en las altas montañas es un fenómeno global que ha sido objeto de estudio mucho antes del siglo XX, ya que los cambios en su posición varía latitudinalmente en relación con diversos factores regionales entre ellos el climático, en especial la temperatura, por lo que es considerado un límite ecológico natural (Figura 1).

La temperatura como fenómeno global y su relación con la posición del LSB ha sido analizada en el mundo en el último medio siglo (Beaman, 1962; Lauer y Klaus, 1975; Körner, 1998; Körner y Paulsen, 2004; Körner, 2012). Se ha prestado especial atención al ascenso que ésta presenta como consecuencia del cambio climático, fenómeno que incide no sólo en el retroceso de la línea de las nieves, sino también en la posición y dinámica del *Timberline* (Límite Superior del Bosque más o menos cerrado) y del *Treeline* (Límite Superior de los Árboles) límites que conforman el Límite Superior del Bosque (LSB), objeto de estudio de este trabajo.

Sin embargo, hay otros factores que también determinan la posición del LSB como son los geomorfológicos relacionados con la topografía y la pendiente, así como la exposición a la radiación solar, la temperatura del suelo, la humedad, la composición edáfica del suelo, entre otros.

Se estima que los tipos de vegetación que serán más susceptibles al cambio climático son los bosques templados, los bosques tropicales y los bosques mesófilos de montaña, y se espera que varíen drásticamente en distribución y composición (Alvarado *et al.*, 2002). En las altas montañas del centro de México los bosques de *Pinus hartwegii* que conforman el LSB, también se verían afectados.

Se ha observado que el LSB ha variado en los últimos años (Harchs *et al.*, 2009; Bernadier, 2010) mostrando cambios altitudinales en su posición. Estudiar la dinámica del bosque así como los principales factores que la condicionan, es de gran interés, puesto que relacionado a un hipotético cambio regional de las temperaturas se esperarían un ascenso del LSB hacia

cotas de mayor altitud (Leonelli, 2011). Un estudio reciente ha mostrado esta tendencia en el volcán Iztaccíhuatl (Torres Beltrán, 2013).

En el volcán Popocatepetl, desde 1994 existe actividad eruptiva, por lo que aunado a todos los factores ya mencionados, éste último fenómeno puede estar incidiendo en el establecimiento del LSB del volcán limitando el ascenso del *Pinus hartwegii*.

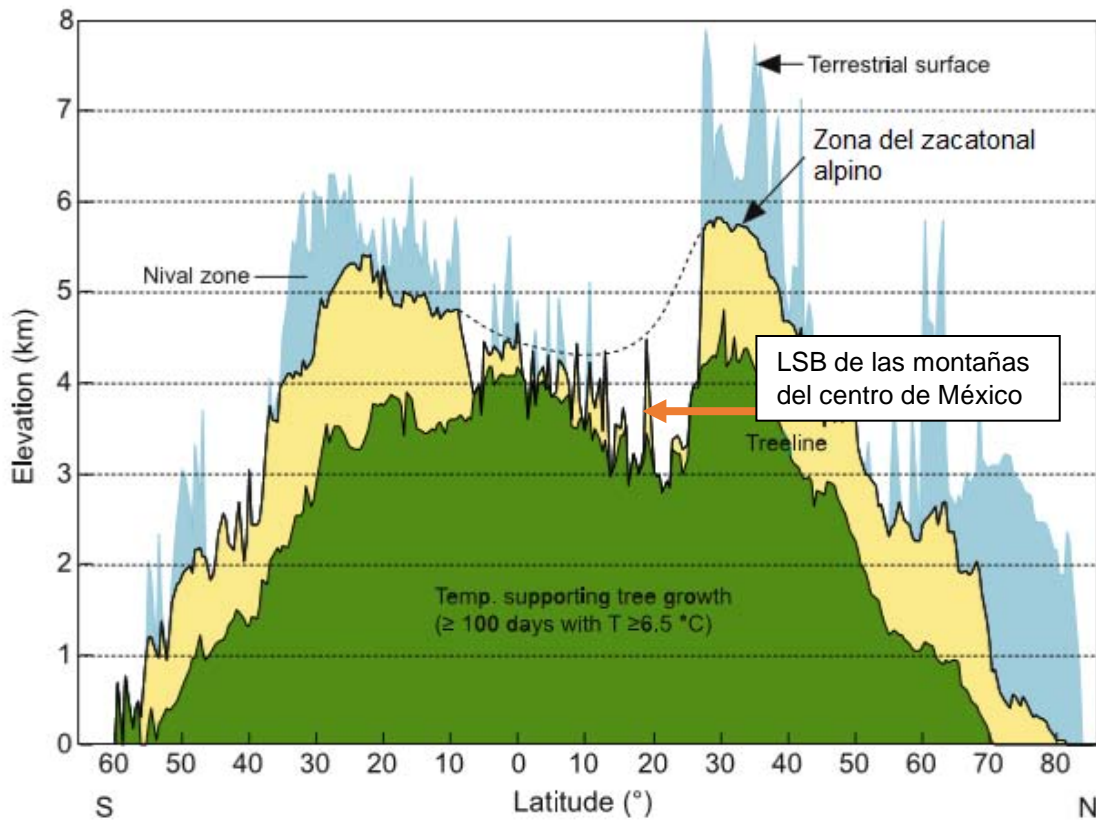


Figura 1 Imagen en donde se observa la posición del *Treeline* global de acuerdo a su latitud (modificado de Körner, 2012).

Conocer los factores biofísicos y ambientales que determinan la posición del LSB es importante. Sin embargo, comparar dichos factores en un volcán activo como lo es el Popocatepetl respecto a uno inactivo como lo es el Iztaccíhuatl será una muestra del dinamismo del LSB en dos de las altas montañas más representativas de México.

De acuerdo con lo anterior la **hipótesis** planteada en este trabajo fue la siguiente:

Se espera que la actividad volcánica reciente e histórica del volcán Popocatepetl es la responsable de la dinámica y modificación altitudinal del Límite Superior del Bosque (LSB) situándolo a una altitud menor que la de una montaña similar sin actividad volcánica.

Para poner a prueba dicha hipótesis se planteó el siguiente **objetivo general**: Caracterizar el comportamiento del Límite Superior del Bosque (LSB) del volcán Popocatepetl durante los últimos 59 años, así como establecer las causas de la posición del *Timberline* y del *Treeline* desde 1955 al 2014, abarcando además el período de reactivación del volcán, es decir, a partir de 1994.

Los **objetivos particulares** fueron los siguientes:

- Trazar el LSB de 1955 utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) para comparar la posición media de este límite respecto al obtenido por Beaman en 1962.
- Cartografiar la posición actual del LSB en el volcán Popocatepetl.
- Determinar y comparar los cambios altitudinales en el *Timberline* y en el *Treeline* entre 1955, 1995-1999 y 2014.
- Definir la posición de los individuos arbóreos que se encuentran en cotas de mayor altura para determinar su movilidad y dinámica por encima del *Timberline* y del *Treeline*.
- Identificar las causas que modifican el LSB de un volcán activo y que definen la posición del *Pinus hartwegii* en el Popocatepetl.
- Comparar el LSB del volcán Popocatepetl respecto del Iztaccíhuatl para establecer los factores que controlan el dinamismo del *Timberline* y del *Treeline* de una montaña volcánicamente activa con otra que no lo está.

Esta investigación se divide en cuatro capítulos. El primero describe el marco histórico conceptual, en donde además se abordan los trabajos realizados a nivel mundial y nacional más representativos del análisis del LSB. El segundo capítulo es referente al aspecto físico-geográfico de la zona de estudio. El tercero corresponde a la metodología empleada para

llevar a cabo los objetivos de este trabajo, así mismo se muestra el mosaico generado para el trazo del LSB de 1955 y se establece el procedimiento mediante el cual se obtuvo el análisis estadístico utilizando para ello el programa SPSS 22.0. En el cuarto capítulo se muestran los resultados obtenidos en el análisis del LSB de 1955 a 2014, además se determina su elevación media y se establece su cambio altitudinal, en ascenso o descenso, mediante la comparación de las pruebas T-Student y las pruebas ANOVA. En el último apartado del trabajo, el de las conclusiones, se reseñan y discuten brevemente los principales resultados de la tesis.

## CAPITULO I. MARCO CONCEPTUAL Y ANTECEDENTES DEL LÍMITE SUPERIOR DEL BOSQUE

Para el desarrollo y construcción de esta tesis se han utilizado estudios desde diversas ramas y enfoques de las ciencias.

Desde la perspectiva de la Geología y de la Geomorfología existen abundantes trabajos, pero para la escala que este trabajo requiere así como el detalle respecto a la información sólo fueron considerados algunos.

En relación con la Geomorfología se retomó el estudio realizado por Franco Ramos (2005, 2009) dado que compila muy bien el análisis geomorfológico del volcán Popocatepetl. Gracias a esta perspectiva ha sido posible conocer la génesis y morfología del volcán, así como comprender cómo es que la topografía variada del mismo influye en el establecimiento del bosque. Las elevaciones máximas del Límite Superior del Bosque (LSB) se alcanzan en las crestas mientras que la elevaciones mínimas ocurren en las depresiones (Beaman, 1962).

Para abordar y conocer la historia geológica del volcán Popocatepetl se consideraron los trabajos realizados por Robin (1984), Franco Ramos (2005) así como Macías (2005) y Espinasa (2007).

Se ha dado un especial énfasis al clima y a la temperatura con el propósito de comprender si esta variable incide directamente en el crecimiento del *Pinus hartwegii* y por lo tanto sea un parámetro en el establecimiento del LSB.

Para ello se ha utilizado la información de García (1988) como un marco para describir el clima de la zona de estudio mientras que para explicar las condiciones de temperatura y la influencia de ésta en el establecimiento del LSB se ha recurrido a los datos de las estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio. Para datos generales de referencia se retoma a Lauer y Klaus (1975), a Lauer (1978) y a Torres Beltrán (2013). Así mismo se requirió el uso de la base de datos CLICOM (2014) mediante la cual se depuraron los datos de temperatura de las estaciones meteorológicas seleccionadas. Dichos datos permitieron generar un gradiente térmico con el cual se realizó el mapa de temperaturas de la zona del volcán Popocatepetl.

Se utilizó el estudio de Andrés *et al.* (2010) para conocer la temperatura del aire y del suelo a diferentes profundidades, mismo con el que se corroboró la información de Lauer y Klaus (1975) y Lauer (1978) respecto a que la oscilación diaria de las temperaturas alcanza un límite, es decir, llega a una estabilización respecto a altitud y profundidad del suelo.

El Popocatepetl es un volcán activo desde hace 20 años (1994), por lo que se consideró el estudio de Muñoz (2007) para analizar cómo los lahares pueden modificar el LSB. Así mismo se retoma a González (2006) para explicar los efectos de la actividad volcánica en la vegetación. El glaciar y su retroceso es analizado bajo el criterio de Delgado-Granados (1997), de Tanarro *et al.* (2004) y Delgado-Granados *et al.* (2007) partiendo de la relación de los efectos sobre la vegetación.

Así mismo se hace una recopilación de los reportes de CENAPRED (2001, 2012) y se utilizan además el trabajo de Franco Ramos (2005), Macías (2005) y Muñoz (2007) con el fin de conocer el comportamiento de la actividad volcánica del Popocatepetl destacando las principales características de la misma, esto con el propósito de entender cómo la vegetación, y en este caso el LSB, han sido afectados en los últimos 20 años de actividad.

### **1.1. Definición**

*“La terminología no es una ciencia, pero sin terminología hay confusión”* Christian Körner.

La definición de cualquier límite de distribución es una convención y está fuertemente vinculado a la resolución espacial que se busca (Körner, 2012).

Definir los conceptos clave que implican el análisis del (LSB) ha resultado complejo debido a las diversas definiciones que pueden encontrarse en la literatura. Por ejemplo, en algunos estudios el concepto de *Timberline* y *Forest line* llega a ser equivalente. Por otra parte, *Treeline* y *Forest line* se utilizan en muchas ocasiones como sinónimos. A la par de estas definiciones se maneja una tercera llamada *Tree species line*.

Los estudios a nivel mundial acerca del LSB utilizan los conceptos de acuerdo al criterio y enfoque que se busca, debido a lo cual resulta más complicado hacer una generalización



sobre el significado de *Treeline*, *Timberline* o *Forest line* y *Tree species line*, nuestros conceptos principales.

De acuerdo con Körner (2012) el Límite Superior de los Árboles (*Treeline*) alpino es posiblemente el más conocido y estudiado de todos los límites de distribución de los árboles. Sin embargo, hay que reconocer que no hay un límite preciso para el bosque ya que éste rara vez es cerrado y no termina de manera abrupta, puesto que el LSB es más bien una zona de transición más que un límite abrupto (Torres Beltrán, 2013). Dentro del LSB se reconocen dos zonas o límites de mayor observación (el *Timberline* y el *Treeline*) y una tercera que puede considerarse como secundaria (el *Tree species line*), estas zonas se diferencian por la densidad de árboles existentes en ellas (Figura 1.1).

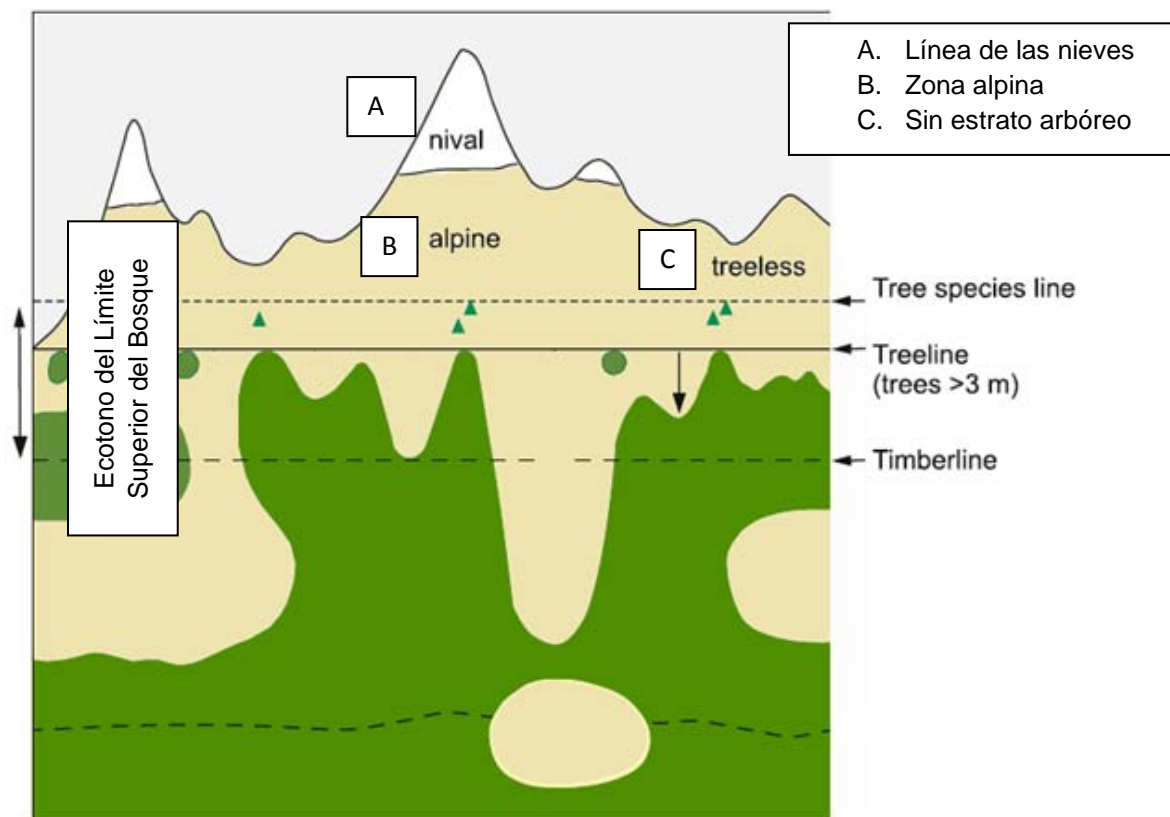


Figura 1. 1 Imagen que ilustra el ecotono del LSB y su distribución. A la derecha se indican los tres límites marcados en este estudio (Modificado de Körner, 2012).

*Timberline*, es el término que se empleará en esta tesis para referirse al Límite Superior del Bosque más o menos cerrado y como una línea de bosque continuo de vegetación arbórea, tal como propone Beaman (1962) así como el límite continuo de crecimiento vertical de los árboles (Lauer y Klaus, 1975; Lauer, 1978).

El *Treeline*, que puede traducirse como Límite Superior de los Árboles, toma una posición intermedia y marca más o menos una línea en donde se encuentran pequeños grupos arbóreos con una talla de hasta 3 m de altura o mayores a ésta. Dicha definición corresponde a la utilizada por Brockmann-Jerosch (1919, citado por Körner, 2012), Daniker (1923, citado por Körner, 2012) y Hermes (1955, citado por Körner, 2012) mismas que utiliza Körner (2012) para establecer su propio criterio y definición sobre lo que considera *Treeline*.

Para Lauer y Klaus (1975) y Lauer (1978), el *Treeline* es el límite máximo efectivo de los individuos arbóreos, y para Sveinbjörnsson (2000) es la línea imaginaria que delinea el límite de distribución superior de los árboles dispersos pero de forma vertical.

De acuerdo a lo anterior, el término *Treeline* se entenderá como aquel límite por encima del *Timberline* y en donde aún se distinguen individuos de árboles, dicho de otra forma, es la línea hasta donde se encuentran ejemplares de arbóreos, es decir, el Límite Superior de los Árboles.

La última zona de transición es el *Tree species line*, que más que un límite se refiere a aquellos últimos individuos arbóreos que se encuentran aún más aislados o en pequeños grupos en las cotas de mayor altitud y por encima del *Treeline*, por lo que no pueden considerarse dentro de éste. Así mismo, la visibilidad de éstos está determinada por la escala a la que se esté trabajando, debido a lo cual podrán distinguirse o no.

Cabe mencionar que para los propósitos de esta tesis se considerarán los términos de *Timberline* y *Treeline* ya que son de uso generalizado, y también porque se han utilizado ambos conceptos en México (Beaman 1962, Lauer y Klaus 1975, Lauer 1978, Körner y Paulsen 2004, Torres Beltrán, 2013).

Así mismo, el empleo de *Timberline* tal cual lo hace Beaman (1962) hace posible la comparación de los resultados de su estudio con los del presente trabajo, pues se trata de una de las principales referencias de esta tesis.

Por lo tanto y bajo los criterios ya mencionados, se adoptan las siguientes definiciones de trabajo:

***Timberline***, es el Límite Superior del Bosque más o menos cerrado y continuo de la vegetación arbórea.

***Treeline***, es el Límite Superior de los Árboles que se encuentran en pequeños grupos o aislados por encima del bosque más o menos cerrado.

***Tree Species Line***, más que un límite son aquellos individuos arbóreos que se encuentran por encima del *Treeline* y en cotas de mayor elevación y que aún pueden distinguirse en las fotografías aéreas, ortofotos digitales de INEGI y en las imágenes satelitales del Servicio de Imágenes del Planeta Google Earth™.

Cabe mencionar que este último límite se ha considerado identificar dado que es importante conocer el posicionamiento altitudinal de los ejemplares arbóreos que crecen en cotas de mayor elevación. Sin embargo, su trazo está limitado por la resolución del material fotográfico y satelital utilizado en este trabajo.

Con base en todo lo anterior, en esta tesis se delimitará principalmente el *Timberline* y el *Treeline*, ambos conjuntan de esta manera lo que se conoce como el Límite Superior del Bosque (LSB), es decir, el límite máximo altitudinal al que se encuentra el bosque de *Pinus hartwegii* en el volcán Popocatepetl. A continuación un ejemplo de cómo se han considerado los límites de acuerdo a las conceptualizaciones mencionadas (Figura 1.2).

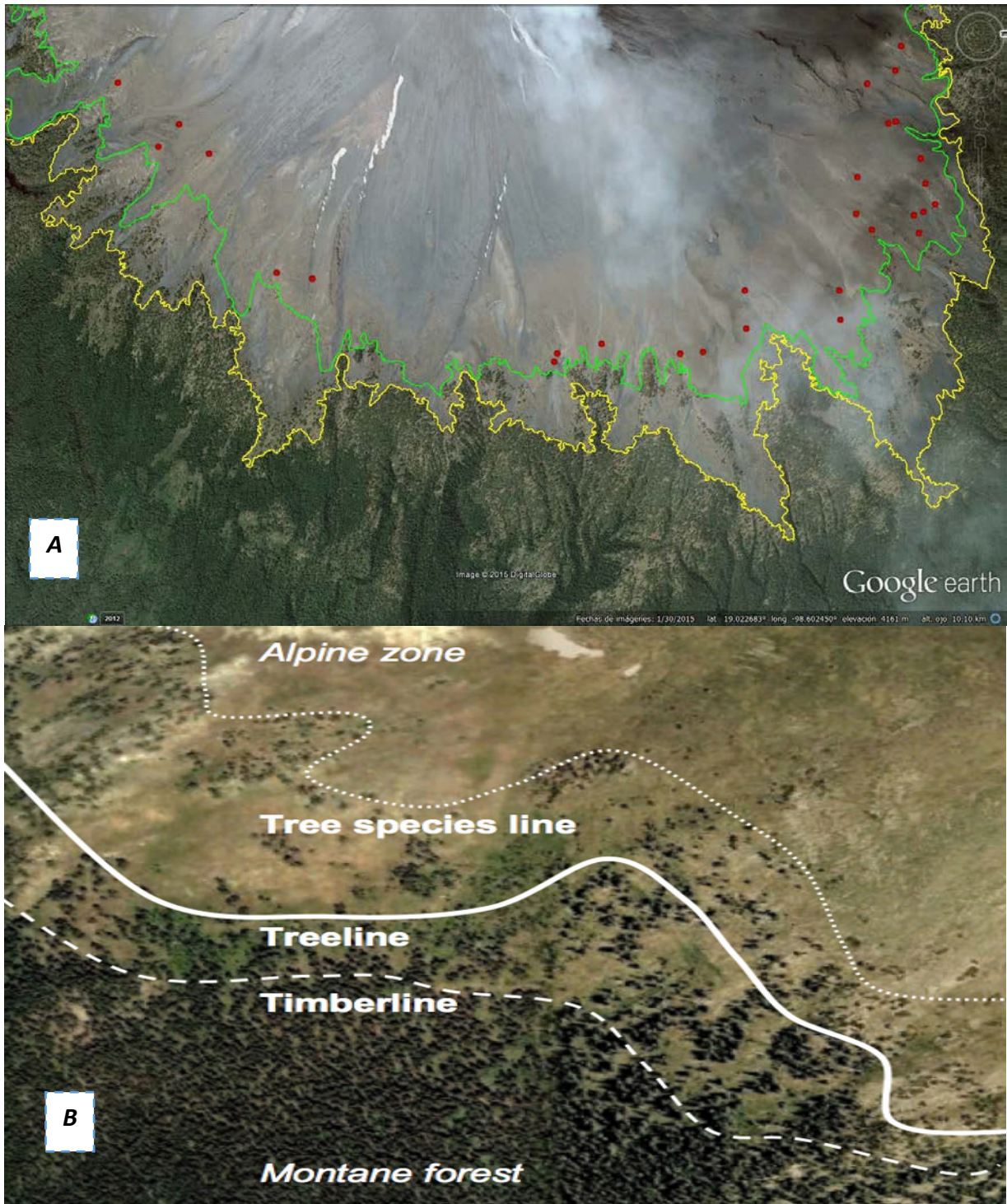


Figura 1. 2 A. Imagen en donde se muestra el trazo realizado por la autora del LSB en una imagen del Servicio de Imágenes del Planeta Google Earth™ de abril de 2014 del volcán Popocatepetl. En verde se muestra el *Treeline*, en amarillo el *Timberline*; los puntos rojos son individuos del *Tree species line*. B. Imagen que representa los límites considerados en este trabajo (Tomada de Berdanier, 2010).

## 1.2. Desarrollo de los estudios sobre el Límite Superior del Bosque

A nivel mundial el LSB ha sido analizado desde décadas atrás, incluso siglos, y aunque no era considerado como un análisis del *Timberline* o *Treeline*, podemos encontrar connotaciones que hacen un primer acercamiento a las comparaciones de la vegetación a nivel latitudinal.

Un primer esfuerzo es el realizado por Humboldt y Bondpland en 1807, quienes vieron muy claramente el LSB como un fenómeno global y una forma de vida de la frontera de los árboles (Körner, 2012).

La vegetación de acuerdo a Humboldt y Bondpland se posiciona de acuerdo a su latitud (Figura 1.3). Ambos autores delimitan indirectamente el LSB aunque bajo una perspectiva de análisis de los pisos de vegetación.



**Figura 1. 3 Representación de Humboldt y Bondpland en donde se observan los pisos de vegetación a nivel mundial como un primer acercamiento al análisis del LSB (Tomada de Körner, 2012).**

El posicionamiento del LSB es un fenómeno que puede considerarse y relacionarse como una referencia bioclimática, lo cual permite hacer comparaciones latitudinales de la biota.

Hay trabajos previos que han abordado el *Treeline* y el *Timberline* en diversas partes del mundo, unos con el objetivo de analizar el posicionamiento de los árboles de algunas montañas en específico y otros con el objetivo de hacer una comparación global de acuerdo a latitud tal como pretendió Humboldt y Bondplan en 1807.

Uno de los primeros trabajos realizados bajo el análisis del *Treeline* corresponde a Schröter quien hizo una síntesis general de los Alpes europeos en 1908-1926 (Körner, 2012). Muy probablemente en él se inspiró el trabajo de Däniker (1923, citado por Körner, 2012) quien supuso que el posicionamiento del *Treeline* estaba relacionado con ciertos factores regionales, destacando entre ellos la temperatura.

Respecto a comparaciones globales destacan los trabajos de Troll (1961,1973, citados por Körner, 2012), Troll y Lauer (1978, citado por Körner, 2012), Holtmeier y Broll (2005), Körner (1998), Körner y Paulsen (2004), que analizan las características de los árboles en el *Treeline* y cómo influye el ambiente en la estatura de los árboles así como la relación de éstos con el clima, específicamente con la temperatura.

Leonelli *et al.* (2011) hace énfasis en el potencial del clima como causante en la posición del *Timberline* y del *Treeline*, aunque al igual que Resler (2006) asegura que los factores geomorfológicos deben considerarse en los estudios de la dinámica del LSB ya que existe una estrecha relación entre los procesos geomórficos y la posición del *Timberline* y el *Treeline*.

Los estudios del *Treeline/Timberline* cambian de acuerdo al enfoque de cada autor, e incluso de la rama de las ciencias naturales bajo la que se realizan, de tal manera que hay estudios desde la perspectiva de la Bioclimatología, de la Ecología, así como de la Geografía, y también desde la Paleoecología.

Desde la perspectiva de la Ecología, Tranquillini (1979, citado por Körner, 2012) hace una síntesis general de la zona templada basándose en gran medida en datos de los Alpes Austríacos. Autores como Sveinbjörnsson (2000), a partir de estos datos, discuten sobre las posibles causas de la formación del LSB. Sin embargo, quien resume las hipótesis de la formación del *Treeline* es Körner (1998).

Cabe mencionar que los estudios comparativos ayudan a entender los cambios en el LSB histórico y el impacto o relación que la fluctuación climática puede estar ejerciendo, así como los factores regionales que pueden implicar un cambio.

La temperatura ha sido quizá la variable más considerada en el estudio del LSB y por esto existen estudios acerca de cómo el cambio climático afecta y afectará en un futuro el posicionamiento del *Timberline* y el *Treeline* (Harsch *et al.*, 2009). Ambos límites se han desplazado a cotas de mayor altitud como respuesta a cambios climáticos globales y aumentos de las temperaturas regionales (García De Celis *et al.*, 2008; Torres Beltrán, 2013).

Respecto a los estudios realizados en el continente Americano, para el caso específico de América Central, hay trabajos como el de Daubenmiere (1954, citado por Körner, 2012) y Troll (1968, citado por Körner, 2012).

Estudios climatológicos por Körner y Paulsen (2004) quienes analizan la posición del *Treeline* mundial estudiando 46 sitios entre los 68°N y 42°S. Con ello establecen que la posición del LSB varía de acuerdo a la latitud y a la media de la temperatura ambiental así como a la temperatura del suelo a profundidad de las raíces, todas estas características interfieren en el desarrollo de los individuos arbóreos y en su posición. Así mismo, hacen una comparación global del establecimiento del *Treeline* aunado a las características ya mencionadas y determinan una temperatura media de  $6.7 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$  a los 4,000 msnm (Villanueva *et al.*, 2013).

### **1.3. Estudios sobre el LSB en México**

En México existen cuatro estudios sobre el análisis y ubicación del LSB en diferentes montañas del centro del país. El más antiguo de Beaman (1962), el de Lauer y Klaus (1975), el de Lauer de 1978, y el más reciente de Torres Beltrán (2013).

Beaman (1962) realiza el trazó del *Timberline* del Iztaccíhuatl y del Popocatepetl a través de la fotointerpretación de fotografías aéreas de 1955. Determinó que el LSB no sufrió cambios durante el siglo XIX hasta mediados del siglo XX. Así mismo identifica que la elevación media del *Timberline* del Popocatepetl es 109 m más bajo que el del Iztaccíhuatl, situándolo en 3,911 msnm para 1955.

A pesar de que el *Timberline* tiende a seguir el contorno de la curva de nivel de 3,900 m, hay algunas variaciones relacionadas con la topografía del volcán, factor que condiciona el emplazamiento del LSB. Beaman descarta la cresta Yoloxochitl, así mismo, en la barranca Nexpayantla en el NW, el *Timberline* no está delimitado con precisión debido al valle profundo y casi vertical que tiene, generando variaciones en su posición ocasionado por las pendientes escarpadas y los acantilados.

Por otro lado en la ladera W, la granulometría, la naturaleza xérica y la inestabilidad de los depósitos de ceniza volcánica determina la baja altitud del *Timberline* restringiendo la colonización de árboles en cotas de mayor elevación, ya que éste límite sigue la línea de contacto de los depósitos viejos y nuevos de ceniza encontrándose a una altitud media de 3,850 msnm reduciéndose la densidad del pinar (Beaman, 1962). El *Timberline* en el Norte del Popocatepetl es similar al del Iztaccíhuatl.

Cabe destacar que el arbolado se encuentra disperso en gran parte del depósito de cenizas, pero no forma un bosque continuo, esto es lo que se consideraría como *Treeline*, es decir, el Límite Superior Arbóreo. Sin embargo, Beaman trazó el *Timberline* en la ladera Oeste del volcán bajo criterios del *Treeline*, es decir, no diferenció ambos límites, los consideró como uno sólo; él menciona que el *Timberline* en esta área corresponde al Límite Máximo Superior de los Árboles (*Treeline*).

Al igual que en el Iztaccíhuatl, en el Popocatepetl de acuerdo con Beaman, el *Timberline* coincide con la isoterma de 10°C durante agosto, el mes más cálido. Estos factores junto con los ambientales (luz, viento, temperatura, entre otros) son los responsables de la posición del *Timberline* en el Popocatepetl en 1955.

Lauer y Klaus (1975) establecen la posición del *Timberline* en la montaña más alta del país, el Pico de Orizaba, y encuentran las posibles causas que determinan su posición. Por otra parte, Lauer (1978) hace un estudio más general para las montañas del centro de México.

En ambos trabajos se determina que la posición del *Timberline* es ocasionada por el régimen climático, es decir, el crecimiento de la especie dominante del LSB en México, el *Pinus*



*hartwegii*, está determinada por las temperaturas de primavera y su crecimiento por las condiciones particulares del suelo, especialmente en el Pico de Orizaba, en donde Lauer y Klaus (1975) utilizan la expresión "*Cold dry limit*" para referirse a aquella zona en donde la temperatura del suelo y la humedad disminuye gradualmente haciendo imposible el crecimiento de las plantas. Cabe mencionar que en ambos estudios, la posición del LSB coincide con una media de la temperatura anual de 6°C.

El *Timberline* de las montañas del centro de México se establece además en una zona de transición climática debido a la latitud a la que se encuentra por lo que no pertenece a una zona ecológica específica.

Se considera que el fuego, inducido y natural, juega un papel importante en la configuración de la posición del LSB en las montañas del centro de México. Por un lado los fuegos naturales han estabilizado el *Timberline* a lo largo de siglos, en tanto que los artificiales han hecho que este límite se desplace a cotas de menor elevación respecto a su posición inicial (Lauer, 1978).

El trabajo más reciente sobre la ubicación del LSB en una montaña de México, corresponde al realizado por Torres Beltrán (2013), en el que se evalúa la ubicación del LSB en el volcán Iztaccíhuatl y sus cambios desde los años 1950.

Torres Beltrán analiza los efectos de la variabilidad climática y de la geomorfología, así como la distribución espacial del LSB determinando los factores que lo controlan. Así mismo, compara sus resultados con los de Beaman (1962), aunque sólo respecto al *Timberline*, ya que éste no delimitó el *Treeline*.

Con la aplicación de la técnica de dendrocronología a una muestra de árboles del Iztaccíhuatl determinó las edades mínimas del arbolado, y gracias a este análisis encontró una correlación negativa entre la edad del arbolado y la altitud (Torres Beltrán, 2013), es decir, a mayor altura menor edad del arbolado. Este estudio concluye que hubo un ascenso en el LSB del volcán Iztaccíhuatl, por lo que el *Timberline* en 2012 se encuentra 30 m por encima respecto al mismo límite en 1955. Por otra parte, el *Treeline* ascendió 67 m, en el mismo

lapso de tiempo (1955-2012). Dicho ascenso altitudinal corresponde con un aumento local de la temperatura

Debido a que el LSB del volcán Popocatepetl ha sido uno de los más estudiados, se tienen algunos datos respecto a su posición desde el siglo XIX.

De acuerdo con Sonntag (1859, citado por Beaman, 1962) el *Timberline* en el volcán Popocatepetl se ubica a 400 pies es decir, a 121 metros por encima del rancho Tlamacas en la ladera Norte del volcán, cabe mencionar que este estudio es uno de los más fiables que existen. Dicha elevación coincide muy de cerca con la que encuentra Beaman en 1962 en relación al rancho que es de 3,900 msnm.

En el NW el *Timberline* se sitúa a 3,639 m de acuerdo con Sohneschmidt (1770, citado por Farrington en 1897); en el SW a 3,823 m por Glennie (1827, citado por Farrington, 1897), en el Este a 3,980 m por Dollfus (1865, citado por Farrington, 1897). Por otra parte Aguilera y Ordoñez (1895) encuentran el *Timberline* a 4,030 m de altitud en la ladera Norte del Popocatepetl.

Es importante retomar estos datos ya que muestran la dinámica de la posición del *Timberline* desde el siglo XIX, en donde se observan los cambios altitudinales históricos del LSB.

Como un referente más, Almeida *et al.* (1994) ubica el LSB del volcán Popocatepetl entre 3,950 y 4,000 msnm y el límite inferior de la nieve entre 4,950 y 5,000 msnm. En las otras vertientes del volcán, de acuerdo con estos autores, no se producen cambios relevantes en el LSB.

Se espera que el LSB del volcán Popocatepetl siga el mismo comportamiento y dinamismo hasta ahora observado en el Iztaccíhuatl y otras montañas del mundo. No obstante, el volcán entró en una nueva fase de actividad a partir de 1994, lo cual hace necesario el siguiente apartado, no sin antes hacer mención de que es posible que la actividad eruptiva sea una limitante en la dinámica y en el establecimiento y posición del LSB.

Lo anterior es interesante debido a la cercanía entre el volcán Iztaccíhuatl y el Popocatépetl, lo que hace posible una comparación del LSB de un volcán activo respecto a uno inactivo, ya que ambos mantienen condiciones ambientales muy similares.

#### **1.4. La actividad volcánica como modeladora del LSB**

La actividad del volcán Popocatépetl durante el período de análisis se ha caracterizado por mantener una calma relativa hasta finales del siglo XX cuando da comienzo una reactivación del mismo, caracterizada por explosiones de intensidad elevada que ponen de manifiesto que el volcán comienza una nueva fase activa.

En 1919 el Popocatépetl se reactiva a consecuencia de una detonación de dinamita ocurrida en el interior del cráter producto de la explotación de azufre que se hacía dentro del mismo (Franco Ramos, 2005). Sin embargo, este suceso puede ser una coincidencia que se relacionó con la reactivación del volcán.

Desde esa fecha y hasta 1930 las explosiones cesaron gradualmente, comenzando en 1994 un nuevo período eruptivo mismo que ha tenido lapsos de baja y alta intensidad hasta la actualidad. La naturaleza de la actividad de 1994 era similar a la de eventos como el de 1919-1927 (CENAPRED, 2012).

En un volcán activo como lo es el Popocatépetl las explosiones y la actividad misma tienen gran significado geomorfológico, ya que no sólo se modela la morfología del volcán sino también en este caso el LSB se puede estar modificando debido a que el bosque puede estar cediendo a la presión de la actividad eruptiva.

Hemos de considerar que las erupciones volcánicas afectan a la biosfera en función de sus características específicas (González, 2006), de tal modo que la vegetación con erupciones efusivas se ve afectada de forma puntual.

La actividad del volcán en los últimos 20 años se ha caracterizado por la exhalación de ceniza, flujos piroclásticos, y expulsión de material incandescente, entre otros. Todos estos fenómenos no han ocurrido de manera conjunta, es decir, algunos son característicos de fases en donde el volcán aumentó su actividad.

Justo por lo anterior es importante tener en cuenta los eventos y fenómenos más trascendentales que se han presentado durante los últimos 20 años de actividad, pues al considerar las zonas que han sido severamente dañadas y al analizar el LSB se puede hacer una deducción directa del impacto que la dinámica volcánica puede estar ejerciendo no sólo en el *Timberline* sino también en el *Treeline*, así como en el *Tree species line*.

Gracias a los sistemas de monitoreo que hay para conocer la actividad del volcán Popocatepetl, se conocen las características de su comportamiento durante estos últimos 20 años, por lo que es factible hacer un reconocimiento de los daños directos a la vegetación.

Se considera que el último evento eruptivo durante el siglo XX fue en 1938, a partir de esta fecha y para que volviera a haber indicios de actividad tuvieron que pasar 54 años.

A finales de 1992 se presenta un incremento en la actividad sísmica y fumarólica (Franco Ramos, 2005).

Desde 1993, el volcán Popocatepetl comenzó a mostrar una creciente actividad al incrementarse su actividad fumarólica y sísmica (CENAPRED, 2001). Sin embargo, es el 21 de diciembre de 1994 que se produce la primera emisión de cenizas, vapor de agua y gases, que se elevaban hasta alturas de 2 a 3 km del cráter (Macías, 2005; CENAPRED, 2012).

A partir de este momento el volcán recobra interés por parte de los especialistas y de todos los sectores de la población, ya que su reactivación representaba un riesgo de pérdidas humanas y económicas. El monitoreo volcánico se hace más estricto con el fin de informar y prevenir los peligros que se asocian a la actividad eruptiva (Franco Ramos, 2005).

Desde 1995 la actividad volcánica disminuyó en cuanto a intensidad respecto de 1994. Sin embargo, hubo piroclastos que no tuvieron un desarrollo vertical, este nuevo estilo eruptivo

tuvo como resultado que el glaciar quedará cubierto en un 50% de su superficie por ceniza, lo que favoreció la fusión del hielo y dio origen al primer lahar en abril de ese año (Franco Ramos, 2005). El lahar recorrió 3 km (Muñoz, 2007) siguiendo el curso de la barranca de Huiloac.

Durante el año de 1996 la actividad explosiva continuó caracterizándose por la construcción de un primer domo, misma característica que es propia del volcán hasta la fecha. Las columnas de ceniza también fueron parte de la actividad durante ese año, la cual continuó hasta 1997, en general dicha actividad fue fluctuante. Entre abril de 1996 y junio de 1997 se habían construido tres domos de lava dentro del cráter (Macías, 2005).

El 11 de junio de 1997 ocurre la explosión más conocida del volcán Popocatepetl, en la que se destruyó el domo<sup>3</sup>. Debido a esta explosión se produce el decremento en el volumen y área del glaciar con la caída de piroclastos incandescentes sobre su superficie, de tal forma que se liberó una gran cantidad de agua provocada por la ablación de la masa de hielo originado un lahar el 13 y 14 de junio, incorporando material no consolidado a lo largo de sus trece kilómetros de recorrido (Franco Ramos, 2005; Muñoz, 2007).

El 30 de junio de ese mismo año se registró una de las explosiones más grandes registradas hasta el momento desde la reactivación del volcán en 1994, la columna eruptiva alcanzó 8 km por encima del cráter, provocando que la caída de ceniza llegara incluso a la Ciudad de México motivo por el cual el aeropuerto tuvo que ser cerrado cerca de 12 horas (CENAPRED, 2012). En la porción S y SE se emplazaron flujos piroclásticos y como consecuencia de este hecho parte del glaciar se derritió, lo que dio lugar a la formación de un lahar que discurrió por las barrancas de Tenenepanco y Huiloac, recorriendo alrededor de 21 km, su desplazamiento se inició a los 4,200 m y finalizó a los 2,400 m, alcanzando a las poblaciones de Santiago Xalitzintla y San Nicolás de los Ranchos (Franco Ramos, 2005; Muñoz, 2007).

En diciembre de ese mismo año ocurrió una explosión importante que arrojó de acuerdo con Franco Ramos (2005) nubes densas de piroclastos y balísticos, estos últimos ocasionaron incendios forestales en las laderas del volcán.

El año de 1998 ocurrieron eventos importantes de explosividad, y algunos de ellos como el del 1° de enero se caracterizaron por la expulsión de material incandescente y una columna de ceniza, mismos que cayeron en su mayoría en la ladera NW (Franco Ramos, 2005) provocando nuevamente incendios forestales en la barranca Nexpayantla.

Durante el transcurso del año las explosiones no fueron violentas. Sin embargo, al finalizar el mismo, se presentó una explosión fuerte que expulso fragmentos incandescentes que llegaron a 4.5 km de distancia del cráter (CENAPRED, 2012) provocando incendios en la zona boscosa.

Durante el año 1999, hubo pequeños lahares que se emplazaron por las barrancas La Espinera y Tenenepanco (CENAPRED, 2012) mismos que se generaron a partir de la ablación del glaciar en la ladera Norte del Popocatépetl. Desde este período y hasta el año 2001 la actividad del volcán parecía haber disminuido considerablemente.

Una de las últimas erupciones importantes fue la ocurrida el 21 de enero de 2001, dado que produjo un flujo piroclástico rico en escoria, que erosionó el glaciar originando lahares que fluyeron alrededor de 15 km hacia el poblado de Xalitzintla (Macías, 2005). El flujo descendió sobre el flanco N-NW del volcán (Franco Ramos, 2005) y hasta 6 km por las barrancas Tenenepanco, La Espinera y Tepetelonconcone (Muñoz, 2007). Conforme transcurría el año, la actividad fue disminuyendo. Cabe mencionar que en el mes de abril la actividad explosiva del volcán tuvo mayor impacto en las laderas NE y NW.

A partir del año 2002 la actividad volcánica tiende a disminuir, en cuanto al nivel de explosividad; la expulsión de piroclastos tiene la característica de no ser violentos. El 2003 es el año donde se presentan los niveles más bajos de explosividad desde la reactivación del volcán.

De acuerdo con Franco Ramos (2005), Macías (2005) y Muñoz (2007), los períodos de mayor intensidad eruptiva y actividad volcánica están estrechamente relacionados con la formación-destrucción de domos en el interior del cráter del Popocatépetl, de tal manera

que el crecimiento/formación de domos está ligado a una intensa actividad interna en el volcán.

Cabe mencionar que hasta el año 2003 y desde el inicio de la actividad volcánica, pudieron contabilizarse, de acuerdo al monitoreo y a las diversas fuentes de información, la construcción-destrucción de 21 domos en el Popocatepetl, mismos que han contribuido a la expresión actual del relieve.

La actividad del volcán se mantuvo relativamente baja hasta el año 2006. En agosto de aquel año el Popocatepetl mostró un cambio en su comportamiento (CENAPRED, 2012), pues se registró una explosión de gran amplitud y es a partir de este momento que la actividad tuvo la tendencia a aumentar, caracterizándose por exhalaciones de ceniza de moderada intensidad.

En el año 2008 surge la destrucción del domo 30 y como consecuencia de esto se produce un incremento en la actividad volcánica; en julio de este mismo año se detectan evidencias de deformación en el flanco SE del volcán que corresponde a una probable inclinación del cono volcánico (CENAPRED, 2012).

A partir de este último año la actividad del Popocatepetl se considera estable, sólo caracterizada por la formación de pequeños domos, y hacia el 2010-2011 puede hablarse de una fase de recarga por explosiones de mayor intensidad asociadas con la formación de domos cada vez más grandes.

En el año 2012 la actividad fue moderada, las exhalaciones fueron más esporádicas y de baja intensidad. Sin embargo, y al igual que los años anteriores hubo lapsos en donde la actividad incrementó ocasionando un cambio en la alerta volcánica en abril de dicho año. Nuevamente cuando disminuyó la intensidad en la actividad eruptiva la alerta se modificó.

De igual forma, el 2013 se caracterizó por tener paulatinos incrementos en la intensidad de la actividad, por lo que puede considerarse como moderada en la mayor parte del año. Quizá es de destacarse la actividad de mediados de aquel año, que originó en primera un cambio en la

alerta volcánica, y en segunda un incendio que afectó la zona de pastizales, mismo que se caracterizó por una exhalación intensa que provocó una columna de ceniza de 4 km por encima del cráter, lanzando material incandescente en un radio de hasta 2 km, los cuales por su alta temperatura provocaron dicho incendio (CENAPRED, 2012).

Respecto al año 2014, la actividad ha tenido un comportamiento similar que en años anteriores, es decir, muy fluctuante, ha sido moderada hasta entonces y sólo puede mencionarse un ligero incremento hacia finales de febrero originado por la destrucción del domo 48 y la formación del 49.

Sin duda alguna, después de 20 años de actividad, el comportamiento del Popocatepetl ha rebasado por mucho la magnitud de la ocurrida entre 1919 a 1927.

### **1.5. Peligros volcánicos asociados a la vegetación**

En un escenario en donde existe un volcán activo cabe hacer un apartado mencionando los diferentes peligros que la actividad volcánica puede ocasionar a la vegetación (Tabla 1.1). Bajo este supuesto, de acuerdo con González (2006) los peligros volcánicos pueden dividirse en directos e indirectos o secundarios. La vegetación, en este caso el elemento en riesgo, puede resultar afectada como consecuencia de la incidencia del evento eruptivo.

Entre los peligros directos se encuentran:

- A) **Colada de lava**, generan un impacto directo de destrucción total sobre las formaciones vegetales, los flujos de lava pueden generar incendios forestales afectando el LSB.
  
- B) **Caída de piroclastos**. Los daños ocasionados por éstos están condicionados tanto por el volumen, temperatura y grado de humedad, velocidad de caída y tamaño de las partículas del material que se deposita (González, 2006), así como por las características de la vegetación.



En algunas explosiones efusivas del Popocatépetl los piroclastos incandescentes han tenido un radio de alcance de 2 km que han dañado directamente la vegetación provocando incendios forestales, muchos de estos en la zona del zacatonal. Se trata de fragmentos de los domos de lava que son lanzados como balísticos durante las explosiones y posteriormente ruedan por las laderas del cono, alcanzando en ocasiones áreas cubiertas por el zacatonal.

C) **Flujos piroclásticos**, causan la destrucción instantánea de todo lo que encuentran en su camino, incluida desde luego a la vegetación.

Cuando van precedidos por una onda de choque la vegetación puede ser arrancada de raíz. Un ejemplo contemporáneo de esto se puede encontrar en la erupción del Santa Elena en 1980 en donde más de 3,000 hectáreas de bosque maderable sufrieron la rotura o el arranque de los árboles como consecuencia de las ondas de choque (González, 2006). En el Popocatépetl los flujos piroclásticos del 21 de enero de 2001 entraron en contacto con el bosque (Franco Ramos, 2005).

D) **Lahares**, en el caso del Popocatépetl este riesgo volcánico fue latente como consecuencia de la ablación de sus glaciares provocados por las altas temperaturas de los materiales expulsados que caían en el glaciar. Estos hechos ocurrieron en 1995, 1997 y 2001 respectivamente.

Peligro volcánico	Área afectada	Intensidad del daño	Daño causado	Duración efectos
Coladas lávicas	Pequeña-Media	Alta	Enterrada o quemada	Centurias
Caída de piroclastos	Grande	Alto-Bajo	Enterramiento	Décadas-años
Flujos piroclásticos	Pequeña	Alta	Enterramiento	Centurias-décadas
Avalanchas	Media	Moderado-bajo	Enterramiento	Centurias-décadas
Lahares	Media	Moderado-bajo	Enterramiento	Años

**Tabla 1. 1 Resumen de los impactos de los peligros volcánicos en la vegetación (Tomada de González, 2006).**

Los árboles de gran porte o tamaño, los que se encuentran aislados o en grupo, pueden sobrevivir ante el peligro latente que representa un lahar. Sin embargo, de acuerdo con Muñoz (2007) los lahares en el Popocatépetl afectaron claramente a la vegetación de las barrancas Tenenpanco y Huiloac. La capacidad de supervivencia de la vegetación ante un

lahar depende de la capacidad de resistencia y de la naturaleza del depósito como lo es la competencia y la compactación (González, 2006).

Pese a esto, se ha observado en otros volcanes como el Santa Elena que la recolonización vegetal se inicia con el asentamiento de plantas herbáceas pioneras que preparan el suelo para otras arbustivas. Por lo tanto, si existe un intervalo suficiente sin actividad lahárica, la vegetación arbórea puede penetrar y colonizar los depósitos formados por el lahar (Muñoz, 2007).

En cuanto a los efectos indirectos se encuentran:

- A) **Emisiones de gas y lluvia ácida.** El desarrollo de la vegetación es afectado negativamente en regiones volcánicas activas.
- B) **Cambios en las condiciones edáficas;** de acuerdo con González (2006) en el suelo se llevan a cabo transformaciones drásticas y duraderas. El nuevo material es sometido a diversos procesos como la meteorización. Sin embargo, tarda varios siglos en desarrollarse condiciones edáficas que permitan la colonización de esos depósitos por nuevas especies vegetales.

Es importante mencionar que las coladas de lava son las que ponen más dificultades a los procesos de restauración vegetal, debido a la resistencia de la roca. En cambio sobre los depósitos de ceniza, de flujos piroclásticos poco consolidados, de lahares, las condiciones de generación de suelo pueden ser localmente favorables a la regeneración vegetal relativamente rápida (González, 2006).

Los incendios forestales merecen un apartado en este subtema ya que representan un peligro latente en el LSB como parte de las explosiones del volcán que propiciarían lanzamiento de piroclastos que tienen la probabilidad de alcanzar el bosque y con esto afectar el posicionamiento del *Timberline* y del *Treeline*.

El *Pinus hartwegii* es la especie que marca el límite altitudinal para los árboles en México y por lo tanto del LSB en las montañas del centro del país. Su gruesa corteza, troncos anchos y

rápido crecimiento, son las características distintivas de esta especie y que contribuyen a su buena capacidad de adaptación al fuego (Lauer y Klaus, 1975).

De manera natural el fuego beneficia el crecimiento y repoblación no sólo de esta especie sino de muchas más. Los incendios provocados por los ganaderos en el zacatonal alpino para estimular el rebrote de los pastos en ocasiones se salen de control y dañan severamente al zacatonal y al bosque.

De acuerdo con Rodríguez (2002) la frecuencia natural de incendios en este ecosistema no es superior a los 10 años, y probablemente la media está en torno a los 5 años.

La adaptación al fuego se observa en la capacidad de rebrote de las plántulas, de tal manera que las poblaciones menores a 1.3 metros de altura tienen un 96.7% probabilidades de rebrote (Rodríguez, 2002).

Esto significa que incluso en cotas de mayor altitud, en donde la altura de los árboles de *Pinus hartwegii* es menor, éstos en general tienen altas probabilidades de recuperarse incluso si los afectan incendios asociados a la actividad del Popocatepetl.

El fuego permite el contacto de la semilla con el suelo mineral, eliminando la barrera física que el zacatonal alpino representa. Por lo tanto, el suelo es enriquecido por el lecho de cenizas que posteriormente permitirá a las plántulas contar con más nutrientes (Rodríguez, 2002).

En el caso de *Pinus hartwegii*, en pinos desde 15 cm de diámetro, González (2001, citado por Rodríguez, 2002) reporta 100% de supervivencia de los árboles a incendios de intensidad moderada.

Es importante mencionar que los daños que se pueden cuantificar a la vegetación en un volcán activo van ligados al radio de alcance de los materiales que éste emita.

De acuerdo con Lauer y Klaus (1975) los fuegos naturales han estabilizado el *Timberline* a lo largo de los siglos, pero los fuegos artificiales han hecho que este límite se desplace a cotas

de menor altitud, a esto se debe la ausencia de soportes jóvenes de *Pinus hartwegii* en el Límite Superior del Bosque.

Lo anterior puede ser corroborado con un análisis dendrocronológico (a profundidad) al LSB, esperando que el Popocatépetl siga un comportamiento similar al de otros períodos de actividad (1720, 1927-1937) y tener una disminución en la actividad eruptiva entrando en un período de reposo (CENAPRED, 2012).

Es lógico pensar que en el Popocatépetl el LSB ha sido directamente afectado por la actividad presente, no sólo en lo que se refiere a los incendios forestales provocados por las caídas y flujos piroclásticos, sino también por los lahares que han ocurrido.

Los reportes de CENAPRED mencionan 4 incendios forestales pero en la zona de zacatonales, y para que los fragmentos incandescentes provocaran tales incendios tuvieron que desplazarse al menos 2 km del cráter. A pesar de esto, no puede asegurarse que esa sea la cifra exacta de daños directos por incendios al bosque, es decir, pueden existir más eventos que no hayan sido reportados, pues no hay un monitoreo de incendios que indique la cifra exacta de los mismos.

Con lo anterior puede determinarse un par de supuestos:

- 1)** Un incendio forestal en el LSB relacionado con la actividad del Popocatépetl se debe a la expulsión de material incandescente, pero para que éste se originé, el material debe tener un desplazamiento de unos 2 km del cráter y más. En su mayoría han dañado la zona del zacatonal alpino.
- 2)** El *Pinus hartwegii*, la especie dominante del LSB, es una de las que mejor se adaptan al fuego y por lo tanto su repoblación es significativa tras un incendio forestal.

La repoblación sucede tras un largo período de tiempo. Cabe mencionar que el rebrote del pino (y en general de cualquier otra especie) puede darse a partir de las especies existentes antes del incendio o a partir de nuevas especies que colonicen, en el caso del *Pinus hartwegii*, y de casi todas las especies arbóreas, el papel del fuego es fundamental, debido a que la falta de este factor ecológico influye en su desplazamiento negativamente. Rodríguez

(2002) asegura que en ausencia del fuego, en altitudes donde puede estar presente el oyamel u otras especies, *Pinus hartwegii* es desplazado.

Si bien el proceso de restauración de la vegetación tras una erupción volcánica es el más lento de los que se llevan a cabo después de cualquier desastre natural (González, 2006) el *Pinus hartwegii* no sólo es una de las especies mejor adaptadas al fuego, también su capacidad de rebrote es significativa.

De acuerdo con González (2006) en lahares como los producidos en el volcán Popocatepetl se han reconocido rebrotes masivos y colonización de plantas por dispersión de semillas en menos de una década. Esto significa que, si bien los individuos de *Pinus hartwegii* han sido afectados por la actividad volcánica, su repoblación es relativamente rápida (Franco Ramos, 2009).

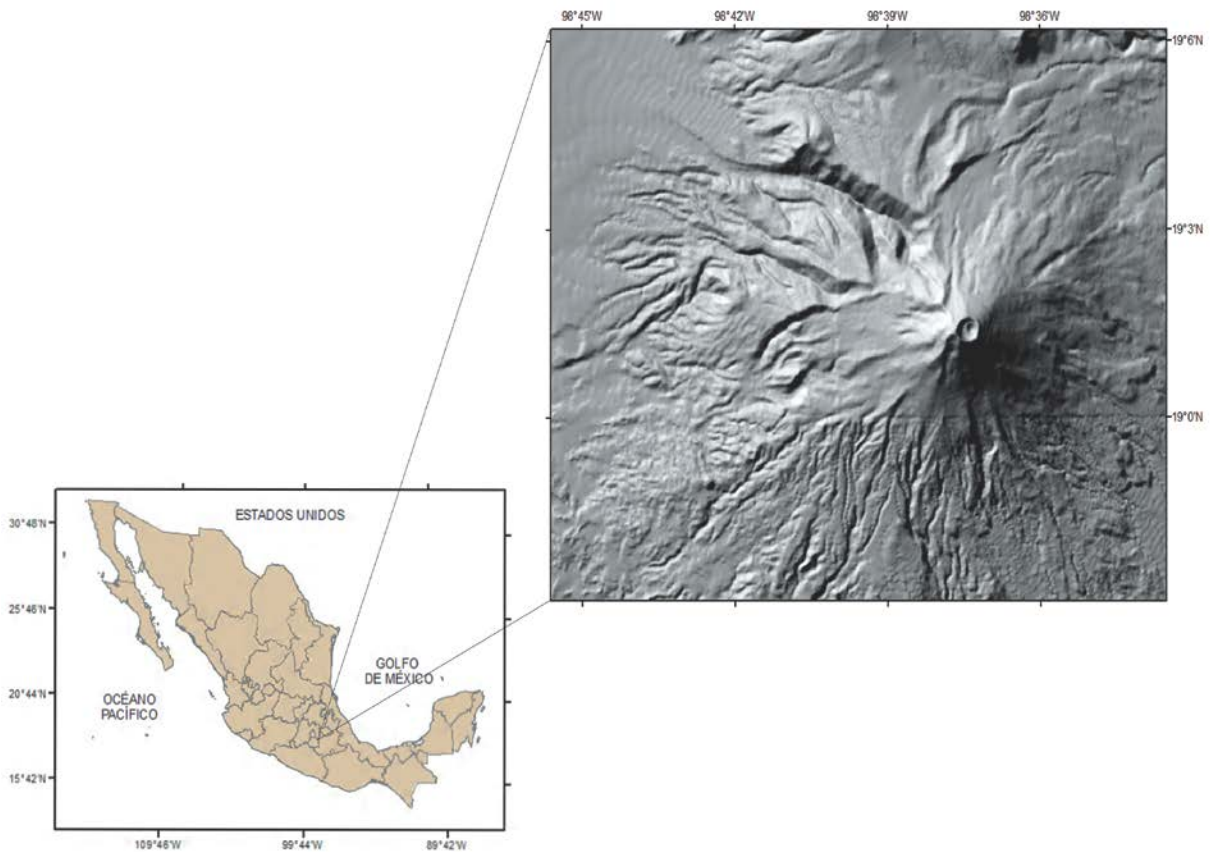
Sin duda alguna, con el análisis multi-temporal de la posición del LSB en las fotografías aéreas respecto a las imágenes de Google Earth y ortofotos digitales de INEGI, se puede establecer la dinámica del *Timberline* y del *Treeline*.

Además con dicha comparación se determina cómo se comporta el bosque sin presencia de actividad volcánica (análisis 1955 a 1995-1999) respecto al período de reactivación del volcán (1995-1999 a 2014) analizando el impacto de la actividad eruptiva en el *Timberline* y en el *Treeline*.

## CAPITULO II. ASPECTOS FÍSICO- GEOGRÁFICOS DEL VOLCÁN POPOCATÉPETL

### 2.1. Localización

El volcán Popocatepetl forma parte de la Sierra Nevada junto con los volcanes Iztaccíhuatl, Tláloc y Telapón. Es el segundo más alto del país con una altitud de 5,452 msnm. Se localiza en el extremo Sur de ésta, aproximadamente a unos 70 km de la Ciudad de México, a 40 km de la Ciudad de Puebla y a menor distancia de numerosas poblaciones (Espinasa, 2007).



**Figura 2. 1** Localización del volcán Popocatepetl en pequeña y gran escala. A la derecha se encuentra el volcán visualizado en el Modelo Digital de Elevación obtenido en este trabajo.

En lengua náhuatl Popocatépetl significa “la montaña que humea” esto alude al hecho de que durante la época prehispánica, los aztecas lo observaron en diversas ocasiones en actividad como en 1363, 1509, 1512, y 1519-1528 (Macías, 2005).

Se encuentra ubicado entre los 19°03′ latitud Norte y 98°35′ longitud Oeste (Tanarro *et al.*, 2004) y ocupa una superficie aproximada de 500 km<sup>2</sup>, entre los estados de México, Puebla y Morelos.

La Sierra Nevada es parte del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVTM), el cual consiste en una serie de volcanes aislados, pequeños grupos de volcanes y grandes cadenas montañosas (Muñoz, 2007), provincia de edad Plio-Cuaternaria que atraviesa el país desde el Pacífico hasta el Golfo de México con orientación NNW-SSE entre los paralelos 19° y 21° N, con una longitud de más de 1,000 km y una anchura de entre 50 y 250 km. (Demant, 1978; 1982; Mooser *et al.* 1996)

De acuerdo con Demant (1978), como el resto de los estratovolcanes de la Sierra Nevada, el Popocatépetl tiene una orientación N-S.

El Popocatépetl es uno de los volcanes más activos del CVTM. Los 25 millones de personas que habitan a menos de 100 km del cráter, lo convierten en uno de los volcanes más peligrosos del planeta (CENAPRED, 2012), motivo por el cuál es un sitio de interés científico, ya que en él interactúan los procesos endógenos y exógenos de manera intensa y frecuente. La posible modificación del LSB a consecuencia de la actividad volcánica iniciada en 1994 es uno de ellos.

## **2.2. Geología**

El volcán Popocatépetl se formó como consecuencia de las fracturas localizadas en el Cinturón Volcánico Transmexicano (Demant, 1982; Almeida *et al.*, 2004). Está compuesto por una alternancia de depósitos piroclásticos y lavas de composición andesítica de hiperstena y

hornblenda (Macías, 2005; Macías *et al.*, 2012). Su desarrollo tiene lugar durante el Neogéno- Cuaternario (Franco Ramos, 2005).

Son tres los materiales que constituyen el basamento sobre el cual se encuentra el volcán. El más antiguo es del Paleozoico, se encuentra a una profundidad de 6 km debajo del cráter principal (Franco Ramos, 2009) por lo que no aflora en superficie. El segundo estrato corresponde al Cretácico, y el último al Terciario, la capa más superficial.

Las características vulcanológicas y petrológicas del volcán muestran que hay al menos dos estructuras volcánicas que anteceden a la actual, por lo que se pueden distinguir las siguientes fases de construcción.

**Fase 1.** El primer edificio volcánico fue el volcán Nexpayantla o volcán primitivo, que de acuerdo con Robin (1984) inicio su construcción hace más o menos 1 millón de años. Una erupción ocurrida hace 200,000 años produjo el colapso de una parte de este volcán y la formación de una caldera (Macías, 2005). Tuvo una serie de emisiones de materiales andesíticos y dacíticos.

**Fase 2.** Al interior de la caldera que dejó el volcán Nexpayantla se inició la construcción de un nuevo volcán conocido como El Fraile, un primer estratovolcán construido por la acumulación de flujos de lava a 1.5 km del cráter actual (Robin, 1984). Este segundo edificio volcánico no fue constante en su estilo eruptivo, su evolución implicó periodos explosivos y efusivos, como lo demuestra la existencia de potentes depósitos de piroclastos (caída y flujo) que se alternan con numerosas coladas de lava. La sobreposición de estos materiales, construyó un volcán de 5,700 msnm (Franco Ramos, 2005; Macías, 2005). El volcán El Fraile se destruyó a partir de tres eventos eruptivos. En principio colapsó aproximadamente hace 50,000 a 30,000 años debido a una erupción paroxísmica de tipo San Vicente misma que destruyó la parte meridional del volcán (Robin 1984; Macías, 2005).

El depósito que generó aquella erupción paroxísmica alcanzó una distancia de al menos 75 km en la vertiente Sur del volcán, emplazándose los escombros hacia el SSW del cráter.



Existen escasas evidencias relacionadas con la existencia del Fraile, debido a las explosiones posteriores y a la dinámica exógena, en especial los avances y retrocesos glaciares del Pleistoceno tardío y del Holoceno (Franco Ramos, 2009).

**Fase 3.** La formación del cono actual conocido como Popocatépetl corresponde a la tercera y última etapa en la evolución del volcán. Fue construido durante los últimos 23,000 años, con alternancia de eventos efusivos y destructivos. De acuerdo con Demant (1984) tuvo una actividad importante durante el Holoceno, a menudo de carácter cataclísmico. Esto incluye la emisión de potentes coladas de lava de composición andesítica y dacítica, entre los 3,800 y 1,200 a.C. (Siebe *et al.*, 1995; Franco Ramos, 2005).

### **2.3. Geomorfología**

Dado que se tienen reconocidas tres fases de evolución del volcán es claro que la morfología del lugar ha variado ampliamente. Sobre todo es de especial interés el último colapso volcánico, debido a que este evento es el que condiciona la expresión actual del relieve (Franco Ramos, 2005, 2009).

El cono del Popocatépetl es asimétrico al Norte, dicha asimetría es el resultado de las últimas dos etapas de evolución del volcán. Desde su base la altura promedio es de 1,750 m y un valor aproximado de 6.7 km de diámetro. Su forma determina un drenaje radial poco desarrollado, relacionado con la juventud del volcán (Franco Ramos, 2005).

La actividad tectónica y volcánica de la región donde se encuentra el Popocatépetl ha propiciado una gran variedad de geoformas, lo anterior como parte de las condiciones geológicas existentes.

Estas estructuras se disponen con un arreglo NNE-SSW y N-S, posición que es determinada por la dirección preferencial de los principales sistemas de fallas (Franco Ramos, 2005).

El cráter del volcán Popocatepetl es elíptico, se reconocen dos sectores que se denominan superior e inferior, el primero tiene una forma de media luna, sus paredes rocosas se inclinan 60° en promedio y sobre ellas ocurren continuos procesos de remoción; las laderas que componen el sector inferior del cráter son rectas y presentan una forma de embudo cerrado, de igual forma se caracteriza por desprendimientos y caídas (Franco Ramos, 2005).

La topografía de la vertiente NW del volcán Popocatepetl se caracterizaba hasta hace unos años por la presencia de un glaciar que en épocas pasadas era de mayores magnitudes. La ladera tiene una inclinación promedio de 30° (Almeida *et al.*, 1994). Las coladas de lava recientes se distribuyen en casi todos los flancos del edificio principal excepto en el sector NW, en donde se encuentran los depósitos de ceniza volcánica.

La topografía es un elemento importante a considerar en el trazado del LSB, sobre todo en la ladera W del volcán debido a las pendientes tan escarpadas que existen ocasionadas por las diversas barrancas que ahí se encuentran, entre ellas Nexpayantla. Así mismo, cabe mencionar que el LSB se emplaza conforme a los depósitos recientes de ceniza en el Oeste del volcán, los cuales son los responsables de que el *Timberline* (Límite Superior del Bosque más o menos cerrado) y el *Treeline* (Límite Superior de los Árboles) se reduzcan en altitud en este sector del Popocatepetl.

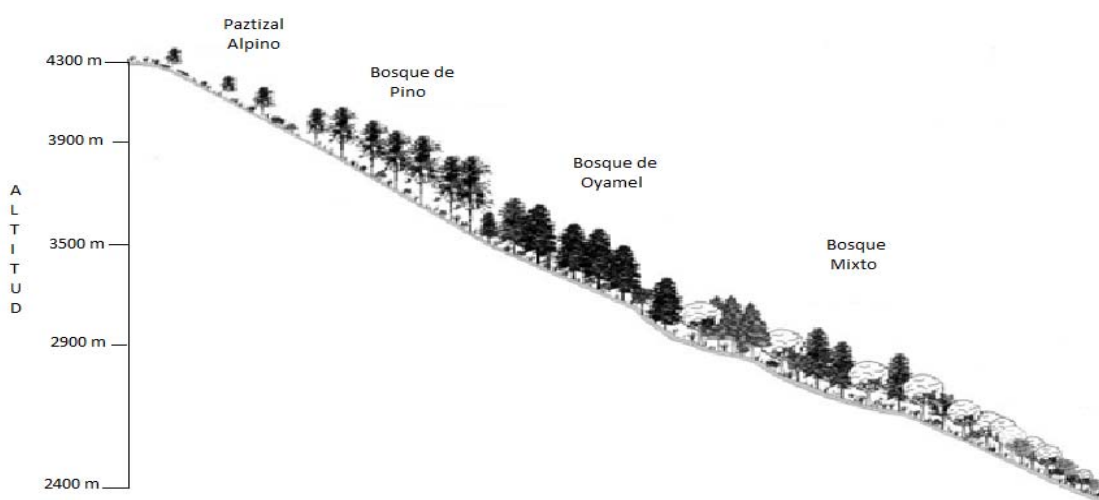
Contemporáneamente a las erupciones explosivas o en etapas intermedias, el Popocatepetl ha tenido actividad de tipo efusivo, flujos de lava originados en el conducto central, los cuales constituyen la morfología del cráter actual, y flujos de lava fisurales de composición andesítica (Macías, 2005).

## **2.4. Vegetación**

Los tipos de vegetación dominantes en la zona de estudio son, de acuerdo a Sánchez y López (2003), el bosque de encino, bosque mixto, bosque de oyamel, bosque de pino y pastizal o zacatonal alpino.

Entre los 2,900 y 3,400 m predominan los oyameles (*Abies religiosa*) que crecen principalmente en las cañadas, mientras que en las laderas son dominantes los pinos y los cedros. Pueden encontrarse también relictos de madroños (*Arbutus xalapensis*) y ailes (*Alnus firmifolia*). Las especies arbustivas y herbáceas no son tan abundantes en esta altitud gracias a que hay una conservación de la vegetación original (Beaman, 1962).

Entre los 3,500 y 3,900 m se encuentra el bosque de pino con abundantes gramíneas amacolladas (Andrés *et al*, 1994). La especie más importante de este estrato arbóreo es el *Pinus hartwegii*, que se mezcla con otros pinos (*Pinus montezumae* y *Pinus ayacahuite*), con abetos y con ailes en las cotas de menor elevación.



**Figura 2. 2 Perfil de las comunidades vegetales de la Sierra Nevada (Modificado de Sánchez y López, 2003).**

El bosque de *Pinus hartwegii* constituye el Límite Superior Arbóreo de las montañas en México (Beaman, 1962; Lauer y Klaus, 1975; Lauer, 1978; Sánchez y López, 2003; Torres Beltrán, 2013).

Cabe destacar que en los volcanes del centro de México, el *Pinus hartwegii* llega a las mayores altitudes registradas para un pino en el mundo, por lo que comúnmente se le conoce como pino de las alturas (Almeida *et al.*, 1994).

En la Sierra Nevada el bosque de esta especie se localiza desde los 3,500 hasta los 4,020 msnm en el caso del Iztaccíhuatl. De acuerdo con Beaman (1962) en el Popocatepetl ocurre a los 3,910 m. Este pino se extiende poco a altitudes de más de 4,000 msnm, aún en condiciones de suelo favorables, debido a la limitante de la temperatura (Torres Beltrán, 2013).

Por encima del Límite Superior del Bosque (LSB) y hasta una altitud cercana a los 4,300 m, Beaman (1962) encontró un tipo de vegetación dominada por gramíneas, que denominó pradera alpina, misma que equivale al pastizal alpino o zacatonal alpino en otros trabajos, estrato que limita con el *Pinus hartwegii*.

En la zona de estudio no se presenta una franja arbustiva de transición entre los bosques montanos altos de coníferas (bosque de *Pinus hartwegii*) y el zacatonal alpino. Aparecen sólo comunidades aisladas con arbustos de *Juniperus monticola* en zonas rocosas protegidas (Almeida *et al.*, 2004).

*Pinus hartwegii* es tolerante a las bajas temperaturas pues se desarrolla en altitudes entre los 3,000 y 4,000 m, prácticamente en todas las áreas montañosas de México que alcanzan tales elevaciones.

Así mismo no tiene competencia con otras especies en su límite superior y coexiste con el zacatonal alpino y es por lo tanto un buen indicador de la temperatura y por ende un buen indicador ecológico ya que es la especie que conforma el LSB en México.

El pino de las alturas resiste frecuentes nevadas; en las cotas de menor elevación, los pinares de esta especie pueden formar asociaciones de estatura elevada (15 a 20 metros) pero por arriba de los 3,500 m de altitud se hace menos denso y fisonómicamente distinto a partir de los 3,900 m. Ahí con frecuencia constituye un bosque achaparrado de 5 a 8 metros de alto,

incluso menos y forma un bosque abierto, lo que correspondería al *Treeline* (Límite Superior de los Árboles) en donde los individuos arbóreos alcanzan en promedio estaturas de 3 metros (Körner, 2012).

De acuerdo con Sánchez y López (2003) son los factores ambientales los que están relacionados con la posición y distribución de la vegetación en la Sierra Nevada, específicamente la altitud y la humedad del suelo son las variables más relevantes y los efectos de los incendios y el pastoreo tienen un efecto menor.

El *Pinus hartwegii* requiere de un período de descanso en invierno, su fase de crecimiento principal es la temporada de verano (Lauer, 1978). Las semillas de este pino se caracterizan por germinar favorablemente a una temperatura mínima de 10°C, óptima de 30°C y máxima de 35°C, a pesar de que la especie es de clima frío requiere temperaturas relativamente altas para su germinación (Aguilar, 2012).

Cabe destacar que hay otros factores ambientales como el suelo, viento y la luz, que inciden en el establecimiento del *Pinus hartwegii*. La topografía también influye en la posición del LSB, de manera que en sitios de topografía uniforme el LSB varía poco en altitud, mientras que en lugares con mucho contraste topográfico la posición del LSB asciende y desciende marcadamente, ajustándose a la geomorfología (Torres Beltrán, 2013).

Von Humboldt y Bondplan (1807, citado por Körner, 2012) intentaron comprender la regularidad de la zonación altitudinal como un fenómeno físico y biológico. Lauer y Klaus (1975) y Lauer (1978) postularon que el *Timberline* (Límite Superior del Bosque más o menos cerrado) de las montañas del centro de México no se asemeja al de las montañas templadas del hemisferio Norte ni al de las montañas tropicales propiamente dichas, sino que está en una zona de transición climática entre ambas, considerando la variación diaria y estacional de los patrones de temperatura (Almeida *et al.*, 1994).

Almeida *et al.* (1994, 2004) observó que hay una tendencia general de las plantas para reducir su talla en altura conforme se asciende en altitud. Así mismo, los continuos depósitos

de materiales piroclásticos, principalmente cenizas, han condicionado la geomorfología del volcán y la cubierta vegetal a lo largo de su historia reciente.

Cabe mencionar que la vegetación en un volcán activo está condicionada por los efectos que una erupción pueda tener en la misma. Sin embargo, en la zona del volcán Popocatepetl y luego de los diferentes fenómenos eruptivos observados en los últimos 20 años se ha observado que ocurre colonización relativamente rápida del *Pinus hartwegii* en la ladera Norte del volcán (Capítulo I).

Lo anterior es muestra de la capacidad de regeneración que tiene el pino de las alturas. No obstante, es necesario identificar el impacto de la actividad volcánica en la posición del *Timberline* y del *Treeline* de un volcán activo como lo es el Popocatepetl, respecto a uno inactivo como lo es el Iztaccíhuatl.

## **2.5. Clima**

En el volcán Popocatepetl al igual que en el Iztaccíhuatl y otras montañas de considerable altitud en México no existen estaciones meteorológicas a 4,000 msnm y por encima de esta cota. Körner (2012) asegura que, de pretenderse hacer un estudio del LSB, es necesario extrapolar los datos existentes de otras estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio a analizar, así como estudiar el *Timberline* y el *Treeline* en períodos cortos de tiempo.

Para el caso del análisis del LSB del volcán Popocatepetl se han utilizado datos generales del clima basándose en la clasificación climática de Köppen modificada por García (1988). Así mismo, se han extrapolado los resultados de otros estudios como el del zacatonal alpino del Pico de Orizaba por Lauer y Klaus (1975), y por Lauer (1978), en el que se demostró la oscilación diaria de la temperatura, fenómeno básico de los climas de alta montaña del trópico.

De acuerdo con Lauer y Klaus (1975) la temperatura media anual a la altitud del LSB es de 5°C, el promedio de temperatura de enero (mes más frío) es de 3°C, mientras que el de

agosto (mes más cálido) de 7°C; la oscilación diaria media anual que existe es de 6°C con 210 días de heladas que registrarían temperaturas negativas. Dichos datos fueron obtenidos de cuatro estaciones climáticas colocadas alrededor del LSB del Pico de Orizaba, y debido a que este volcán se encuentra a la misma latitud del objeto de estudio se considera que el Popocatepetl presenta condiciones similares.

Las observaciones fenológicas realizadas en el estudio de Lauer y Klaus (1975), muestran que hay una relación entre el comienzo del período de crecimiento del *Pinus hartwegii*, entre marzo y abril, con la disminución del número de días con heladas. Es de esperar que el período de crecimiento termine cuando el número de días con heladas aumenta entre octubre y noviembre. De acuerdo con lo anterior, puede concluirse que el factor limitante del crecimiento del *Pinus hartwegii* son las bajas temperaturas.

Un aumento en los días con heladas y por lo tanto disminución de la temperatura propicia que *Pinus hartwegii* no crezca debido a la relación que la viscosidad del agua tiene respecto a la temperatura; la viscosidad aumenta conforme lo hace la temperatura, por lo tanto, la viscosidad disminuye a medida que aumenta la altitud y la temperatura disminuye; cuando la temperatura se reduce a 0 °C o menos, la viscosidad disminuye limitando la difusión del agua a través de las membranas celulares de las plantas.

Para datos de humedad se retoma el estudio de García-Romero (1998) para la Sierra de las Cruces y que se puede extrapolar para el volcán Popocatepetl. Así mismo, se considera la clasificación higrotérmica de Lauer y Stiehl (1973).

De acuerdo con García-Romero (1998) por debajo de los 2,400 m es el área con menor precipitación, con una pluviosidad inferior a 800 mm al año; conforme se asciende en altitud la pluviosidad aumenta, superándose los 1,200 mm anuales a 3,000 m. Sin embargo, por encima de los 3,400 m la precipitación deja de aumentar y se reduce gradualmente al aumentar la altitud, lo cual se refleja en el ecotono en el que pasan a predominar especies con mayor tolerancia a la falta de humedad como es el caso del *Pinus hartwegii*.

Lo anterior demuestra que el incremento de la pluviosidad conforme aumenta la altitud no es una característica de las altas montañas del centro de México, ya que a partir de cierto nivel altitudinal la precipitación disminuye.

Por lo tanto, la tendencia general en la variación de las precipitaciones en el Popocatepetl en función de la altitud, se puede establecer como en un incremento de las mismas, partiendo de 800 mm en partes bajas del altiplano alrededor de los 2,000 msnm hasta alcanzar un máximo en torno a los 1,350 mm anuales aproximadamente a los 3,400 msnm (Beaman, 1962; Muñoz, 2006) a partir de esta cota se produce una estabilización o una reducción ligera de la pluviosidad media anual, de modo que a los 4,000 m de altitud la precipitación es de 800 a 900 mm (Torres Beltrán, 2013) y continúa disminuyendo paulatinamente.

Paralelamente a lo anterior Lauer y Stiehl (1973) realizaron un mapa basado en datos climáticos, de temperatura, de humedad y vegetación, obteniendo con esto una clasificación higrotérmica, expresada en números romanos, para diferentes altitudes de la región Puebla-Tlaxcala.

El piso "helado" con el número IX corresponde al clima higrotérmico semihúmedo, que se extiende de los 3,300 a los 4,000 m, con una temperatura media anual entre 5° y 9°C, y 7 meses de humedad.

De los 4,000 a los 4,800 m de altitud, el clima higrotérmico así como la cantidad de meses húmedos siguen correspondiendo a los del piso IX. Sin embargo, a esta altitud es nombrado piso "subnevado", identificado con el número X, con una temperatura media anual de 5° a 1°C y con vegetación correspondiente al zacatonal alpino.

Así mismo, ambos autores sostienen que el número de días con nieve aumenta de acuerdo a la altitud, lo cual es corroborado por Beaman (1962) quien establece que por encima de los 4,300 m la nieve es la forma habitual de las precipitaciones durante los meses de junio, julio y agosto. No obstante, esta forma de precipitación es poco frecuente y de corta duración.



De acuerdo con lo dicho hasta ahora y basándonos en la carta climática de CONABIO (basada a su vez en la modificación hecha por García a la clasificación climática de Köppen) por debajo de los 4,000 m el tipo de clima en la zona de estudio corresponde a Cb' (w2) que es semifrío subhúmedo con lluvias en verano, temperatura media anual entre 5 y 12° C.

Se puede encontrar también el tipo de clima E (T) CHw correspondiente al clima frío con lluvias en verano, la temperatura media anual oscila entre -2° y 5° C, el primer valor corresponde a un altitud aproximada de 5,100 m, mientras que el segundo es característico a los 4,000 m de altitud.

García (1988) obtiene sus datos de la estación climática del Campamento Hueyatenco que se encontraba ubicado en las laderas occidentales del Iztaccíhuatl a una altitud de 3,557 m. Beaman (1962) por su parte reporta para esta altitud una temperatura media de 7.7°C.

Las condiciones que se tienen de clima para la porción central de México a los 4,000 m de altitud es de 5°C (temperatura media anual) y la media del mes más cálido es de 6.4°C.

El comportamiento meteorológico es el típico de las zonas de alta montaña, con marcadas oscilaciones térmicas diarias alrededor del punto de congelación a lo largo de todo el año (Almeida *et al.*, 2004).

Conforme se asciende en altitud la temperatura disminuye por lo que en las elevaciones más prominentes del país se pueden encontrar glaciares, teniendo como límite la zona nival a 4,950 m en el caso del Popocatepetl, excepto en la vertiente sur, en donde no existe una capa de nieve permanente (Almeida *et al.*, 1994). A esta altitud el tipo de clima EFHw es frío con lluvias en verano, con temperatura media anual menor a -2° C, la temperatura del mes más frío y del mes más caliente es inferior a los 0° C.

Cabe mencionar que los glaciares en el Popocatepetl han retrocedido en las últimas décadas al ascender gradualmente la línea de las nieves. Antes de que el volcán entrara en actividad, los glaciares estaban retrocediendo en respuesta entre muchas otras cosas a cambios climáticos globales y regionales (Delgado-Granados, 1996; 1997).

En años recientes los cambios en el glaciar del Popocatepetl se deben al incremento en el flujo de calor debido a un aumento de la actividad del volcán. A fines del año 2000, 6 años después del inicio de la erupción, el glaciar prácticamente estaba extinto, reducido a masas aisladas de hielo (Delgado-Granados *et al.*, 2007). Es perceptible a través de las imágenes utilizadas en este estudio cómo se ha reducido el área del glaciar, de tal modo que puede observarse el decremento en las ortofotos (período 1995-1999) respecto a las fotografías aéreas (1955) (Figura 2.3), así mismo con las imágenes de satélite del Servicio de Imágenes del Planeta Google Earth™ de 2014.

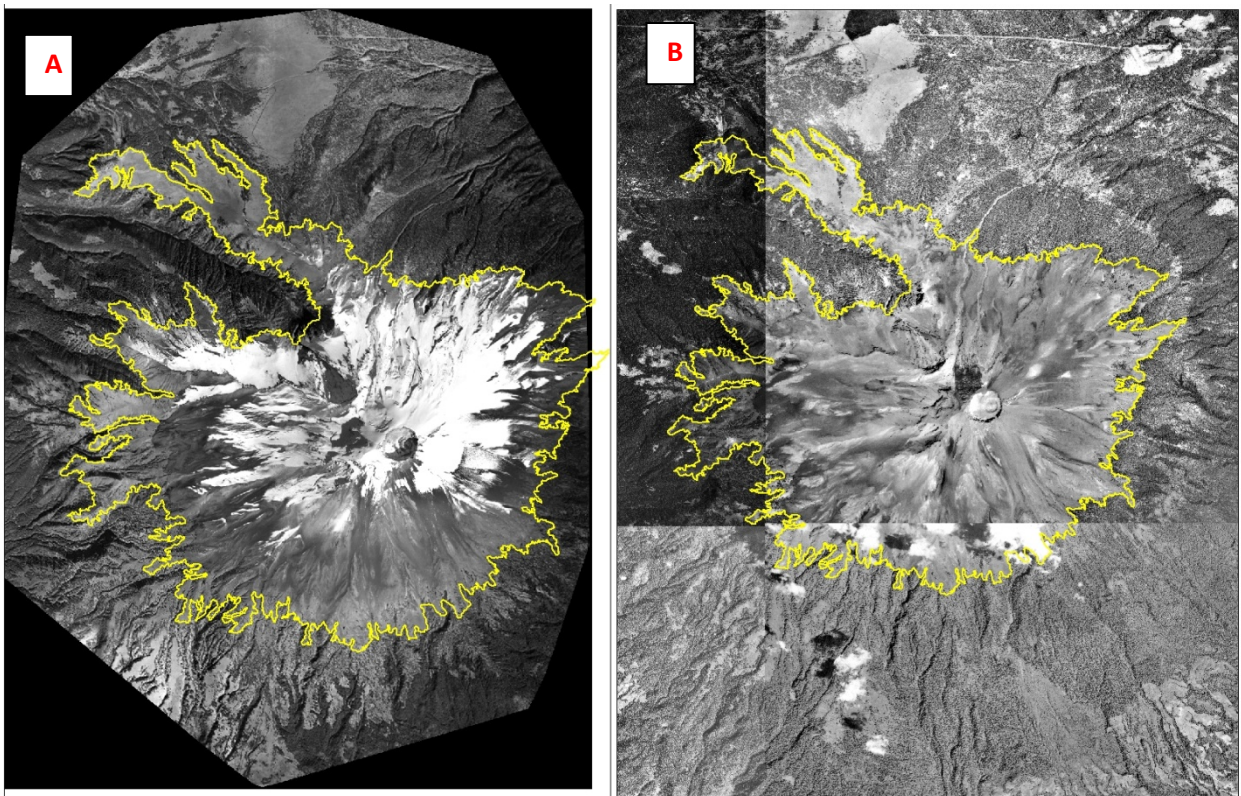


Figura 2. 3 A. Mosaico realizado con las fotografías aéreas del año de 1955 utilizadas en el presente trabajo, en amarillo el *Timberline* de 1955. B. Mosaico de ortofotos del período de 1995-1999, en amarillo se observa el *Timberline* de ese año. La comparación entre imágenes indica una reducción importante del área cubierta por hielo glaciar y nieve entre los dos períodos de análisis.

El gradiente térmico de la región fue calculado en  $-0.5^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m de ascenso altitudinal por Lauer (1978); en  $-0.6^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m por Lauer y Stiehl (1973); en  $-1^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m por Muñoz (2007). Para la zona del Iztaccíhuatl fue calculado en  $-0.6$  por cada 100 m por Torres Beltrán (2013) y por Andrés *et al.* (2004) en  $-0.69^{\circ}\text{C}$  por cada 100 m.

Para las montañas del centro de México el condicionante térmico determina el aspecto xerofítico que presenta la vegetación durante la mayor parte del año. Así, el límite altitudinal de la vegetación corresponde a la isoterma de  $3.5^{\circ}\text{C}$  y se estima un 85% la frecuencia de días con heladas, mientras que en torno a la cota de 3,950 m, en la zona del ecotono entre el zacatonal alpino y el bosque de *Pinus hartwegii*, la temperatura media anual es de  $6^{\circ}\text{C}$  y alrededor de 55-60% de los días presentan temperaturas inferiores a los  $0^{\circ}$  (Almeida *et al.*, 2004).

## 2.6. Suelo

Para conocer las características del suelo en la zona de estudio se ha empleado la carta de CONABIO la cual se basa en datos del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

En la zona de estudio predomina el litosol de textura gruesa, un suelo de poco desarrollo con profundidad de 10 a 20 cm. Así mismo y a menores altitudes se encuentran el regosol dístico (de textura media) y el regosol eútrico, en este último el material parental está conformado por detritos y arenas volcánicas de las partes altas (Almeida *et al.*, 2004).

El LSB se emplaza prácticamente en los tres tipos de suelos ya mencionados (Figura 2.4). Sin embargo, se puede observar un mayor predominio del regosol dístico, casi en todas las laderas del volcán a excepción de la vertiente Sur. El regosol eútrico por su parte sólo se localiza en la vertiente NW y a menores elevaciones, en cambio el litosol se encuentra en las mayores altitudes y en segundo grado de predominancia.

Los tipos de suelo en el volcán Popocatépetl se han desarrollado a partir de formaciones geológicas compuestas principalmente de piroclastos procedentes de las últimas fases eruptivas del volcán, presentándose en cada uno de éstos un alto porcentaje de ceniza volcánica sobre una capa de piedra pómez (Almeida *et al.*, 1994).

El permafrost es un límite para el ascenso del LSB, sobre él se han realizado diversos estudios. Sin embargo, en las montañas tropicales, y sobre todo en volcanes (en muchos casos activos), el conocimiento del comportamiento térmico así como la influencia de la actividad volcánica en la distribución del permafrost es escaso o nulo.

La actividad periglaciaria (alternancia de hielo y deshielo diarios) empieza por encima de los 3,900 msnm y el permafrost a partir de los 4,600 m, propiamente en las montañas más elevadas del país: Iztaccíhuatl, Popocatépetl y Pico de Orizaba (Heine, 1975, citado por Andrés *et al.*, 2010). Gournov (1978, citado por Andrés *et al.*, 2010) propone la existencia del permafrost a partir de los 4,500 msnm, así Guodong (1983, citado por Andrés *et al.*, 2010) localiza el límite del permafrost para la latitud entre los 10° y 20° N a una altitud de 4,600 m, el permafrost aislado con variaciones según su orientación está localizado a partir de los 4,640 msnm (Andrés *et al.*, 2010).

La temperatura del suelo es un límite ecológico natural para el crecimiento de la vegetación (Torres Beltrán, 2013) por lo que para conocer datos de temperatura del suelo se retomaron los datos de Andrés *et al.* (2010) que sí bien son expresados para el volcán Iztaccíhuatl, pueden extrapolarse para el Popocatépetl, asumiendo que se encuentran en la misma latitud y a una corta distancia (15 kilómetros). Así mismo se hace referencia a un trabajo más de Andrés *et al.* (2012) sobre las temperaturas del suelo del volcán Popocatépetl, y, aunque no se cuenta con los datos, se hace uso de las conclusiones que se presentan.

Lauer y Klaus (1975) indican que a 30 cm de profundidad la temperatura es similar a la media que puede encontrarse en el ambiente. Por otra parte, Lauer (1978) sugiere que la temperatura media anual y la oscilación de la misma disminuye con la profundidad (corroborado por Almeida *et al.*, 2004).

De tal modo que los datos de temperatura del suelo mostrados por Andrés *et al.* (2010) a 4,137 msnm a una profundidad de 10 cm indican que la temperatura mínima absoluta es -3.87°C (diciembre el mes más frío) mientras que 22.31°C (máxima absoluta) en julio el mes más cálido, con una oscilación de 26.18°C a lo largo del período 2002-2003. Por otro lado y a la misma altitud pero a 80 cm de profundidad, la temperatura mínima absoluta es de 2.15°C (marzo mes más frío) y en julio (mes más cálido) de 8.65°C (máxima absoluta), la oscilación de la temperatura es menor con 6.5°C.

Por otra parte a los 4,890 msnm a una profundidad de 10 cm la media de la temperatura es de 0.63 con una oscilación de 28.37°C y a los 30 cm de -0.58°C (temperatura media) con una oscilación de 3.55°C.

Hay una tendencia a aumentar la temperatura media anual del suelo (TMAS) a los 4,137 m de altitud en donde la temperatura promedio a los 10 cm de profundidad es de 4.47°C y a 80 cm de 5.02°C, es decir, que a mayor profundidad, por lo que respecta a esta altitud, la temperatura aumenta por cada 10 cm en 0.078°C. Sin embargo, esta tendencia se rompe a los 4,890 msnm (por encima del LSB) donde ocurre lo contrario al disminuir -0.6°C cada 10 cm de profundidad (Andrés *et al.*, 2010) esto como posible existencia de un punto frío a esta profundidad explicado por la presencia del permafrost.

## Mapa de tipo de suelos

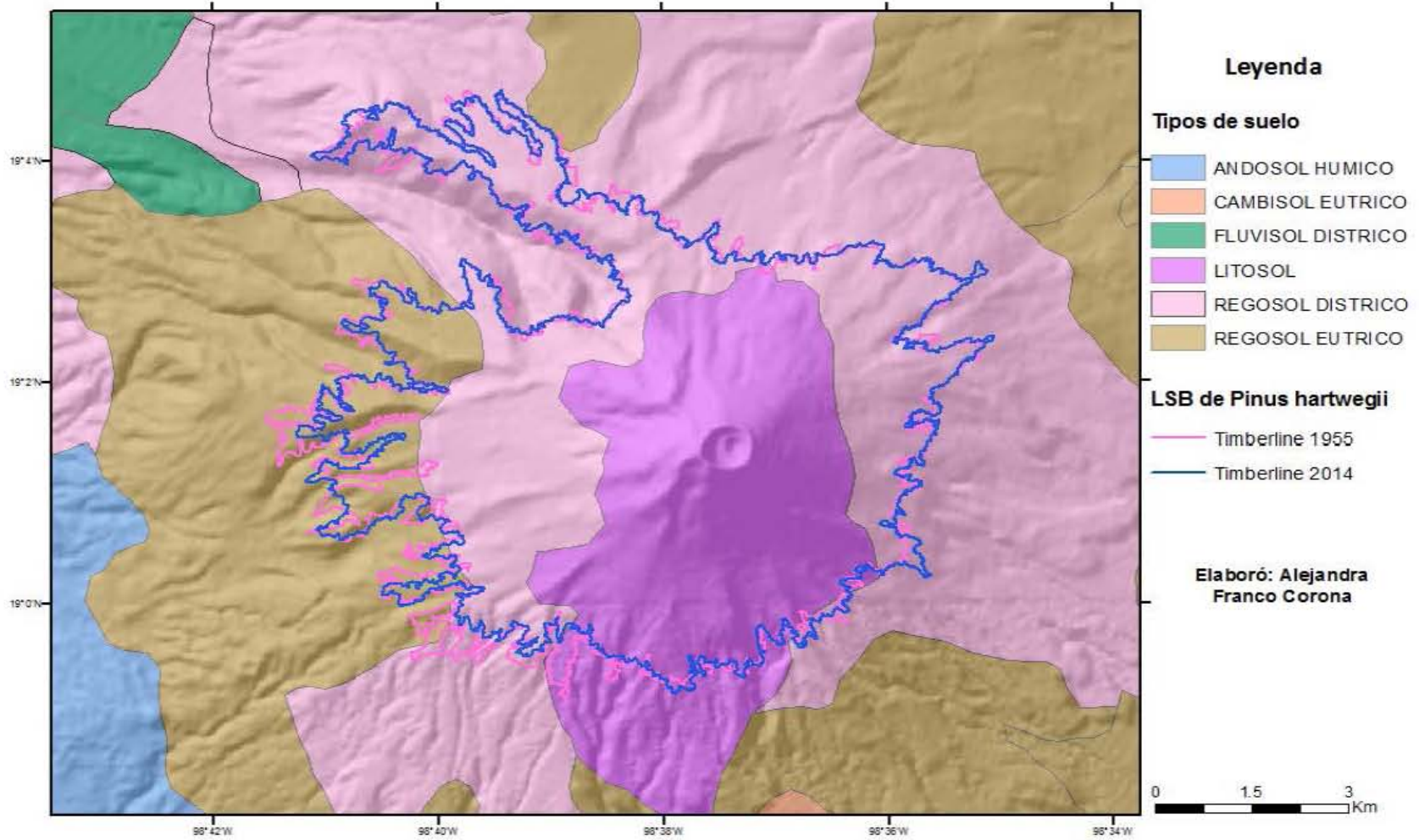


Figura 2. 4 Mapa de los tipos de suelos del volcán Popocatépetl.

Lauer (1978) sugiere que a 70 cm de profundidad a la altura del *Timberline* (4,000 m) la temperatura es de 5°C y a 50 cm la temperatura no muestra una fluctuación y la media anual se mantiene igual.

Las altitudes intermedias, entre los 4,200 y los 4,700 msnm, deberían ser consideradas como las más dinámicas en cuanto a procesos periglaciares, debido a que se encuentran por encima del LSB y por debajo de los glaciares. Sin embargo, respecto al número de ciclos de hielo y deshielo se muestra que estos son mínimos reduciéndose considerablemente, dejando de existir incluso a 30 cm de profundidad.

En el caso del Popocatepetl y si bien se ha mencionado, en el presente periodo eruptivo se ha observado que el glaciar que estaba alojado en la vertiente Norte del volcán, ha sufrido una intensa ablación (Andrés *et al.*, 2012) misma que ha alimentado los diversos lahares (1997, 2001) que se han originado desde el inicio de la actividad volcánica.

Los resultados preeliminares del estudio en el Popocatepetl, indican que existe una cierta acción de la energía geotérmica en el suelo con respecto a los procesos periglaciares y a la distribución del permafrost en el suelo. Por ejemplo, los modelos de distribución de permafrost en el Popocatepetl, obtenidos a partir de los datos de temperatura del suelo, indican la existencia de permafrost discontinuo a partir de los 5,100 y 5,200 metros, límite que se encuentra unos 200 m más elevado que en el Iztaccíhuatl (Andrés *et al.*, 2012).

### CAPITULO III. TRAZADO DEL LÍMITE SUPERIOR DEL BOSQUE

La metodología utilizada para la realización de este trabajo siguió tres fases. La primera se refiere a la recopilación de la información, misma que sirve para argumentar y desarrollar el trabajo. La segunda fase es la descrita en el presente capítulo y que consiste en el procesamiento de datos y manejo de las imágenes, así como la obtención del trazado del Límite Superior del Bosque (LSB) para las fechas consideradas. La última fase se refiere al análisis estadístico que se aplicó a la base de datos de cada límite (Figura 3.1).

#### 3.1 Trazado de límites

Para conocer los cambios del LSB que el volcán Popocatepetl ha sufrido en los últimos 59 años (temporalidad de análisis) fue necesario comparar el *Timberline* (Límite Superior del Bosque más o menos cerrado) de 1955 respecto al del período de 1995-1999 y 2014. El año de 1955 fue elegido como punto de partida debido a que las fotografías aéreas de ese año son las más antiguas de las que se disponen. Además, son las mismas que Beaman (1962) utilizó en este estudio pionero sobre la posición del *Timberline*.

Beaman (1962) sólo trazó el *Timberline*, mientras que en la presente tesis se hacen trazos originales para el *Timberline* pero también para el *Treeline* (Límite Superior de los Árboles) y se reconocen algunos individuos del *Tree species line* (individuos arbóreos por encima del *Treeline*) para 1955. Además se toman en cuenta todas las vertientes del Popocatepetl, y las barrancas que Beaman no consideró. Así mismo, en este estudio en la ladera W del volcán, el *Timberline* se distingue del *Treeline*, puesto que Beaman (1962) en esta vertiente considera el *Treeline* como *Timberline* debido a lo “abierto del bosque”, con lo cual la altitud promedio del LSB varía respecto a la obtenida por Beaman.

Para los años 2014 y 1995-1999 se han realizado trazos originales del *Timberline* y *Treeline*, a la vez que se han reconocido individuos en el *Tree species line*, sobre todo en el año 2014 debido a la resolución que se obtiene de las imágenes de satélite del Servicio de Imágenes del Planeta Google Earth™.



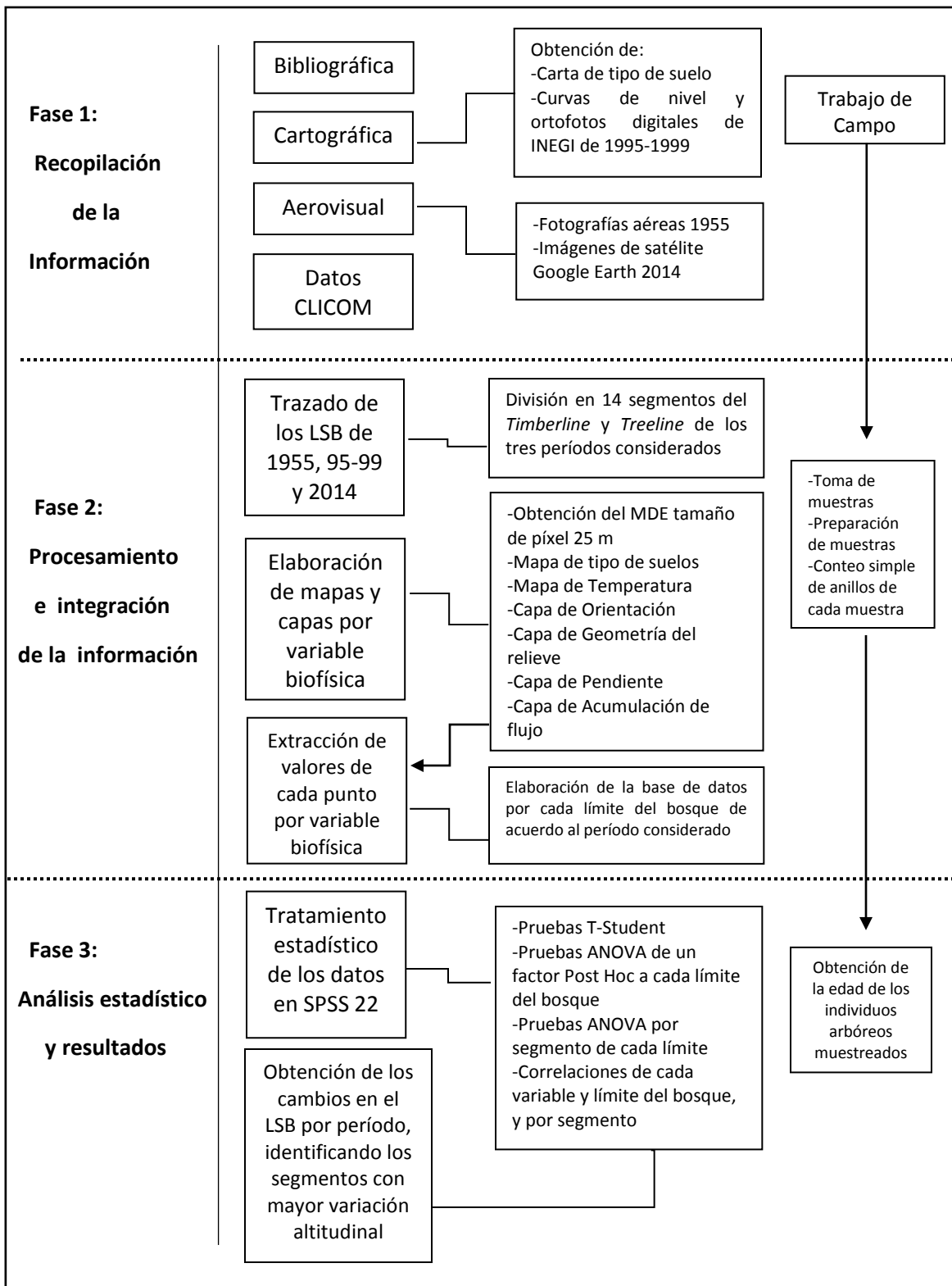


Figura 3. 1 Esquema metodológico en donde se observan las fases de investigación de esta tesis.

Para el trazo del LSB de 1955 se utilizaron e interpretaron las fotografías aéreas verticales del vuelo que la Compañía Mexicana Aerofoto realizó en diciembre de 1955. El archivo pertenece a la Fundación ICA, que tiene disponible el material del levantamiento del Estado de México con número de obra 1230. Los números de las fotografías aéreas utilizadas son: 17, 19, 20, 30, 60, 61, 62 y 64, todas ellas obtenidas como copias digitales en alta resolución a partir del negativo original.

Estas fotografías fueron georreferenciadas en un software de SIG, ArcGis 10.1, se recortaron y utilizaron las partes más céntricas posibles debido a que en los extremos las fotografías presentan mayor distorsión y error. Cada una fue georreferida utilizando para ello ortofotos digitales de INEGI.

Posteriormente se realizó un mosaico con las fotografías aéreas dentro de ArcGis 10.1 y se trazaron el *Timberline* y el *Treeline* sobre él.

El *Timberline* fue trazado empleando el criterio de Beaman (1962) como el Límite Superior del Bosque más o menos cerrado pero continuo de crecimiento vertical de los árboles, que es el mismo que el de Lauer y Klaus (1975) y Lauer (1978).

Como ya se ha mencionado Beaman (1962) no trazó el *Treeline*. Sin embargo, se considera importante tener este otro límite para conocer la dinámica del LSB, así mismo, cuando la resolución espacial lo permite, se identificó el *Tree species line*. En su conjunto, el trazo de estos otros dos límites permite conocer no sólo la dinámica del bosque, sino también la movilidad de los individuos arbóreos por encima del bosque cerrado.

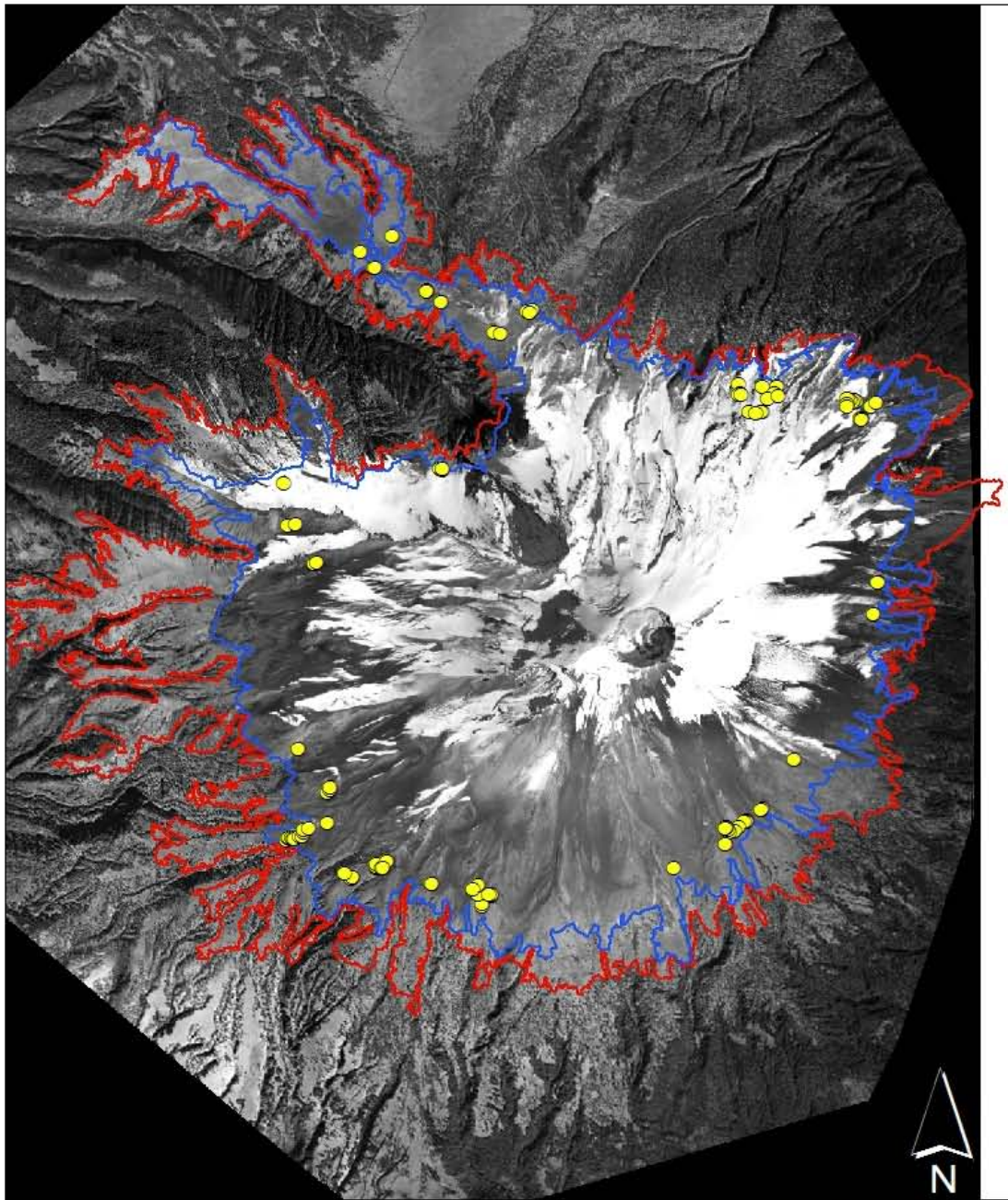
Las curvas digitales de INEGI fueron utilizadas como referencia al considerar el trazo de los límites, sobre todo al distinguir los individuos que se encuentran por encima del bosque cerrado, el *Treeline*. A su vez, éste último límite fue la base para ubicar a los individuos arbóreos en las cotas de mayor elevación (*Tree species line*).

Se hizo un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con las curvas digitales de INEGI utilizando la herramienta *Spatial Analyst Tools- Interpolation -Topo to raster*.

Cabe mencionar que las curvas de nivel tuvieron que ser corregidas debido a que la zona del volcán Popocatepetl abarca 4 ortofotos y 4 mapas topográficos de curvas de nivel, donde éstas últimas en muchos casos no se unen en los límites de mapas, se intersectan en valores diferentes de altitud. Lo anterior es explicado por el cambio de Datum (de NAD27 a ITRF92) en el período que abarcan las ortofotos de INEGI (1995-1999) Por lo anterior se tuvieron que unir las curvas con su correspondiente valor altitudinal por medio de una topología en ArcGis 10.1. Una vez realizada la corrección fue posible realizar el MDE.

El *Treeline* fue marcado siguiendo el criterio de Lauer y Klaus (1975), de Sveinbjörnsson (2000) y Körner (2012) (Capítulo I). Ambos límites (*Timberline* y *Treeline*) se trazaron en formato de línea, y para obtener sus valores altitudinales se transformaron a puntos. Posteriormente se extrajo del MDE el valor de altitud correspondiente a cada punto en ambos trazos, por medio de la herramienta *Spatial Analyst Tools- Extraction- Extraction values to points* en ArcGis 10.1.

Se obtuvieron un total de 12,034 puntos para el *Timberline* y 5,451 para el *Treeline* para el año de 1955, fue posible identificar 99 individuos arbóreos del *Tree species line* (Figura 3.2).



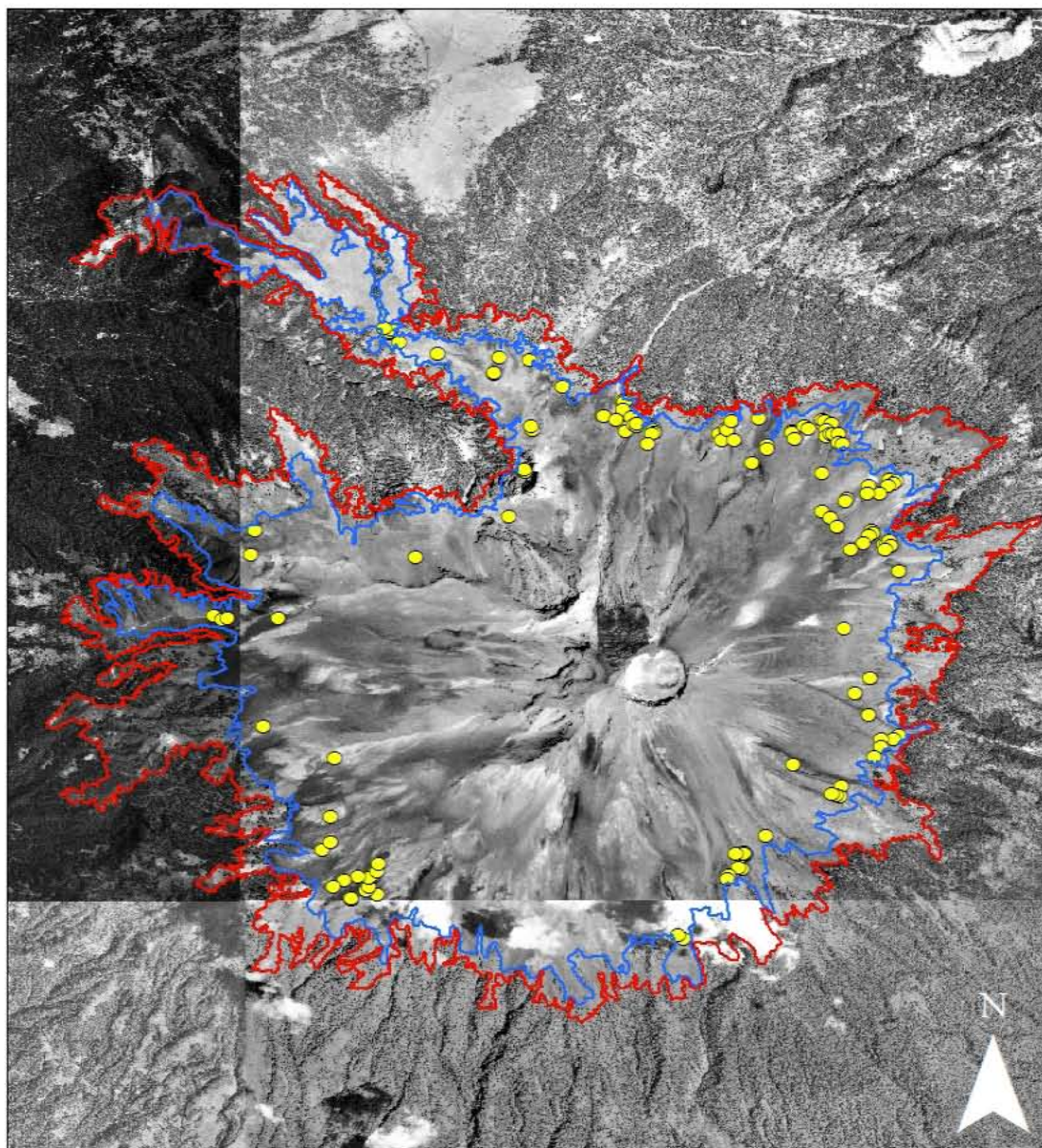
**Leyenda**

- Timberline 1955
- Treeline 1955
- Tree species line 1955

Elaboró: Alejandra Franco Corona

Figura 3. 2 Mosaico realizado a partir de la georreferenciación de las fotografías aéreas de 1955 realizada en ArcGis 10.1. Se observa el trazo del LSB.

Para el período de 1995-1999 se utilizaron las ortofotos digitales de INEGI del período mencionado. El *Timberline* y el *Treeline*, fueron trazados siguiendo el mismo criterio que para el trazo de los límites de 1955 (Figura 3.3).



**Leyenda**

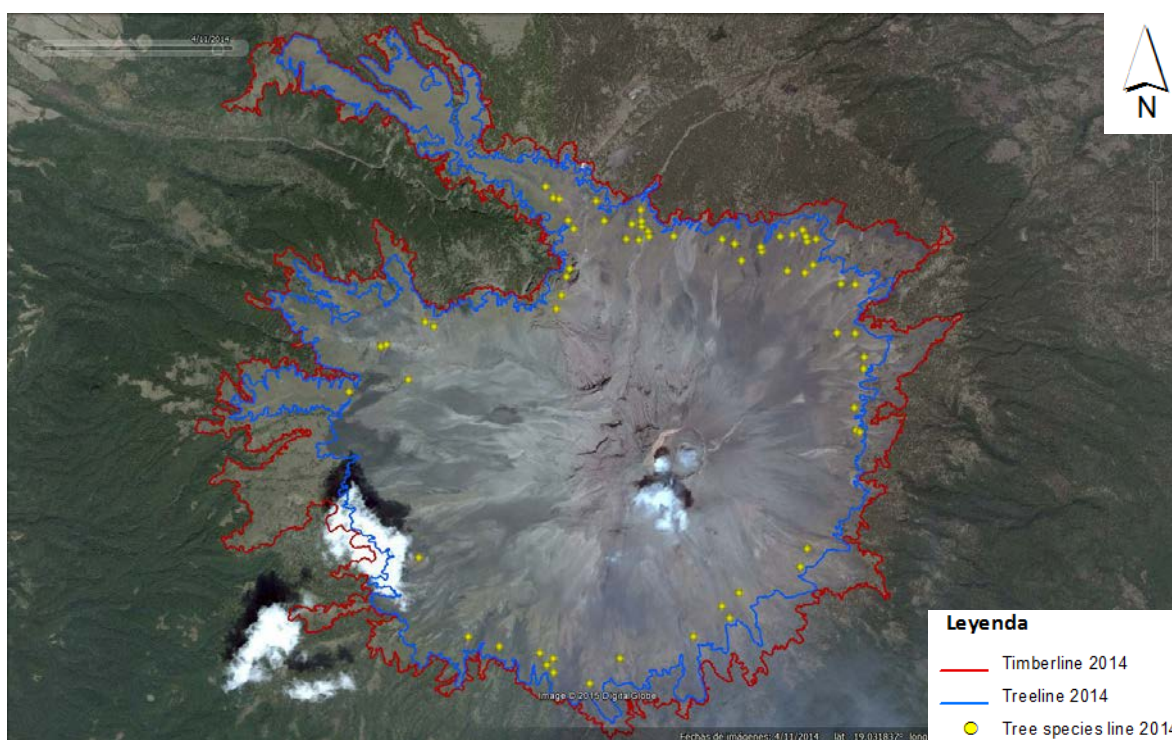
- Timberline 95-99
- Treeline 95-99
- Tree species line 95-99

Elaboró: Alejandra Franco Corona

**Figura 3. 3 Mosaico con las ortofotos digitales de INEGI de 1995-1999. En este material se encuentra el trazo del LSB para el período mencionado.**

Ambas líneas o límites fueron transformados a puntos, en total se obtuvieron 11,212 para el *Timberline* y 4,076 para el *Treeline*; los puntos se cargaron al MDE para la extracción de sus respectivos valores altitudinales con la herramienta *Extraction- Extraction values to point*. En cuanto al *Tree species line* fueron identificados 137 individuos arbóreos.

Por último, para la fecha más reciente se utilizaron las imágenes satelitales del Servicio de Imágenes del Planeta Google Earth™ del 11 de abril de 2014. Al igual que los dos períodos anteriores se siguió el mismo criterio para trazar el *Timberline* y el *Treeline*. Así mismo y debido a la resolución que se logra obtener de las imágenes del Servicio de Imágenes del Planeta Google Earth™, fue posible distinguir los individuos correspondientes al *Tree species line* (Figura 3.4). Se obtuvieron en total 11,313 puntos para el *Timberline* y 7,025 para el *Treeline* y se identificaron 215 individuos arbóreos en el *Tree species line*, cada punto de cada límite con su respectiva elevación.



Elaboró: Alejandra Franco Corona

**Figura 3.4 LSB en imágenes satelitales del Servicio de Imágenes del Planeta Google Earth™ de abril de 2014. Los trazos se realizaron directamente en esta aplicación.**

La diferencia y la cantidad de puntos entre el *Timberline* de los períodos abarcados así como del *Treeline* se pueden comparar estadísticamente; las medidas de tendencia central y las pruebas estadísticas fueron obtenidas a través del programa SPSS versión 22.

### **3.2 Variables biofísicas, extracción de valores**

Para generar la base de datos con el valor de cada variable biofísica considerada se realizaron capas en ArcGis 10.1. Las capas obtenidas fueron las siguientes:

#### **Modelo Digital de Elevaciones (MDE)**

Se obtuvo a partir de las curvas de nivel digitales de INEGI con una equidistancia de 20 metros, con la herramienta *Spatial Analyst Tools- Interpolation -Topo to Raster* con un tamaño de celda de píxel de 25 m. Esta capa es la base para la creación de los demás ráster y/o capas generados.

#### **Capa de orientación (Aspect)**

Para tener los valores de orientación de los puntos de cada límite en las laderas del Popocatepetl se obtuvo la capa *Aspect* con la herramienta *Spatial Analyst Tools- Surface-Aspect* en ArcGis 10.1.

La orientación se posiciona en el sentido de las agujas del reloj desde 0 a 360° iniciando y terminando en el Norte, con lo cual se forma un círculo completo, dividido en ocho segmentos: N, NE, E, SE, S, SW, W, NW. Esta capa muestra la dirección de la pendiente descendente de la tasa de cambio máxima en un valor de cada celda hacia sus vecinas (ESRI, 2013). Dicho de otra forma es la dirección de la pendiente, o bien el ángulo de

orientación con respecto al Norte, de tal modo que si se obtiene un valor negativo, -1, el área es plana y por lo tanto no tiene dirección.

Debido a que el valor que se obtiene de orientación en ArcGis 10.1 es respecto al azimut, y sólo nos muestra la dirección de la pendiente, se generaron fórmulas en Excel para obtener el valor transformado correspondiente a la orientación de cada punto, distinguiendo por un lado el componente Norte-Sur y por otro lado el componente Este-Oeste. El propósito es producir mapas de orientación que puedan servir mejor en la interpretación del LSB, con valores que claramente indiquen la proximidad a los componentes N, S, E y W.

La primer fórmula es respecto al Norte y Sur, donde un valor más cercano a 0° es más próximo a la orientación Norte y un valor más cercano a 180° indica su posición al Sur, esta fórmula no considera las orientaciones E y W.

Para los valores orientados al Este y Oeste, la fórmula produce valores cercanos a 0° para orientaciones al Oeste y valores cercanos a 180° para orientaciones al Este; esta fórmula no considera las orientaciones Norte y Sur.

### **Capa de Pendientes (Slope)**

Se obtuvo en ArcGis 10.1 a partir de la herramienta *Spatial Analyst Tools- Surface- Slope*, a través de ella se puede analizar la variación de la pendiente en el terreno. Esta capa identifica la tasa de cambio máximo en el valor de altitud, desde cada celda ráster a sus vecinas (ESRI, 2013). El valor de la pendiente es expresado en grados.

Se ha utilizado el criterio de De Pedraza *et al.* (1996) definiendo siete intervalos, mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno, mientras el valor sea más alto, más escarpado es.



La erosión se incrementa conforme lo hace el grado de la pendiente, como resultado de los respectivos incrementos en velocidad y volumen de la escorrentía superficial. Así mismo, la propagación del fuego es directamente proporcional respecto a la pendiente, es decir, a mayor pendiente, mayor propagación del fuego.

### **Capa de geometría del relieve (Curvature)**

Uno de los procesos que mejor se identifican en el relieve es la creación de arroyos y ríos, los cuales juegan un papel muy importante en la modelación del relieve ya que facilitan la erosión o la acumulación de material en el terreno. Para hacer este cálculo se generó la capa de geometría del relieve con la herramienta *Spatial Analyst Tools- Surface- Curvature* en ArcGis 10.1, la cual calcula la forma de la pendiente en las laderas aportando información sobre la concavidad o convexidad de la superficie en un punto dado.

Las dos direcciones más importantes son la de máxima pendiente (morfología en perfil) y la perpendicular a la dirección de dicha pendiente (morfología en planta).

Una morfología en perfil con valor negativo indica que la superficie es convexa, un valor positivo que es cóncava, mientras que los valores cercanos a cero indican una superficie recta. En cuanto a la morfología en planta, un valor positivo corresponde a una superficie convexa, uno negativo a una cóncava, mientras que los valores cercanos a cero indicarán de igual manera que la superficie es recta.

La concavidad y la convexidad se asocian a la acumulación de flujo y a la dispersión del mismo respectivamente.

### **Capa de radiación solar**

Esta capa se obtuvo de la caja de herramientas de ArcGis 10.1 en *Spatial Analyst Tools- Solar Radiation- Area Solar Radiation*. Esta herramienta permite cartografiar los efectos de

la radiación solar en un área determinada considerando sólo la insolación (radiación solar entrante) misma que se obtiene al sumar la radiación solar difusa y directa. Se expresa en unidades de vatios hora por metro cuadrado (WH/m<sup>2</sup>).

Para su cálculo se utilizaron los valores predeterminados con 32 direcciones azimutales (para una topografía compleja) y un intervalo de cielo de 200.

La insolación que se recibe del Sol es la principal fuente de energía que impulsa muchos de los procesos físicos y biológicos que existen en la Tierra. Además de la latitud, la topografía es un factor principal que determina la variabilidad espacial de la insolación (ESRI, 2013), de tal modo que un cambio en la altitud, la pendiente y la orientación en el relieve son parámetros que influyen en la cantidad de insolación que se recibe en una zona determinada, variando con ello el clima, patrones térmicos del aire, la ablación de la nieve, humedad del suelo e incluso la luz disponible para diversos procesos biológicos como la fotosíntesis, de ahí su importancia al considerarla en el análisis del LSB.

### **Capa de acumulación del flujo**

Para generar esta capa es necesario primero que nada rellenar las imperfecciones existentes en la superficie del Modelo digital de Elevaciones mediante la herramienta en ArcGis 10.1 *Spatial Analyst Tools- Hydrology- Fill*. Con ésta se obtiene que las celdas en el ráster que están en depresiones o sumideros alcancen el nivel del terreno. Estas zonas pueden ser identificadas también a partir de *Spatial Analyst Tools- Hydrology- Sink*. Lo anterior se hace con el objetivo de determinar de forma adecuada la dirección de flujo.

Teniendo la certeza de que los errores por los sumideros o depresiones han sido corregidos se genera una nueva capa en *Spatial Analyst Tools- Hydrology- Flow Direction* que determina la dirección de flujo. A partir de este último ráster se genera la capa de nuestro interés en *Spatial analyst Tools- Hydrology- Flow Accumulation*, en ella se

representa la acumulación de todas las celdas que fluyen sobre las celdas de pendientes descendentes.

Uno de los usos del ráster generado es el de determinar la cantidad de humedad en una cuenca hidrológica predeterminada asumiendo que no existe evapotranspiración e infiltración. Considerar la acumulación de flujo es importante porque la germinación de las semillas de *Pinus hartwegii* exige humedad en la cantidad apropiada. De tal modo que esta especie se establecerá en zonas de buen drenaje pero sin rebasar la humedad requerida para su crecimiento.

### **Capa de temperaturas**

No hay estaciones meteorológicas por encima de los 4,000 msnm, por lo que para conocer las condiciones climáticas de la zona de estudio se requirió el uso de las estaciones más cercanas al volcán.

Utilizando la base de datos climatológicos CLICOM (2014) de las estaciones elegidas y depurando los mismos, fue posible obtener un gradiente térmico de la zona del volcán Popocatepetl y construir así el mapa de temperaturas.

Hay tres estaciones meteorológicas en poblados cercanos al Popocatepetl, la primera de ellas es la de San Pedro Nexapa, seguida de Amecameca de Juárez y por último la de San Pedro Benito Juárez. Dichas estaciones no sólo se eligieron por su cercanía al volcán, sino también por el año de datos efectivos que tienen, que rondan poco más de 30. Así mismo, se consideraron otras cuatro estaciones que si bien no se encuentran tan cercanas a la zona de estudio se ubican en un radio cercano: Huejotzingo, Alponocan, Atlixco y San Andrés Calpan, esta última con 23 años efectivos de datos registrados.

Una vez depurados los datos de CLICOM de cada estación elegida, se compararon y corroboraron con las normales climatológicas como un segundo parámetro de información.

Cada estación fue ubicada en el MDE con el cual se extrajeron sus valores correspondientes en altitud (Tabla 3.1).

De las bases de datos depuradas se obtuvieron la temperatura media anual de los años de datos registrados de acuerdo a cada estación (Tx\_anual\_histórica), la temperatura promedio mínima (Tx\_mínima), la temperatura media de verano (Tx\_verano), la media de invierno (Tx\_invierno) y la temperatura promedio del período de crecimiento del *Pinus hartwegii* (Tx\_PC\_PH).

Debido a que sólo serían consideradas 7 estaciones climatológicas y éstas se encuentran por debajo de los 3,000 m se tomaron en cuenta las estaciones utilizadas por Andrés *et al.* (2010) y, aunque estas corresponden al Iztaccíhuatl, se han considerado para este estudio dado que el volcán Popocatepetl tiene condiciones ambientales similares a su volcán vecino debido a que se encuentran en la misma latitud.

Nombre de la Estación	Clave	Municipio	Latitud	Longitud	Altitud (msnm)
Amecameca de Juárez	15007	Amecameca	-98.77	19.14	2456
San Pedro Nexapa	15103	Amecameca	-98.73	19.08	2619
San Pedro Benito Juárez E-1	21193	Atlixco	-98.55	18.92	2140
Atlixco	21012	Atlixco	-98.45	18.92	1898
Huejotzingo	21046	Huejotzingo	-98.4	19.16	2266
San Andrés Calpan	21167	Calpan	-98.5	19.1	2432
Alponocan	17060	Tetela del volcán	-98.68	18.93	2749
Izta 4	Izta 4		-98.64	19.17	4890
Izta 5	Izta 5		-98.64	19.17	5020

**Tabla 3. 1 Estaciones meteorológicas que fueron utilizadas para la obtención de las temperaturas promedio y la realización del mapa de temperaturas de la zona de estudio, en la tabla se muestra la localización y altitud de cada estación.**

Las estaciones nombradas "Izta 4" e "Izta 5" se encuentran por arriba de los 4,000 msnm (Andrés *et al.*, 2010) y aunque sólo corresponden a un período de registro de un año (2005-2006) fueron consideradas e integradas junto con los datos obtenidos de CLICOM aunque sin poder obtener los otros promedios, los datos considerados corresponden a la temperatura del "aire". Se realizó una tabla con los valores correspondientes a cada promedio considerado, así como el valor correspondiente en altitud de cada estación y se analizó en el programa IBM SPSS 22.

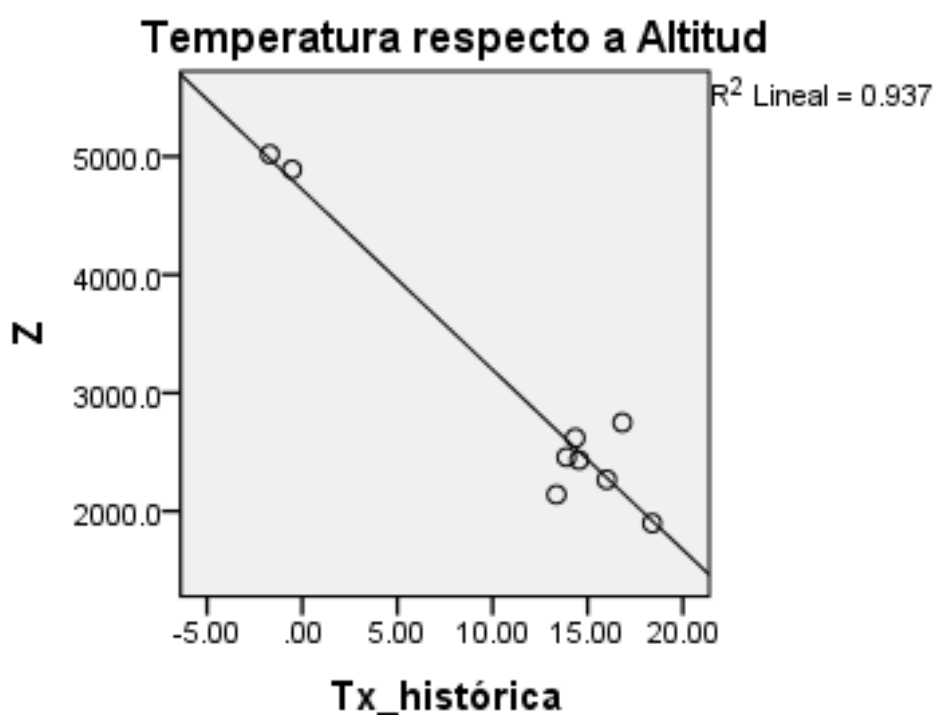
En el programa SPSS 22 se realizó una regresión lineal con intervalos de confianza en un 95% y de esta forma se obtuvo una fórmula con la cual se generó el mapa de temperaturas con base en la altitud (Tabla 3.2).

Estación	Tx_histórica	Tx_mínima	Tx_verano	Tx_invierno	Tx_PC_PH
Amecameca de Juárez	13.89	6.20	15.04	11.81	15.04
San Pedro Nexapa	14.35	7.22	14.62	13.09	14.62
San Pedro Benito Juárez E-1	13.36	6.91	13.42	12.24	13.42
Atlixco	18.39	10.52	19.28	16.65	19.28
Huejotzingo	16	7.51	17.47	13.59	17.47
San Andrés Calpan	14.55	7	15.56	12.63	15.56
Alponocan	16.82	9.97	16.45	16	16.45
Izta 4	-0.54				
Izta 5	-1.7				
Fórmula	$y=29.764+(-0.06)x$	$y=10.513+(-0.01)x$	$y=22.517+(-0.03)x$	$y=16.319+(-0.01)x$	$y=22.517+(-0.03)x$
Correlación	-0.968	-0.193	-0.411	-0.169	-0.411

**Tabla 3. 2 Temperaturas promedio obtenidas a partir de la depuración de datos de cada estación empleada. En esta tabla se encuentran las fórmulas y las correlaciones derivadas que sirvieron para establecer el gradiente de temperatura de la zona de estudio.**

Aunado a esto se realizó una correlación de Pearson por cada promedio de temperatura. El dato arrojado nos indica qué promedio se correlaciona mejor con la altitud, y en este caso fue la temperatura media histórica, con una correlación negativa de -0.968.

Lo anterior indica que la temperatura promedio histórica (variable dependiente) desciende conforme aumenta la altitud (variable independiente). Esto se corrobora además con un gráfico de dispersión de puntos en donde se observa la recta negativa, es decir, descendente respecto a la altitud (Figura 3.5).



**Figura 3. 5 Gráfica que representa la regresión lineal del promedio de temperatura histórica respecto a la altitud. La nube de puntos representa los promedios de temperatura histórica de cada estación empleada.**

Además en el gráfico se puede observar un  $R^2$  de 0.937 lo que significa que existe un 93.7% de probabilidades de que la temperatura (promedio histórico) disminuya conforme aumenta la altitud, es decir, una relación inversamente proporcional.

Por lo tanto se seleccionó la fórmula correspondiente a la temperatura media histórica ya que es la que guarda la mejor correlación con la variable independiente y siguiendo la fórmula de la recta, la cual se reinterpreto para los fines de este trabajo, se obtuvo la fórmula que permitió generar el mapa de temperaturas interpoladas.

Está fue:

$$y = 29.764 + (-0.06) x$$

Donde "x" corresponde a la variable independiente (altitud) y "y" a la variable dependiente temperatura. En ArcGIS 10.1 con la herramienta *Spatial Analyst Tools-Raster Calculator* se introdujo la fórmula obteniendo como resultado el ráster de temperaturas interpoladas para la zona del volcán Popocatepetl (Anexo A).

Así mismo, se obtuvo el gradiente térmico de 0.64°C por cada 100 metros de ascenso altitudinal, la fórmula que se utilizó fue la misma que empleó Torres Beltrán (2013) y es:

$$\left( \frac{Y_1 - Y_2}{X_2 - X_1} \right) = \frac{Td}{Ad}$$

En donde:

$Y_1$  = Temperatura máxima

$Y_2$  = Temperatura mínima

$X_2$  = Altitud mínima

$X_1$  = Altitud máxima

$Td$  = Diferencia entre la temperatura (expresada en °C)

$Ad$  = Diferencia entre la altura (expresada en metros)

## Capa de tipo de suelos

El mapa de tipo de suelos se obtuvo a partir del shape de Edafología de INIFAP-CONABIO escala 1: 250,000. Se reproyectó en ArcGis 10.1 y sólo se consideró la zona que abarcan las ortofotos para conocer el tipo de suelo de la zona de estudio (Capítulo II).

### 3.3 Segmentos del LSB y extracción de valores para cada límite

Una vez que se obtuvo cada capa se extrajo el valor de cada punto de cada LSB correspondiente a cada una de las variables consideradas en las capas. De tal manera que se tiene un valor por cada punto de las tres fechas trabajadas (1955,1995-1999 y 2014) del *Timberline* y del *Treeline*. Para el caso del *Tree species line* sólo se obtuvo el promedio altitudinal de estas fechas ya que sólo interesa saber la altitud a la que se encuentran los individuos arbóreos de este límite por encima del *Treeline* y del *Timberline*.

Para la extracción de los valores por capa se usó ArcGis 10.1 siguiendo la ruta *Spatial Analyst Tools- Extraction- Extraction Values to Points*, lo que da como resultado una nueva columna al final de la tabla de atributos de cada capa.

Por lo tanto, cada uno de los puntos del *Timberline* y del *Treeline* tiene un valor de Altitud, Orientación, Pendiente, Morfología en perfil, Morfología en planta, Radiación Solar, Acumulación del flujo y Temperatura, así como la clave que identifica a cada punto para los tres fechas, es decir, para 1955, 1995-1999, y 2014.

Los valores de cada capa fueron trasladados a una tabla en Excel para su depuración y organización, con lo cual se generó una base de datos para el *Timberline- Treeline* de 1955, para el *Timberline- Treeline* de 1995-1999 y para el *Timberline- Treeline* de 2014.

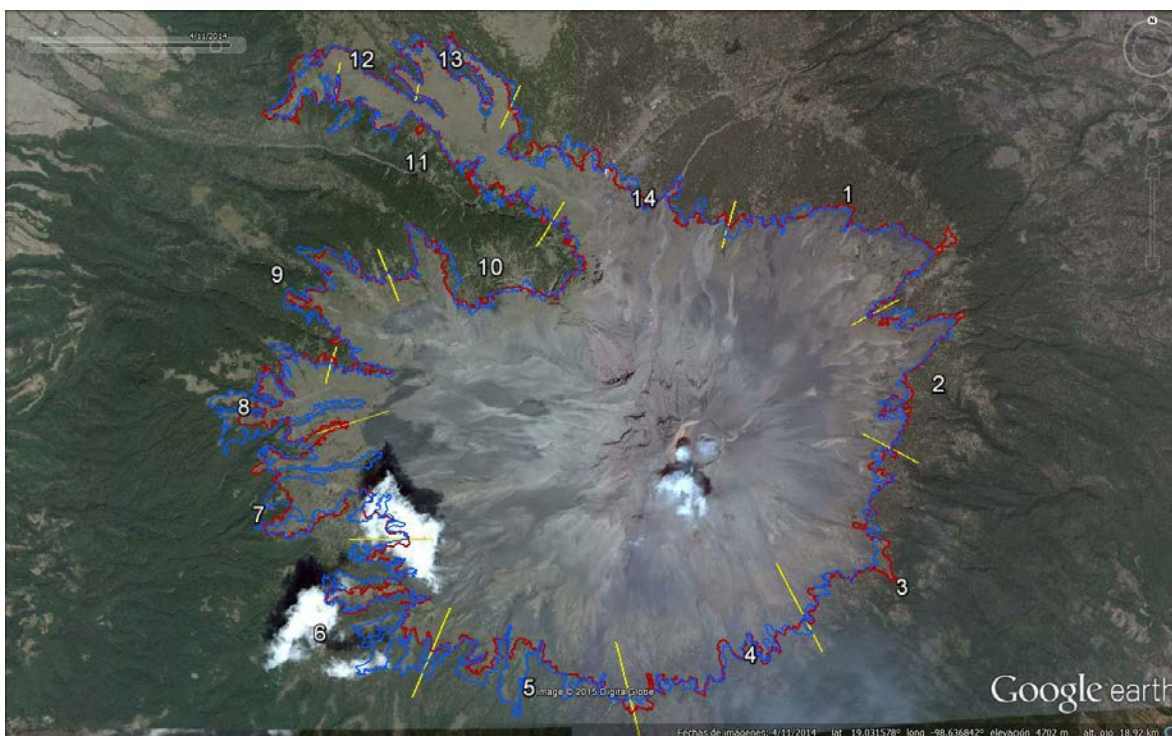
La base de datos obtenida tenía valores para más de 10,000 elementos para el caso del *Timberline* y para el *Treeline* de más de 5,000 elementos. Por esta razón y para un análisis



a escala detallada del LSB se segmentaron cada uno de los límites (*Timberline* y *Treeline*) en ArcGis 10.1 a través de *Editor- Start Editing- Split* en 14 segmentos.

Cada uno de los límites fue seleccionado en formato de línea dividiéndose en 14 partes. Posteriormente se cargaron los límites en formato de puntos para contabilizar la cantidad de cada uno de ellos por segmento, así como el punto de inicio y fin, y se organizaron en Excel obteniendo una nueva tabla para cada límite del bosque de 1955, 1995-1999 y 2014.

Para visualizar los límites segmentados se cargaron en Google Earth y se trazaron líneas perpendiculares para enfatizar la división del *Timberline* y *Treeline* de las tres fechas por segmento (Figura 3.6).



**Figura 3. 6** Imagen de Google Earth en donde se observa el LSB y los 14 segmentos realizados. En rojo el *Timberline* de 2014 y en azul el *Timberline* de 1955. Las líneas amarillas representan los cortes por segmento.

El criterio para establecer la división en 14 partes es para obtener un mejor análisis del LSB por la escala de detalle dada la cantidad de segmentos que parten el LSB, además, la

división fue de manera homogénea pero segmentando las zonas en donde se observaba un mayor cambio del *Timberline* o del *Treeline* entre la misma fecha y entre fechas distintas, mismas que al hacer la comparación permitirían establecer los cambios altitudinales del LSB.

### **3.4 Análisis estadístico aplicado al LSB del Popocatépetl**

La base de datos fue organizada en Excel cargando cada valor de los puntos de cada límite de las tres fechas, de modo que se tiene una columna con un valor de cada capa obtenida en ArcGis 10.1 así como la clave de cada punto.

Para hacer el análisis a escala detallada se añadió además una nueva columna que indica el segmento al que corresponde el punto de cada límite en la base de datos. Como hay 14 segmentos, la columna nombrada "Segmento" tiene un valor del 1 al 14 por cada punto del *Timberline* y *Treeline* de 1955, 1995-1999 y 2014 (Anexo B1).

Para poder hacer las pruebas estadísticas en SPSS 22 se añadió una nueva columna denominada "Grupo" que representa cada uno de los tipos de LSB en la base de datos general. Los grupos fueron nombrados de la letra A a la F, en donde cada letra indica el límite al que pertenece, es decir:

Grupo A= *Timberline* 1955

Grupo B= *Treeline* 1955

Grupo C= *Timberline* 1995-1999

Grupo D= *Treeline* 1995-1999

Grupo E= *Timberline* 2014

Grupo F= *Treeline* 2014

Gracias a que cada punto de cada tipo del LSB tiene una posición de acuerdo a su "Segmento", es posible hacer comparaciones de cada uno de los segmentos del *Timberline*

y del *Treeline* para cada fecha considerada, analizando la diferencia de medias de cada tipo de LSB.

El análisis de la base de datos fue realizado en el SPSS 22 a través de la obtención de los estadísticos descriptivos, es decir, las medidas de tendencia central así como de pruebas paramétricas que incluyen correlaciones, comparación de medias (pruebas T-Student), pruebas para muestras independientes, pruebas ANOVA o de comparaciones múltiples.

Lo primero que se realizó fue una prueba de homogeneidad para conocer la normalidad de los datos a través de un histograma de frecuencias, una vez comprobada la normalidad de los datos, se prosiguió a obtener los estadísticos descriptivos de cada límite (Anexo B2).

Posteriormente se llevó a cabo la prueba T-Student para comparar las medias arrojadas por cada LSB y su respectiva fecha (Anexo B3).

Para comparar las medias de cada segmento y a su vez de cada fecha y límite, se llevaron a cabo pruebas ANOVA o de comparaciones múltiples de un factor Post Hoc de Tukey, con un nivel de significancia de 0.05. Esta prueba nos permite comparar una variable independiente que esté agrupada bajo un mismo factor, en este caso la media de segmentos de un mismo límite. Esta prueba además facilita, entre otras cosas, la comparación de la diferencia de medias de los segmentos de cada LSB. Así mismo se realizó una prueba ANOVA a la base de datos para obtener la diferencia que guarda cada límite del bosque respecto a todos los demás límites (Anexo B4).

Las correlaciones fueron realizadas de igual forma en SPSS 22 para conocer que variable biofísica del *Timberline* y *Treeline* de cada fecha se relaciona mejor con la altitud. Las correlaciones fueron hechas primero para cada límite y luego para cada segmento (Anexo B5). Se compararon los 14 segmentos de cada LSB y entre segmentos, es decir, el segmento 1 del *Timberline* de 1955 con el resto de los 13 segmentos, y después el segmento 1 del *Timberline* de 1955 con el segmento 1 del *Timberline* de 2014 y 1995-1999. Lo anterior se realizó con cada límite *Timberline* y *Treeline* y con cada segmento de cada límite.

Se seleccionaron los segmentos con mayor cambio para identificar ascensos y descensos del LSB, así mismo se identificó qué variable biofísica se encuentra mayormente correlacionada con los cambios en altitud observados de cada segmento.

Para el *Tree species line* sólo se llevaron a cabo los estadísticos descriptivos para conocer la posición promedio de cada individuo arbóreo por encima del *Treeline*, así como una prueba T-Student para conocer la diferencia de las medias entre las tres fechas consideradas y obtener un acercamiento a la dinámica que siguen los individuos de *Pinus hartwegii* por encima del bosque cerrado.

### 3.5 Dendrocronología

Con el apoyo de la técnica de dendrocronología que de acuerdo con Stokes y Smiley (1996) es el estudio de la secuencia cronológica de los anillos de los árboles, con el propósito de conocer la edad del arbolado se obtuvieron algunas muestras de árboles de la especie de *Pinus hartwegii* que se encontraban por encima del *Treeline*, además de hacer un reconocimiento en campo del trazado del LSB en la ladera Norte del volcán Popocatepetl cerca de Tlamacas.

El muestreo de individuos fue aleatorio. Sin embargo, y gracias a la localización en un sistema de posicionamiento global (GPS Garmin) de cada pino muestreado, con precisión de  $\pm 5$  m, se sabe que éstos pertenecen a lo que se ha considerado como *Tree species line*.

Con la aplicación de la técnica se pudo determinar la edad de los individuos muestreados y así relacionar la actividad volcánica con el posible impacto en el LSB, además de conocer la dinámica que ha tenido el bosque en los últimos años. Para visualizar los pinos muestreados, los puntos GPS de su localización fueron transferidos a Google Earth (Figura 3.7). Algunas de las muestras obtenidas se colectaron en el cruce de la barranca Tenenepanco-Huiloac, y como lo que interesaba era saber la edad de los pinos (y no desarrollar una cronología maestra), en algunos individuos sólo se extrajo una muestra, a la cuales se le contaron los anillos para determinar la edad.

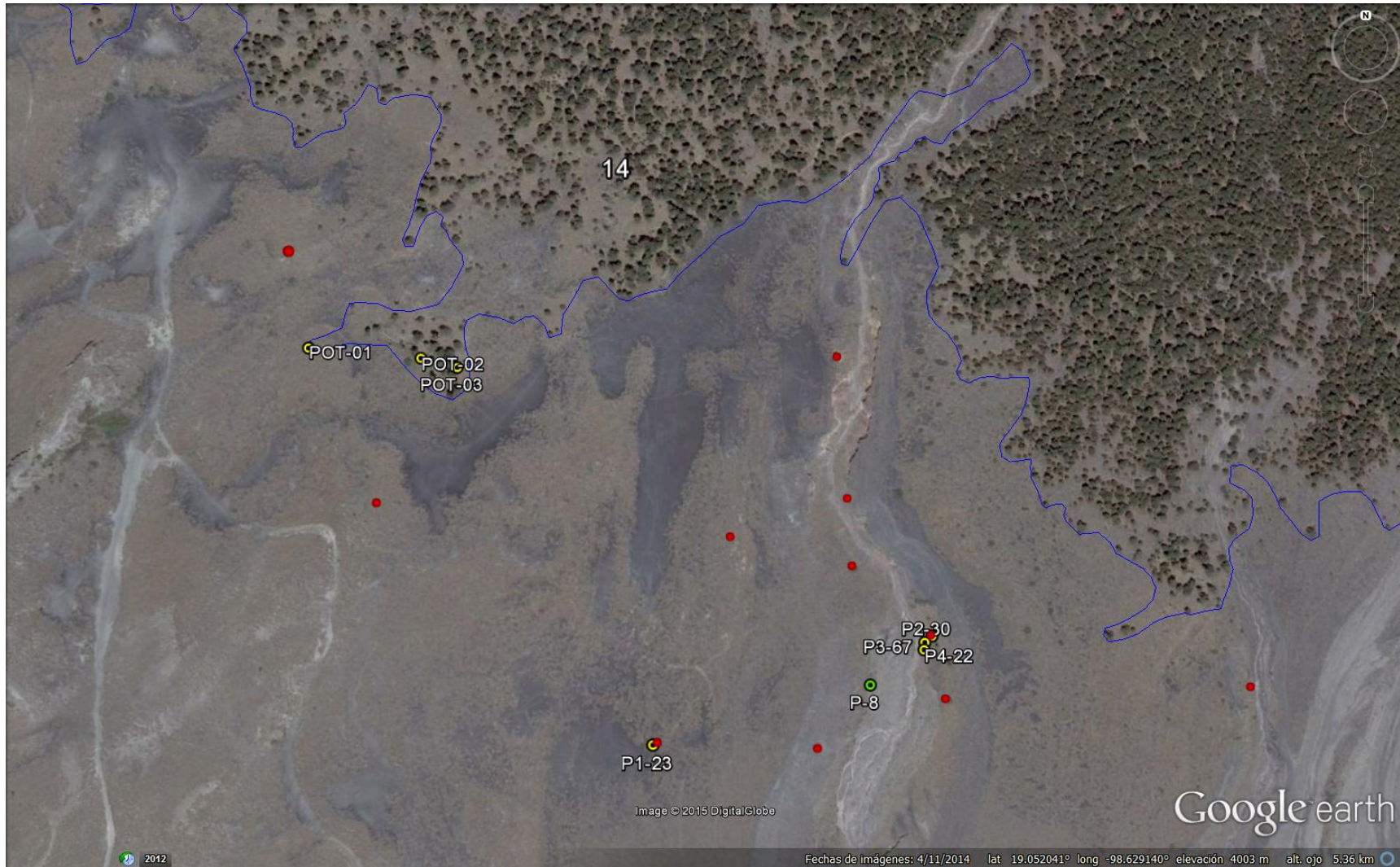


Figura 3. 7 Se observa la localización de los pinos muestreados (puntos amarillos) en la ladera Norte del Popocatepetl. La línea azul representa el *Treeline* y los puntos rojos individuos del *Tree species line* de 2014.

## CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Cambios recientes en el LSB, 1955 a 2014

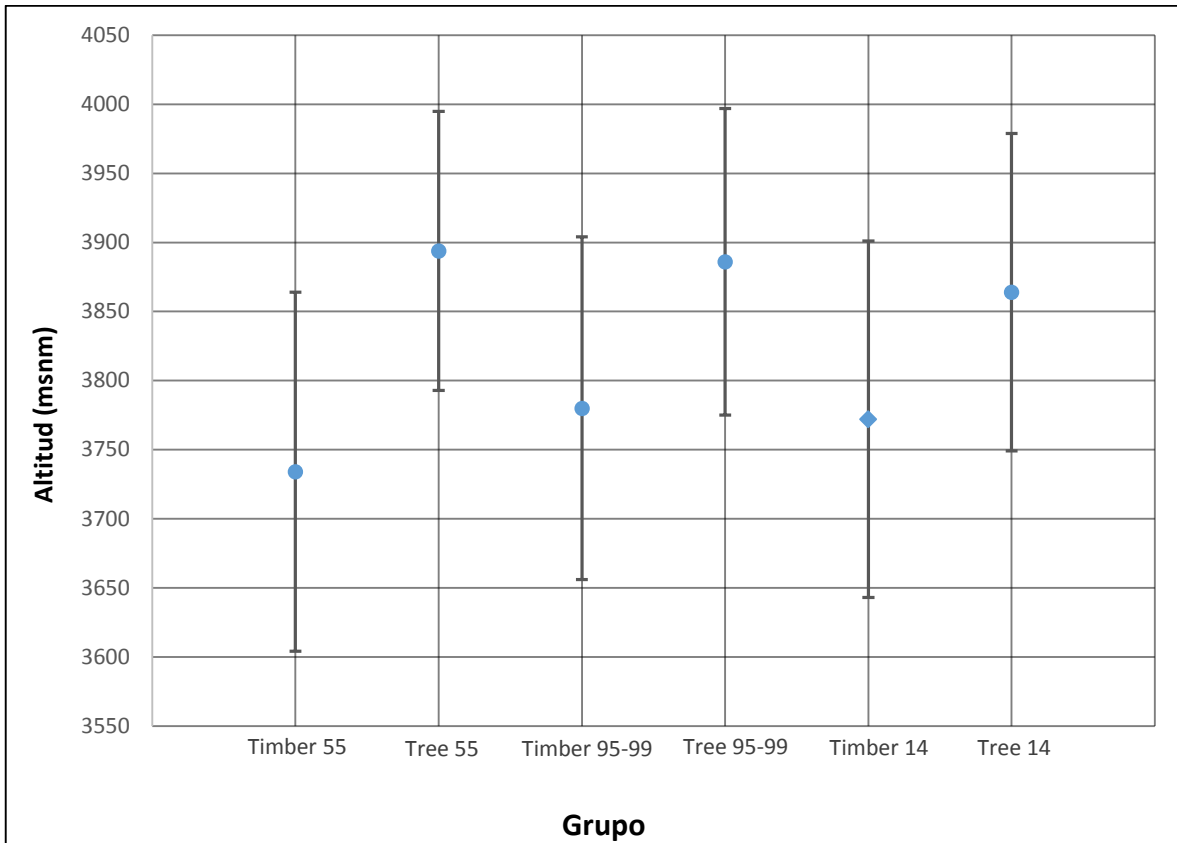
#### 4.1.1. Cambios en el *Timberline* y en el *Treeline*

Para determinar la posición altitudinal de cada límite del bosque para las tres fechas consideradas, 1955, 1995-1999 y 2014, se obtuvieron los estadísticos descriptivos que se encuentran en la Tabla 4.1 (ver también Figura 4.1).

Límite	No. de puntos	Media (msnm)	Desviación estándar	Mediana	Mínimo	Error estándar	Máximo	95% de intervalo de confianza		Longitud (km)
								Límite superior	Límite inferior	
<i>Timberline 55</i>	12034	3734	130	3731	3220	1.18	4073	3736.656	3731.531	183
<i>Treeline 55</i>	5452	3894	101	3904	3544	1.37	4106	3897.146	3891.77	91
<i>Timberline 95-99</i>	11212	3780	124	3771	3274	1.16	4063	3781.811	3777.23	158
<i>Treeline 95-99</i>	4077	3886	111	3898	3563	1.74	4123	3889.67	3882.825	89
<i>Timberline 14</i>	11313	3772	129	3769	3229	1.21	4066	3773.927	3769.169	142
<i>Treeline 14</i>	7026	3864	115	3863	3563	1.36	4099	3867.057	3861.697	105

**Tabla 4. 1 Estadísticos descriptivos de cada límite del bosque y por fecha de análisis.**

Con el mosaico de fotografías aéreas se estableció la posición del *Timberline* (Límite Superior del Bosque más o menos cerrado) para 1955 en 3,734 m  $\pm$  130 m, para el *Treeline* (Límite Superior de los Árboles) del mismo año en 3,894 m  $\pm$  101 m. Utilizando las mismas fotografías aéreas de 1955 Beaman (1962) calcula el *Timberline* para el Popocatepetl en 3,911 m con una desviación estándar de 82 m; cabe destacar que este promedio es sólo para el lado Oeste del volcán, y es posible que en el cálculo haya influido el criterio utilizado en el trazo del LSB en donde Beaman considera al *Treeline* como *Timberline* en esta ladera del volcán debido a lo abierto del bosque. La mediana para 1955 en el trazo de Beaman (1962) es de 3,909 m.



**Figura 4. 1** Gráfica de la altitud media ( $\pm 1$  Desviación estándar) del *Timberline* y *Treeline* de las tres fechas analizadas. En ella se puede observar los cambios altitudinales del LSB en 59 años.

La fecha de 1995-1999 tiene una altitud promedio del *Timberline* de  $3,780 \pm 124$  m, y para el *Treeline* de  $3,886 \pm 111$  m. Por último para la fecha más reciente (2014) la altitud promedio del *Timberline* se encuentra en  $3,772 \text{ m} \pm 129$  m, y el *Treeline* en  $3,864 \pm 115$  m.

En primer lugar la Tabla 4.1 y la Figura 4.1 muestran que la diferencia entre el *Timberline* y *Treeline* ha variado sustancialmente durante el período analizado. Se observa que en 1955 la diferencia es de 160 m, en 1995-1999 es de 106 m y en 2014 es de 92 metros.

Se utilizó la prueba T-Student para comparar las medias del *Timberline* y el *Treeline* entre la misma fecha y entre distintas fechas, con objeto de determinar si las variaciones altitudinales observadas entre fecha y fecha son estadísticamente significativas (Anexo B3). Además, para comparar la diferencia altitudinal entre las tres fechas analizadas se realizó una prueba ANOVA (Anexo B4), los resultados se muestran a continuación.

La diferencia altitudinal más importante entre límites del mismo período se da en 1955 con 160 m del *Treeline* por encima del *Timberline*. Esto sugiere que durante la primera mitad del siglo XX había una tendencia a que los árboles en el *Treeline* colonizaran cotas más altas, lo que coincide con el dinamismo reportado por los diferentes autores citados por Beaman (1962), así como por Farrington (1897) y Aguilera y Ordoñez (1895) de acuerdo a la posición del *Timberline* a finales del siglo XIX.

Como muestra la Tabla 4.1, a lo largo del periodo analizado (1955-2014) no ha habido una tendencia unidireccional en el comportamiento de LSB. El *Timberline* presenta un ascenso general (si bien desde 1995-1999 se observa un leve descenso), mientras que el *Treeline* registra un descenso general, aunque más pronunciado entre 1995-1999 y 2014. Llama la atención que entre 1995-1999 y 2014 el *Timberline* retrocedió 8 metros, en coincidencia con la reciente etapa de actividad volcánica.

Se encontró que entre las tres fechas analizadas la diferencia entre las medias de altitud del *Timberline* tiene un nivel de significancia de 0.000. En otras palabras, los cambios altitudinales de las medias del *Timberline* a lo largo del periodo analizado son estadísticamente significativos (Tabla 4.2 y Figura 4.2).

#### Comparaciones múltiples

Variable dependiente: Altitud

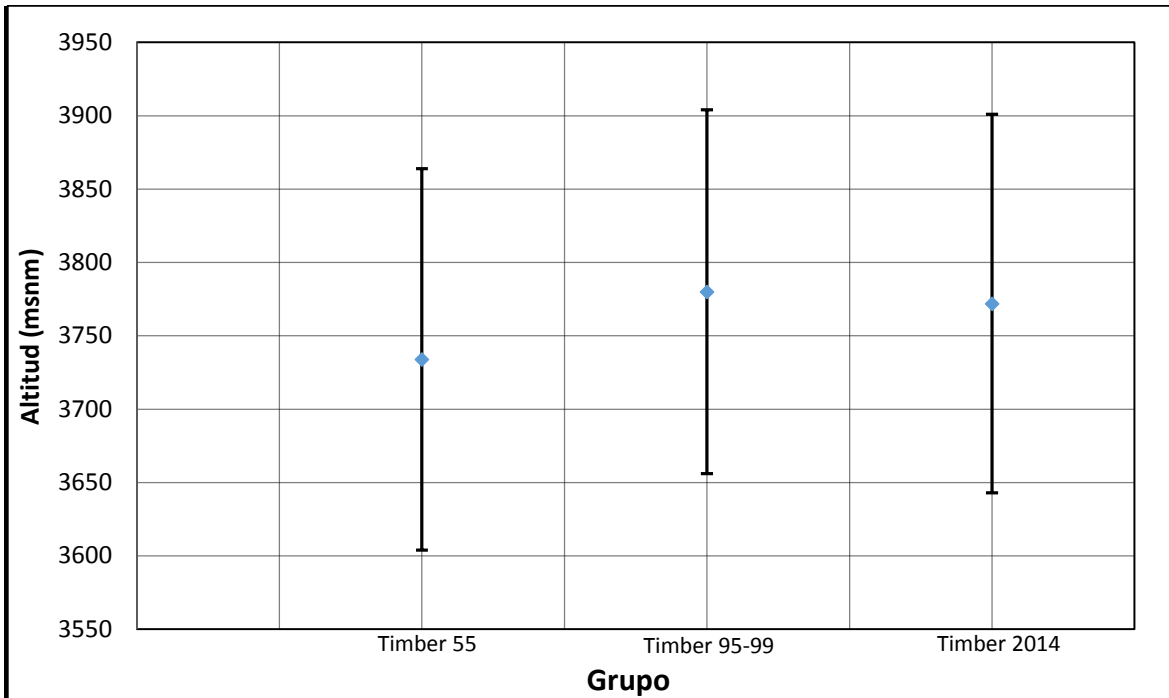
HSD Tukey

(I) Grupo	(J) Grupo	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
					Límite inferior	Límite superior
Timber 55	Timber 95-99	-45.661*	1.677	.000	-49.593	-41.730
	Timber 14	-37.687*	1.673	.000	-41.610	-33.765
Timber 95-99	Timber 55	45.661*	1.677	.000	41.730	49.593
	Timber 14	7.974*	1.703	.000	3.982	11.965
Timber 14	Timber 55	37.687*	1.673	.000	33.765	41.610
	Timber 95-99	-7.974*	1.703	.000	-11.965	-3.982

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

**Tabla 4.2 Prueba ANOVA del *Timberline* de las tres fechas de análisis, en ella se observa la diferencia de medias altitudinales.**



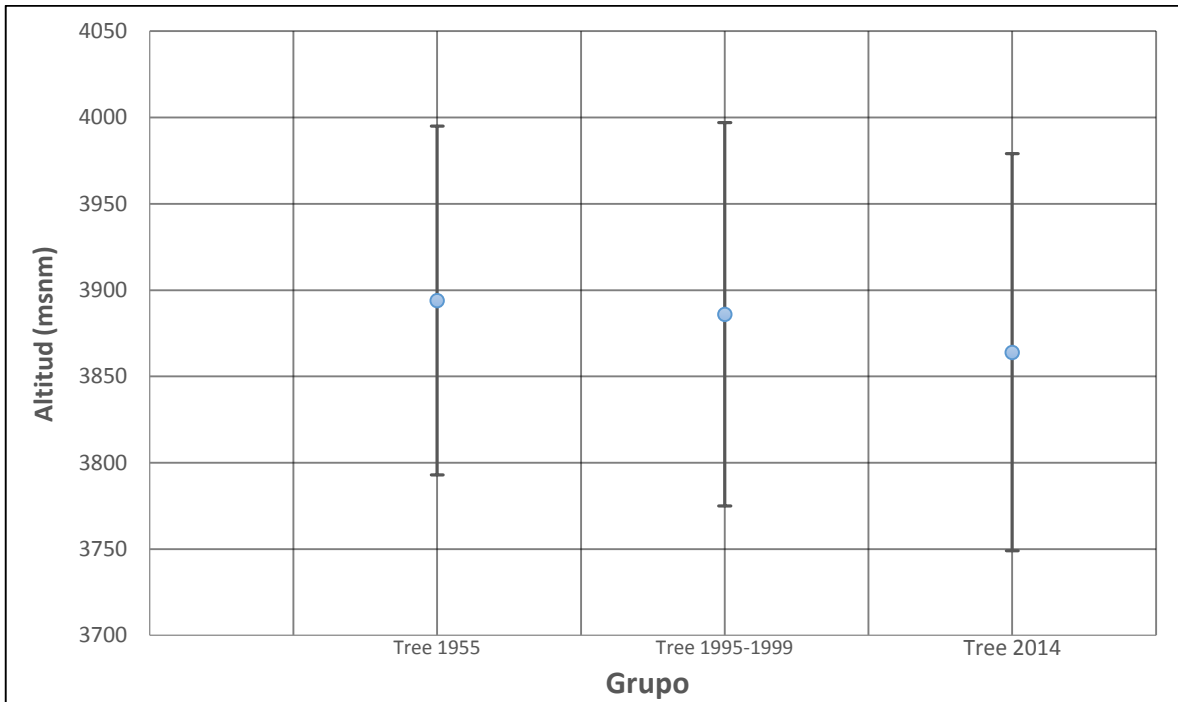


**Figura 4. 2 Gráfica de altitud media ( $\pm 1$  desviación estándar) del *Timberline* de las tres fechas analizadas en donde se aprecian los cambios altitudinales por la barras de error.**

En cuanto al *Treeline*, los cambios altitudinales indican un retroceso de este límite comparando el año más antiguo con las dos fechas más recientes, pues se registra un descenso en 8 metros entre 1955 y 1995-1999, con un nivel de significancia de 0.015; y un descenso de 30 m entre 1955 y 2014 con un nivel de significancia de 0.000 (Anexo B4 y Figura 4.3).

Así mismo, entre 1995-1999 y 2014 el *Treeline* retrocedió 22 metros, con un nivel de significancia de 0.000.

De los dos límites, el *Treeline* es el que más dinamismo tiene en el período más reciente. En los 20 años transcurridos entre 1995-1999 y 2014 (en coincidencia con la actividad eruptiva) el *Treeline* varió -22 m y el *Timberline* -8 m (en comparación con los -8 m y +46 m, respectivamente, de los 39 años previos, sin actividad eruptiva).



**Figura 4. 3** Gráfica de la altitud media ( $\pm 1$  Desviación estándar) del *Treeline* de las tres fechas analizadas con sus respectivos cambios altitudinales representados por las barras de error.

#### 4.1.2. Cambios en el *Tree species line*

El último límite considerado, más que un límite continuo, se refiere a los individuos del *Tree species line*, es decir, aquellos pinos aún por encima del *Treeline* y que generalmente están aislados unos de otros.

Respecto a este límite sólo se obtuvieron las elevaciones medias para determinar la altitud en la que se encuentran los individuos arbóreos en el *Tree species line*. La elevación media de este límite para el 2014 fue de  $4,043 \pm 60$  msnm, encontrándose el individuo arbóreo más alto a los 4,189 m y el más bajo a los 3,806 m (Tabla 4.3). La mayor cantidad de individuos arbóreos identificados se da en el 2014 con 215 individuos, mientras que en el año 1955 se reconocieron 99 individuos y en el período 1995-1999 se contabilizaron 137 individuos arbóreos por encima del *Treeline*.

Año	Media (msnm)	Desviación estándar	Error estándar	95% del intervalo de confianza para la media		Mínimo	Máximo
				Límite inferior	Límite superior		
1955	4002	92	9	3984	4020	3835	4265
1999	4025	87	7	4011	4040	3808	4396
2014	4043	60	4	4035	4051	3806	4189

**Tabla 4. 3 Estadísticos descriptivos de los individuos arbóreos en el *Tree species line*.**

De manera general, estos resultados muestran que existe un ascenso del *Tree species line* entre las fechas analizadas. Sin embargo, es importante notar que este tipo de LSB es el más sensible a la resolución de las imágenes, pues se refiere a individuos arbóreos aislados que pueden ser identificados más fácilmente en imágenes de alta resolución. Por esta razón, es posible que no sean plenamente comparables las observaciones hechas en fotografías aéreas blanco y negro del año 1955 con las realizadas en imágenes de alta resolución en color de Google Earth de 2014.

#### **4.2. Relación de la altitud con diversas variables biofísicas**

Las correlaciones se llevaron a cabo para cada tipo de límite del bosque (*Timberline* y *Treeline*) y para cada fecha de análisis, tomando como parámetro el *Coefficiente de Correlación de Pearson* cuyo resultado respecto a las variables biofísicas manejadas determinó que la temperatura guarda la mejor relación con el LSB de los tres períodos (Tabla 4.4). Esto se debe a que la obtención de la capa de “temperatura” resultó de la interpolación respecto a la altitud, por lo que la relación es negativamente casi perfecta en  $r = -.999$ .

Variables	<i>Timberline</i>			<i>Treeline</i>		
	1955	95-99	2014	1955	95-99	2014
<i>Altitud</i>	1	1	1	1	1	1
<i>Orientación Norte-Sur</i>	<b>.353</b>	<b>.389</b>	<b>.356</b>	<b>.178</b>	<b>.152</b>	<b>.153</b>
<i>Orientación Este-Oeste</i>	<b>.105</b>	<b>.210</b>	<b>.114</b>	.068	.085	.053
<i>Pendiente</i>	<b>-.158</b>	-.107	<b>-.155</b>	<b>.174</b>	.067	.078
<i>Morfología en perfil</i>	-.045	-.022	-.027	.000	.003	-.035
<i>Morfología en planta</i>	-.020	-.023	-.034	.044	.036	.021
<i>Radiación Solar</i>	-.003	<b>-.125</b>	-.040	<b>-.224</b>	-.084	<b>-.111</b>
<i>Acumulación del flujo</i>	-.011	-.004	.011	.005	.017	.027
<i>Temperatura</i>	<b>-.999</b>	<b>-.999</b>	<b>-.999</b>	<b>-.999</b>	<b>-.999</b>	<b>-.999</b>

**Tabla 4. 4** Tabla (resumida) de correlaciones entre variables de cada límite del bosque por fecha. Para mayor detalle ver Anexo B5. En negritas se observan las correlaciones más significativas.

La segunda variable que mejor se correlaciona con la altitud del LSB es la orientación Norte-Sur. La relación es positiva, con valores moderados (entre 0.35 y 0.39) en el caso de la altitud del *Timberline* y valores bajos en el caso del *Treeline*. Cabe recordar que en el caso de la variable Orientación N-S, un valor cercano a 0° es más próximo a una orientación Norte y un valor cercano a 180° indica su orientación Sur. Por lo anterior, puede concluirse que la relación positiva encontrada sugiere que la altitud del LSB tiende a ser mayor en laderas con exposición al Sur.

En cuanto a la Orientación Este-Oeste, la relación es positiva con todos los *Timberlines*, aunque baja (0.105 a 0.210), y también positiva pero extremadamente baja con todos los *Treeline*. En esta variable, los valores de 0° indican una orientación al Oeste, y valores

cercanos a 180° orientación al Este. En suma, los resultados sugieren que el LSB tiende a ser ligeramente más alto en laderas orientadas al Este.

Un factor que explica la posición del LSB en el Oeste del volcán es el control que las cenizas volcánicas tienen sobre los individuos arbóreos, lo cual es señalado por Beaman (1962), quien indica que el *Pinus hartwegii* sigue la línea de contacto de los depósitos nuevos y viejos de ceniza. Así mismo, la variación en la altitud del *Timberline* y del *Treeline* en el NW es causada por las fuertes pendientes y barrancas que ahí se encuentran.

La pendiente, presenta valores bajos (aunque significativos) de correlación negativa con la altitud del *Timberline* en las tres fechas analizadas, lo cual puede interpretarse como una cierta afinidad del *Timberline* por laderas de pendiente baja, es decir, a menor altura menor pendiente. En cambio el *Treeline* muestra una relación positiva (aunque baja) con la pendiente, lo que sugiere que los árboles aislados muestran cierta preferencia por laderas más inclinadas, si bien la relación se torna más débil en las dos fechas más recientes.

La correlación de la altitud de los *Timberlines* y de los *Treelines* con la morfología de laderas, tanto en planta como en perfil, es muy baja. En ningún caso superan el valor de 0.05, lo que indica que no hay correlación entre la altitud del LSB y la morfología de las laderas. En otras palabras, estas variables no afectan significativamente la altitud del LSB, si bien es interesante notar que para el caso de los *Timberlines* las correlaciones son negativas (mayor altitud del *Timberline* se asocia con morfologías más convexas en perfil y más cóncavas en planta), mientras que en el caso de los *Treelines* las correlaciones son positivas (indicando cierta relación entre mayor altitud del *Treeline* y laderas cóncavas en perfil y convexas en planta).

La radiación solar en general tiene una correlación negativamente débil con la altitud de todos los límites del LSB. Sin embargo, para el *Treeline* (sobre todo el de 1955) la relación es algo más fuerte. En general, la relación negativa es difícil de interpretar, pues sugiere que a menor radiación solar mayor altitud del LSB.

La correlación entre la acumulación del flujo de agua y la altitud del *Treeline* y del *Timberline* es muy baja en todos los casos, sugiriendo que el LSB depende poco de esta variable, lo cual es coherente con la muy baja correlación también encontrada entre la altitud del LSB y la morfología de laderas.

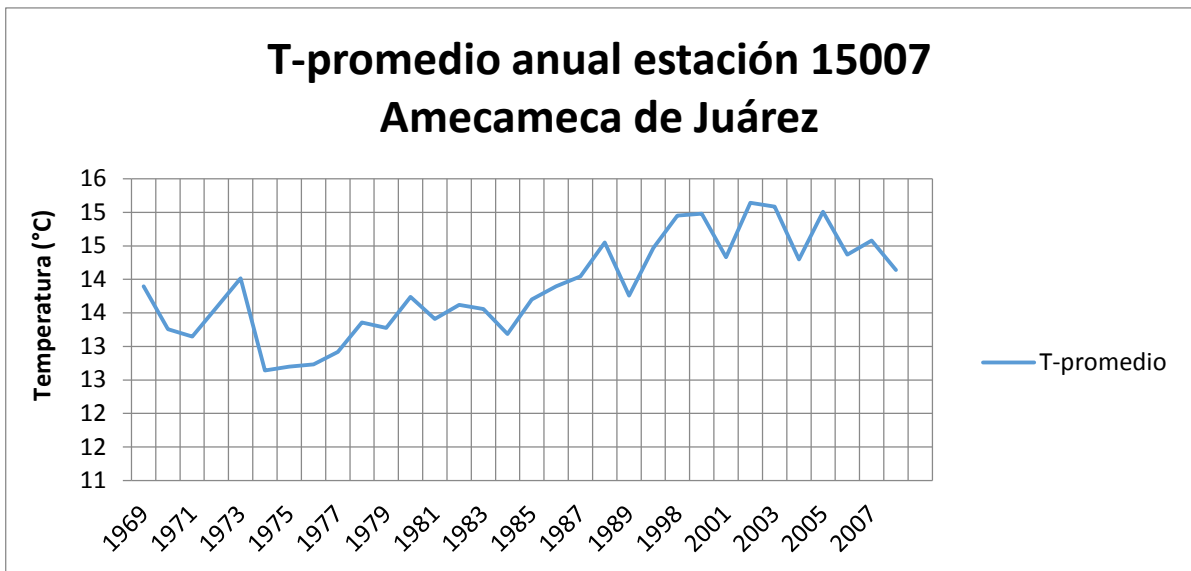
#### **4.3. La temperatura como variable que incide en el LSB**

Uno de los planteamientos de esta tesis fue conocer si existe un aumento en la temperatura local de la zona de estudio que pudiera explicar los cambios en el LSB del Popocatepetl o bien si los cambios recientes se debían más a cuestiones relacionadas con la actividad volcánica.

Considerando los datos depurados de las estaciones meteorológicas cercanas al volcán Popocatepetl (utilizadas para generar el mapa de temperaturas de la zona de estudio) se construyeron gráficas de la temperatura promedio que nos permitieran observar cambios en la misma. Se seleccionaron las estaciones con base en los años de registro y su cercanía al volcán (Capítulo III).

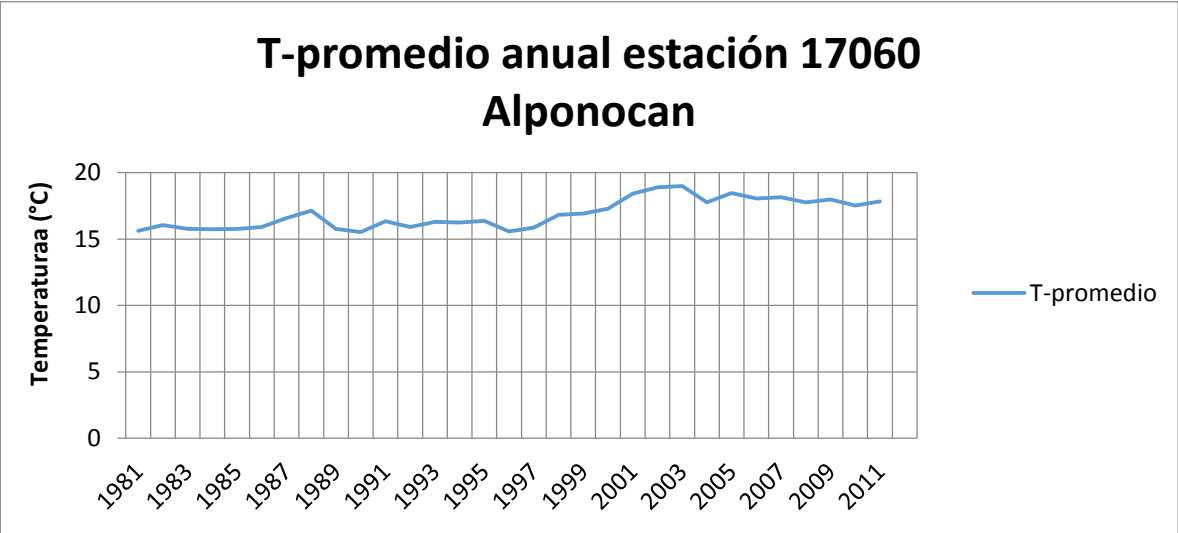
La estación 15103 (San Pedro Nexapa) muestra una ligera tendencia al aumento de la temperatura desde 1987. Sin embargo, hay años sin registro en donde no queda muy claro si esta tendencia se mantiene y aumenta paulatinamente. No obstante, en la estación Amecameca de Juárez (15007) y Alponocan (17060) al Sur del volcán se observa un ligero aumento de la temperatura a partir de 1973 y posterior a esta fecha (Figura 4.4 y 4.5).

Torres Beltrán (2013) observa la misma tendencia de cambio de la temperatura en estaciones meteorológicas cercanas al volcán Iztaccíhuatl a partir de 1977, con un ligero aumento en la temperatura local que explica los cambios más radicales del LSB de 1993 a 2012.



**Figura 4. 4** Gráfica de la temperatura promedio anual de la estación Amecameca de Juárez. Se observa la tendencia al incremento de la temperatura a partir de 1977.

Beaman (1962) reporta una temperatura de 7.7°C a 3,557 msnm en la estación del campamento Hueyatlaco. El gradiente térmico obtenido para este trabajo es de 0.64 por cada 100 metros de altitud (Capítulo III). Si tomamos como referencia este gradiente, a la altitud del *Timberline* de 1955 se tiene una temperatura de 6° a 7°C, sin considerar el NW, donde los límites son más bajos y la temperatura más alta.



**Figura 4. 5** Gráfica de la temperatura promedio anual de la estación Alponocan. En ella se observa la misma tendencia de incremento de la temperatura a partir de 1987 con fluctuaciones en la misma.

A la altitud de los individuos del *Tree species line* muestreados, la temperatura promedio es de 5.5°C a los 4,025 msnm, en concordancia con Lauer (1978) quien da una temperatura media de 5°C para los 4,000 m.

Un incremento en los patrones de temperatura benefician la colonización de individuos de *Pinus hartwegii* hacia cotas de mayor altitud y por lo tanto una ascenso del LSB. No obstante, una simulación realizada por Arriaga y Gómez (2007) de la posible influencia del cambio climático en algunos ecosistemas del país sugiere que los bosques de coníferas y encinos disminuirán en superficie. De acuerdo a estas autoras, en un escenario de cambio climático la superficie que ocupa *Pinus hartwegii* en México, se reduciría en un 41.5%, debido a que la especie puede rebasar los límites de tolerancia ecológica en los cuales se desarrolla. Lo mismo sucederá con otras especies de géneros de *Pinus* y *Quercus*, claro que estos escenarios son inciertos y no son definitivos pues cada especie tiene un potencial diferente de adaptación a los cambios climáticos y a la resistencia de los ecosistemas en donde se distribuyen.

Cabe mencionar que estos cambios pueden ocurrir en su límite altitudinal inferior, pero en el caso de montañas más altas que el LSB, como el Popocatepetl y el Iztaccíhuatl, la especie puede ocupar zonas más altas en donde hoy crece el zacatonal alpino.

Los cambios observados en el LSB del Popocatepetl entre 1955 y 1995 se pueden explicar por un aumento local de la temperatura aunado a las diversas variables biofísicas consideradas (+46 m en el *Timberline*). Sin embargo, en el período más reciente (1995-2014) el descenso del LSB se puede atribuir a la presión de la actividad volcánica, misma que ha afectado al *Timberline* (-8 m) y al *Treeline* (-22 m) en un menor lapso de tiempo (20 años) en comparación con el período anterior (1955-1995) durante el cual el *Timberline* asciende (+46 m) y el *Treeline* desciende ligeramente (-8 m).



#### 4.4. Diferencias entre segmentos del *Timberline* y *Treeline* de 1955

La Figura 4.6 muestra la forma como se dividió el LSB en 14 segmentos, con el fin de hacer un análisis más detallado de los cambios en su posición a lo largo del periodo estudiado y de los factores que lo controlan.

Con las pruebas ANOVA de un factor Post Hoc de cada una de las bases de datos de los límites trazados, fue posible comparar los promedios altitudinales y así conocer los segmentos del LSB que presentan mayor cambio, es decir, un ascenso o descenso.

Cabe mencionar que, para establecer el segmento más bajo de cada LSB de las tres fechas de análisis, se consideraron dos parámetros. El primero fue tomar en cuenta el segmento más bajo por su significancia estadística a un nivel de 0.05, y el segundo, fue considerar el segmento más bajo por su altitud (msnm).

En el *Timberline* de 1955 el segmento más bajo (por su altitud) es el 12 con 3,609 m. El segmento 8 en la ladera Oeste, fue el más bajo por su significancia estadística, lo cual coincide con lo que Beaman (1962) señalaba respecto a que en esta ladera del Popocatepetl el bosque resulta ser "muy abierto" y se emplaza en el contacto de las cenizas recientes y antiguas disminuyendo la posición del LSB en cuanto a altitud; este segmento tiene una elevación promedio de 3,634 m; aunado a esto, la topografía es muy escarpada encontrándose cañadas y barrancas como Nexpayantla (Anexo B6 y Tabla 4.5).

HSD Tukey<sup>a,b</sup>

Segmento	N	Subconjunto para alfa = 0.05									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	564	<b>3609</b>									
8	1512		<b>3634</b>								
7	1538			3655							
11	770				3674						
9	905					3694					
13	701						3719				
6	1536						3719				
4	454						3727				
5	1200							3751			
3	455								3845		
2	566								3857		
1	406									3874	
10	502										3911
14	925										<b>3921</b>
Sig.		1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	.900	1.000	.416	1.000	.771

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 696.427.

b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Tabla 4.5 Prueba ANOVA en donde se observa la elevación media de los segmentos del *Timberline* de 1955. Destacan en negritas las elevaciones estadísticamente significativas, así como los segmentos más bajos y altos de acuerdo a su altitud.**

En cuanto al *Treeline* de 1955, de igual forma el segmento más bajo por su altitud es el 12 con 3,722 m de elevación media, ubicado en el NW. Tiene una relación negativa moderada ( $r=-0.425$ ) con la pendiente, siendo la media de 14°, es decir, para este segmento la pendiente disminuye al aumentar la altitud del *Treeline*. (Anexo B6). Ésta tiene una correlación positiva moderada con la orientación N-S, de modo que en las laderas orientadas al Sur, el *Treeline* se encuentra a mayor altitud.

El segmento 5 (el más bajo del *Treeline* de 1955 de acuerdo a su significancia estadística) tiene una elevación media de 3,847 m. Comparado con todo el *Treeline* de 1955, la altitud en este segmento presenta una correlación más fuerte con las variables biofísicas. Destaca

la correlación entre mayor altitud y laderas más convexas en planta y perfil, así como una radiación solar más alta (Tabla 4.6).

El segmento más alto es el 10 al NW, con 4,011 m de elevación media. La pendiente es de 24° en promedio. Este segmento se encuentra en las inmediaciones de la barranca Nexpayantla, la morfología en general es convexa. Ahí destaca, igual que en el caso del segmento 5, una correlación moderada entre la altitud del *Treeline* y laderas convexas en planta y perfil, así como mejor correlación con orientaciones al Sur y al Este (Anexo B6).

HSD Tukey<sup>a,b</sup>

Segmento	Subconjunto para alfa = 0.05							
	1	2	3	4	5	6	7	8
12	<b>3722</b>							
13		3792						
11		3804						
9			3830					
6			3844	3844				
5			3847	3847	<b>3847</b>			
7				3856	<b>3856</b>			
4					<b>3869</b>			
8						3895		
1						3911		
14							3955	
2							3958	
3							3960	
10								<b>4011</b>
Sig.	1.000	0.876	0.317	0.819	0.074	0.445	1.000	1.000

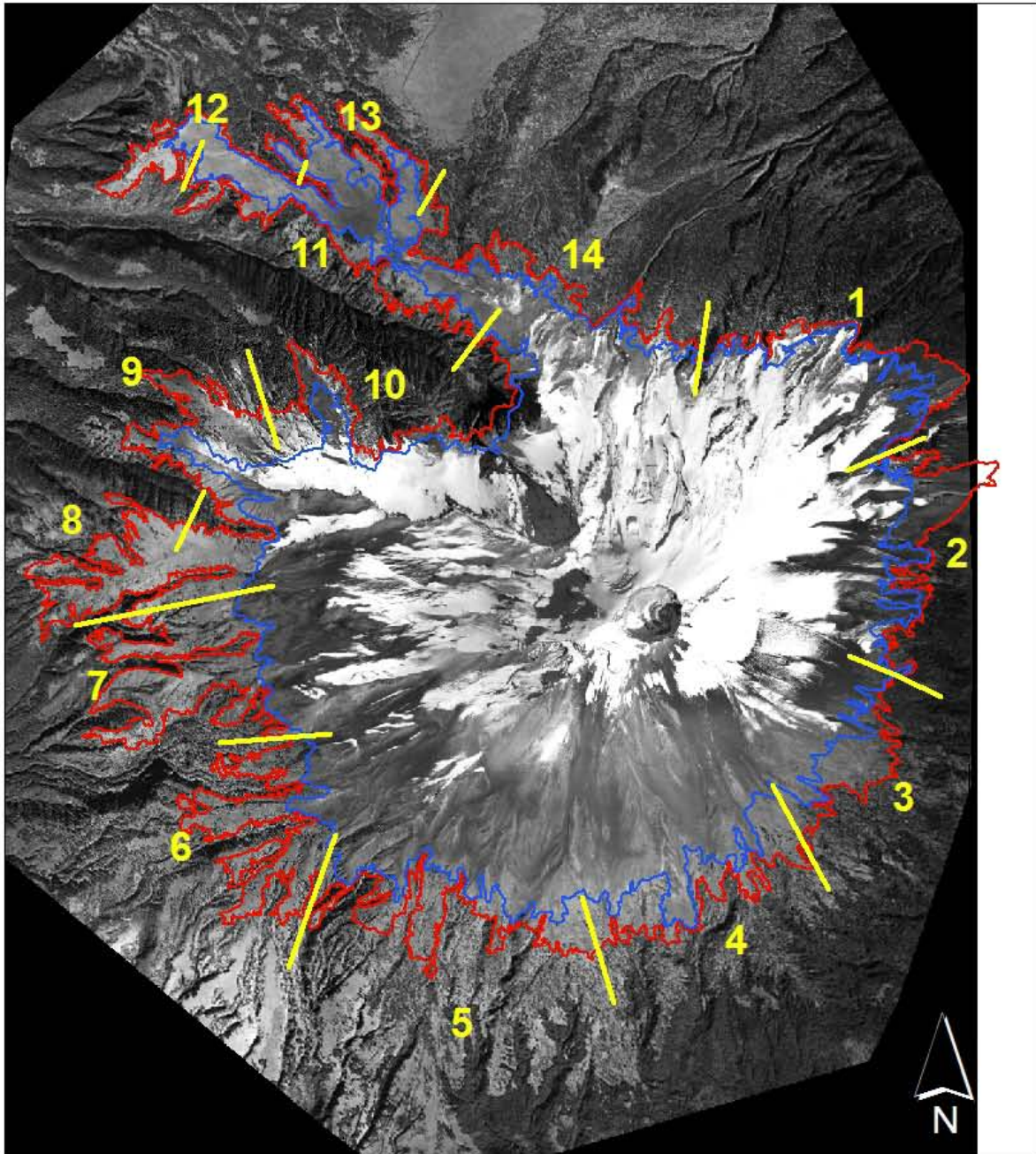
Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 214.439.

b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Tabla 4.6 Prueba ANOVA en donde se observa en forma ascendente la elevación media de los segmentos del *Treeline* de 1955. Destacan en negritas las elevaciones estadísticamente significativas, así como los segmentos más bajos y altos de acuerdo a su altitud.**

Es importante destacar que Beaman (1962) no realizó un trazo para el *Treeline*, al considerar a este límite parte del *Timberline*; en el trazo para este trabajo se diferenciaron ambos límites.



**Leyenda**

- Timberline 1955
- Treeline 1955

Elaboró: Alejandra Franco Corona

Figura 4. 6 Mosaico de fotografías aéreas en donde se muestran los segmentos realizados al LSB identificados por las líneas amarillas y su respectivo número. En color rojo el *Timberline* y en azul el *Treeline*, ambos trazos corresponden a 1955.

#### 4.5. Diferencias entre segmentos del *Timberline* y *Treeline* de 1995-1999

El segmento 7 (al Oeste) del *Timberline* es el más bajo por su altitud, con elevación media de 3,628 m. Destacan una correlación negativa del *Timberline* con la pendiente, y positiva con la orientación Sur y la radiación solar (estando estas tres variables a su vez fuertemente correlacionadas) (Anexo B6 y Tabla 4.7). En este segmento, los individuos arbóreos de *Pinus hartwegii* parecen buscar superficies con mayor radiación solar en las laderas con pendientes débilmente escarpadas. Sin embargo, en esta ladera del volcán se añaden además las determinantes edáficas que ya han sido mencionadas con anterioridad, lo que parece ser el principal limitante de que el *Timberline* se mantenga en cotas de menor elevación.

HSD Tukey<sup>a,b</sup>

Segmento	Subconjunto para alfa = 0.05										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	<b>3628</b>										
12	3636										
11		3691									
8		3695	<b>3695</b>								
9			3708	3708							
13				3709							
4					3726						
6						3747					
5							3767				
3								3838			
2									3857		
1										3882	
10											3923
14											<b>3923</b>
Sig.	0.771	0.999	0.063	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 735.366.

b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Tabla 4.7 Prueba ANOVA del *Timberline* de 1995-1999. En negritas se muestran el segmento más bajo y alto por su elevación media, además del más bajo por su significancia estadística.**

Por otra parte, el segmento 8 (3,695 m), es el más bajo estadísticamente con un nivel de significancia de 0.063, con 3,783 m. Al igual que en el segmento 7, lo que determina la baja altitud del *Timberline* del segmento 8, son las condiciones edáficas que las cenizas volcánicas representan en la ladera Oeste del Popocatepetl. Un comportamiento similar se da en el *Timberline* de 1955, en donde el segmento más alto para este límite en 1995-1999 es el 14 con 3,923 m de elevación media.

En cuanto al *Treeline* al igual que para 1955, el segmento más bajo es el 12, con una elevación media de 3,720 msnm (Tabla 4.8). El segmento más alto es el 2 con 4,022 m de elevación promedio y 19° de pendiente, ubicado al NE (Figura 4.7). Destacan ahí la relación negativa de la altitud del *Treeline* con la pendiente, y positiva con respecto a laderas convexas y la radiación solar (Anexo B6).

HSD Tukey<sup>a,b</sup>

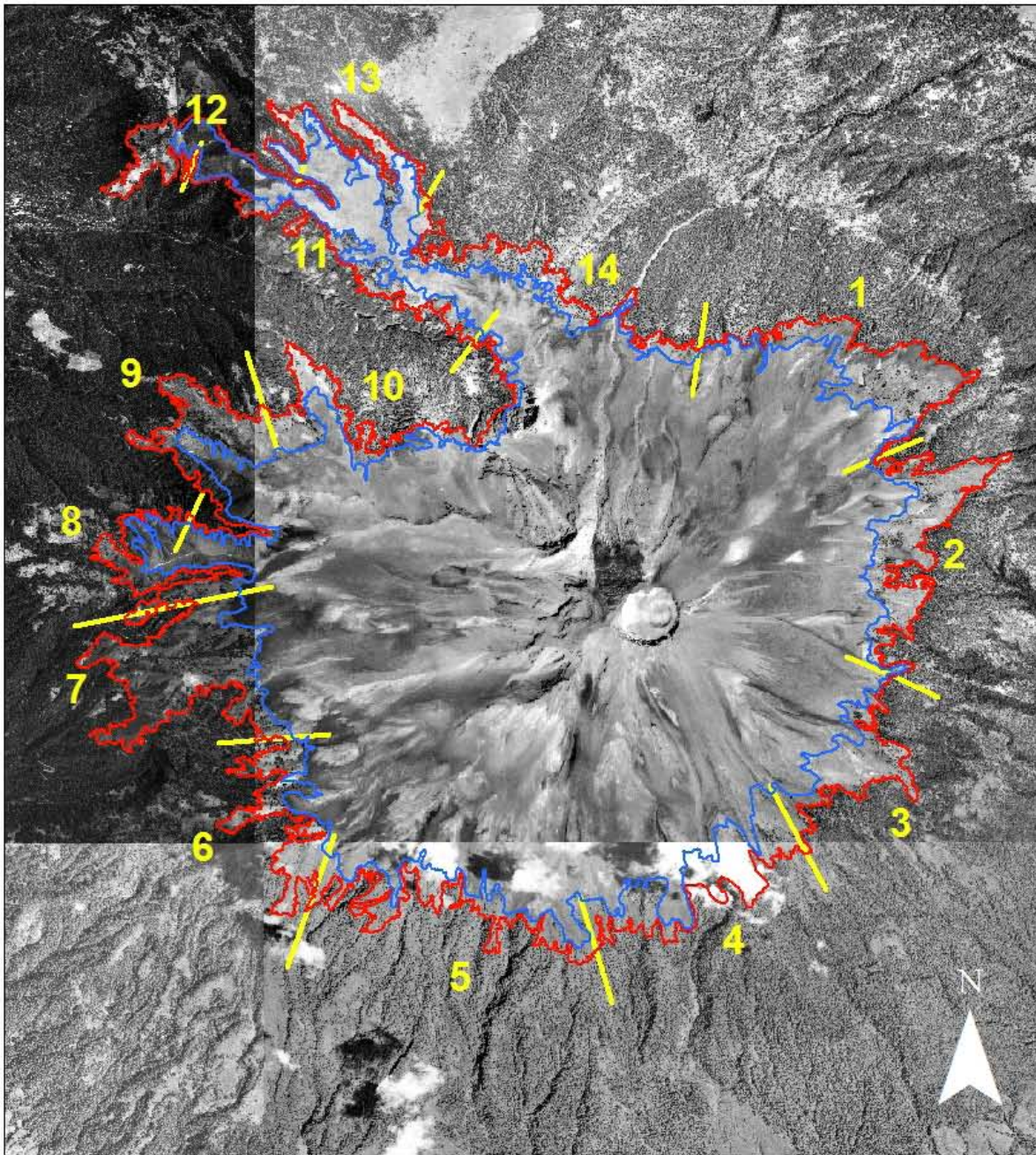
Segmento	Subconjunto para alfa = 0.05									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
12	<b>3720</b>									
13		<b>3764</b>								
8		<b>3783</b>								
11			3808							
9			3820	3820						
7				3834	3834					
6				3838	3838					
5					3845					
4						3888				
14							3961			
1							3973	3973		
3								3988	3988	
10									3999	
2										<b>4022</b>
Sig.	1.000	.064	.739	.109	.795	1.000	.688	.333	.720	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 243.152.

b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Tabla 4.8 Prueba ANOVA del *Treeline* de 1995-1999. En negritas se observan los segmentos más bajos por su altitud y significancia estadística.**



**Leyenda**

- Timberline 1995-1999
- Treeline 1995-1999

Elaboró: Alejandra Franco Corona

Figura 4. 7 Imagen de las ortofotos digitales de INEGI en donde se aprecia el *Timberline* y el *Treeline* de 1995-1999. En amarillo los segmentos del LSB de este período.

#### 4.6. Diferencias entre segmentos del *Timberline* y *Treeline* de 2014

Al igual que en el *Timberline* de 1955, para el 2014 el segmento 12 del *Timberline* es el más bajo (3,609 m) y el más alto es el segmento 14 (3,929 m) (Tabla 4.9). Por su significancia estadística, el segmento 7, al Oeste, es el más bajo, con elevación media de 3,610 m (Anexo B6 y Figura 4.8).

Para el *Treeline*, el segmento 12 es el más bajo con 3,717 m. Sin embargo, nuevamente vuelve a figurar el segmento 8 con una elevación media de 3,778 m. Con 4,014 m, el segmento 2 es el más alto (Anexo B6 y Tabla 4.10).

HSD Tukey<sup>a,b</sup>

Segmento	Subconjunto para alfa = 0.05								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
12	<b>3609</b>								
7	<b>3610</b>								
8		3670							
11			3713						
13			3715						
9			3725	3725					
4				3732					
6					3754				
5						3783			
3							3803		
1								3830	
2								3831	
10									3929
14									<b>3930</b>
Sig.	1.000	1.000	.292	.943	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 748.607.

b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Tabla 4.9** Tabla de los subconjuntos homogéneos de la prueba ANOVA del *Timberline* de 2014. En negritas los segmentos más bajos por altitud y significancia estadística y el segmento más alto.



HSD Tukey<sup>a,b</sup>

Segmento	Subconjunto para alfa = 0.05								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
12	<b>3717</b>								
13		3746							
8			<b>3778</b>						
9				3799					
11				3803					
7					3836				
6					3838				
5					3846				
4						3910			
14							3958		
1							3969		
10								3991	
3								3994	
2									<b>4014</b>
Sig.	1.000	1.000	1.000	1.000	.480	1.000	.253	1.000	1.000

Se visualizan las medias para los grupos en los subconjuntos homogéneos.

a. Utiliza el tamaño de la muestra de la media armónica = 435.270.

b. Los tamaños de grupo no son iguales. Se utiliza la media armónica de los tamaños de grupo. Los niveles de error de tipo I no están garantizados.

**Tabla 4.10 ANOVA del *Treeline* de 2014. En negritas los segmentos más bajos y altos por su altitud promedio.**

Nótese que los segmentos altos y bajos para el *Treeline* de 2014 son los mismos que en 1995-1999, lo cual sugiere que al menos la dinámica de este límite tiene un comportamiento similar en los mismos segmentos en cuanto a su ascenso y descenso en los últimos 20 años.

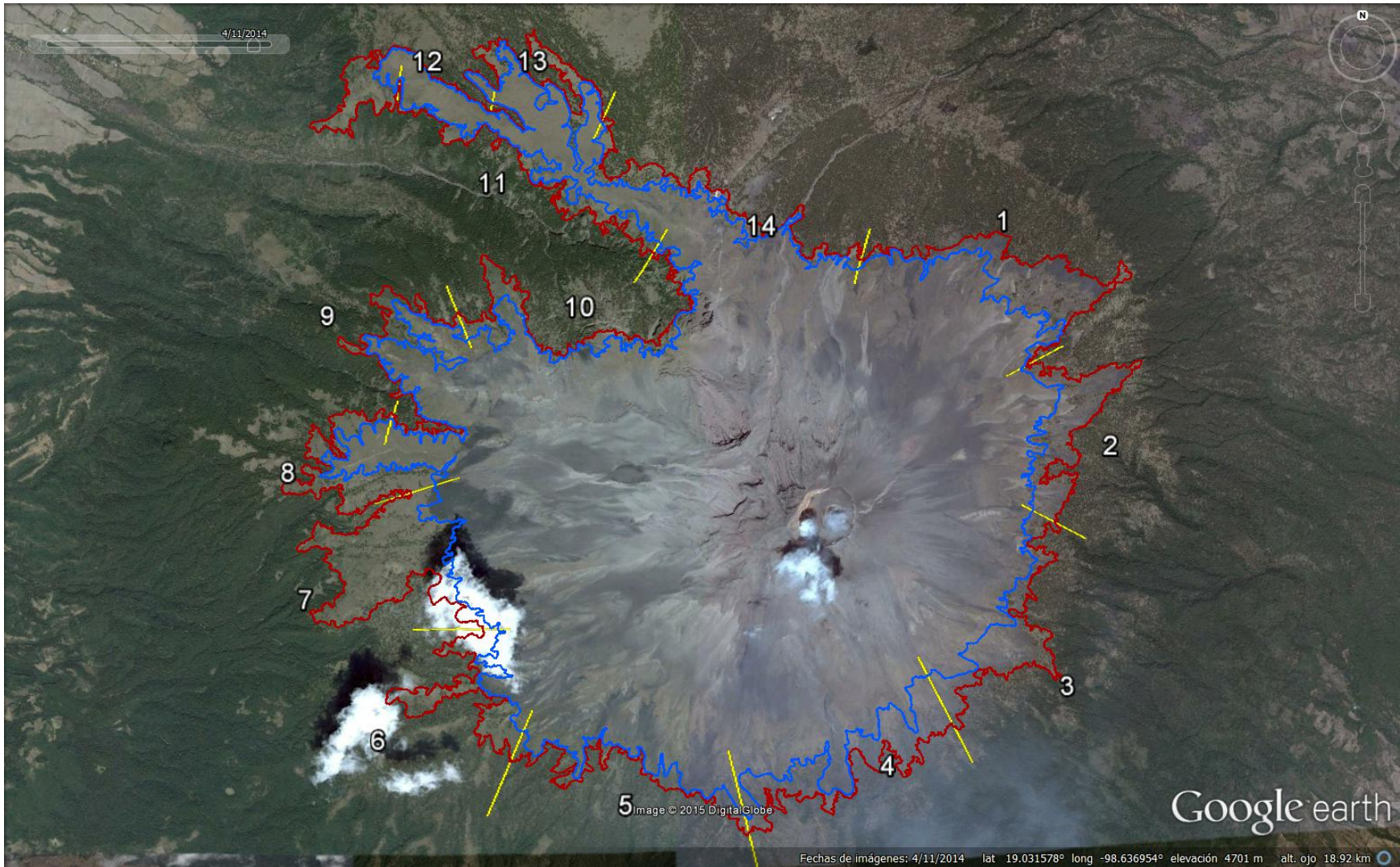


Figura 4. 8. Imagen de Google Earth con el LSB y sus respectivos segmentos en amarillo; en color azul el *Treeline* y en rojo el *Timberline* del año 2014.

#### **4.7. Segmentos del LSB con cambios altitudinales de importancia de 1955 a 2014**

Para establecer los cambios en el LSB se compararon las medias de los segmentos del *Timberline* y del *Treeline* de los tres períodos manejados de la siguiente manera. El primero es el período de 1955 respecto a 2014, que permitió establecer la dinámica de más largo plazo (59 años) del LSB.

El segundo período se determina al comparar las medias de los segmentos del *Timberline* y del *Treeline* de 1955 respecto a 1995-1999, que permite observar la evolución del LSB en un período sin actividad volcánica. Para determinar si la actividad eruptiva ha sido determinante en la posición del LSB, se analiza el período de 1995-1999 a 2014 (tercer período de comparación), durante el cual el volcán ha estado activo. Si hay un impacto en la posición del LSB relacionada con la actividad reciente del Popocatepetl, se espera que se vea reflejado primero que nada en el *Treeline* por ser el límite más dinámico por encontrarse a mayor altitud.

##### **4.7.1. Segmentos con cambios en el *Timberline* y *Treeline* de 1955 a 2014**

Respecto al primer período de comparación establecida (1955 a 2014) para el *Timberline* se observan cambios en el segmento 7, que tiene un descenso de 45 m; otros segmentos que tuvieron un cambio altitudinal importante fueron el 1 (-44 m) y el segmento 3 (-42 m); el segmento 12, que fue el más bajo casi en todos los límites del LSB, aparentemente no tuvo cambio en 59 años para el *Timberline*; mientras que el segmento 11 tuvo un ascenso de 39 m.

Segmento	<i>TIMBERLINE</i>			<i>TREELINE</i>		
	Media 1955	Media 2014	Diferencia (m)	Media 1955	Media 2014	Diferencia (m)
1	<b>3874</b>	<b>3830</b>	<b>-44</b>	<b>3911</b>	<b>3969</b>	<b>58</b>
2	3857	3831	-27	3958	4014	55
3	<b>3845</b>	<b>3803</b>	<b>-42</b>	3960	3994	34
4	3727	3732	5	3869	3910	42
5	3751	3783	32	3847	3846	-1
6	3719	3754	35	3844	3838	-6
7	<b>3655</b>	<b>3610</b>	<b>-45</b>	3856	3836	-21
8	3634	3670	36	<b>3895</b>	<b>3778</b>	<b>-118</b>
9	3694	3725	31	3830	3799	-31
10	3911	3929	18	4011	3991	-20
11	<b>3674</b>	<b>3713</b>	<b>39</b>	3804	3803	-1
12	<b>3609</b>	<b>3609</b>	<b>0</b>	3722	3717	-5
13	3719	3715	-4	3792	3746	-46
14	3921	3930	9	3955	3958	3

**Tabla 4.11 Comparación de los cambios altitudinales del *Timberline* y del *Treeline* de 1955 a 2014. Un número negativo indica un descenso y uno positivo un ascenso en el LSB. En negritas se muestran los segmentos más representativos con cambio.**

En la Tabla 4.11 se observan los segmentos que presentan cambios altitudinales. El segmento que presenta mayor ascenso en el *Treeline* es el 1, en el NE del Popocatépetl con 58 m (de 3,911a 3,969 m). El descenso ocurre en la ladera Oeste en el segmento 8 con 118 m de retroceso del *Treeline*. Cabe mencionar que esa es la ladera que en general mantiene en cotas más bajas en general al *Pinus hartwegii*; ahí la topografía influye en el establecimiento del pino, así como la naturaleza xérica de los suelos desarrollados en cenizas volcánicas de texturas arenosas que mantienen a baja altitud el LSB.

#### 4.7.2. Segmentos con cambios en el *Timberline* y *Treeline* de 1955 a 1995-1999

Para el segundo período establecido (1955 a 1995-1999) los cambios altitudinales para el *Timberline* se dan en el Oeste del volcán (Tabla 4.12). El segmento 7 presenta descenso (-27m) y en el segmento 8 ascenso (+61m). Es interesante observar que los cambios altitudinales se dan en dos segmentos que se encuentran juntos y que también muestran cambios en la altitud de los LSB en otras fechas.

Para el *Treeline*, el descenso ocurre de igual manera en el segmento 8 con 113 m (de 3,895 a 3,783 m), un segmento controlado por la pendiente del terreno en cuanto a su altitud, así como por la temperatura. El ascenso ocurre en el segmento 2 al Este del volcán, en donde la pendiente disminuye, jugando un papel fundamental la radiación solar y la temperatura, el aumento ocurre en 63 m.

Segmento	<b>TIMBERLINE</b>			<b>TREELINE</b>		
	Media 1955	Media 95-99	Diferencia (m)	Media 1955	Media 95-99	Diferencia (m)
1	3874	3882	9	3911	3973	61
2	3857	3857	0	<b>3958</b>	<b>4022</b>	<b>63</b>
3	3845	3838	-7	3960	3988	28
4	3727	3726	-1	3869	3888	19
5	3751	3767	16	3847	3845	-3
6	3719	3747	27	3844	3838	-6
7	<b>3655</b>	<b>3628</b>	<b>-27</b>	3856	3834	-23
8	<b>3634</b>	<b>3695</b>	<b>61</b>	<b>3895</b>	<b>3783</b>	<b>-113</b>
9	3694	3708	14	3830	3820	-10
10	3911	3923	11	4011	3999	-12
11	3674	3691	17	3804	3808	5
12	3609	3636	27	3722	3720	-2
13	3719	3709	-10	3792	3764	-28
14	3921	3923	2	3955	3961	6

Tabla 4.12 Comparación del *Timberline* y *Treeline* de 1955 a 1995-1999. En negritas los segmentos con cambios altitudinales más representativos.

#### 4.7.3. Segmentos con cambios en el *Timberline* y *Treeline* de 1995-1999 a 2014

Por último, el período de 1995-1999 a 2014 muestra que en el *Treeline* existe un descenso significativo en 21 m (3,820 a 3,799 m) en el segmento 9 al NW del volcán y un aumento de 23 m en el segmento 4 al Sur del volcán (Tabla 4.13).

En cuanto al *Timberline* el descenso se da en el NE del volcán en el segmento 1 con +52 m, y el ascenso en el segmento 11 con +22 m. Tal como se esperaba son los *Treeline* los que tienen mayor dinamismo, mismo que se ve reflejado en la magnitud del ascenso o descenso en los períodos analizados.

Segmento	<i>TIMBERLINE</i>			<i>TREELINE</i>		
	Media 95-99	Media 2014	Diferencia (m)	Media 95-99	Media 2014	Diferencia (m)
1	<b>3882</b>	<b>3830</b>	<b>-52</b>	3973	3969	-4
2	3857	3831	-26	4022	4014	-8
3	3838	3803	-35	3988	3994	6
4	3726	3732	7	<b>3888</b>	<b>3910</b>	<b>23</b>
5	3767	3783	16	3845	3846	1
6	3747	3754	7	3838	3838	0
7	3628	3610	-18	3834	3836	2
8	3695	3670	-25	3783	3778	-5
9	3708	3725	17	<b>3820</b>	<b>3799</b>	<b>-21</b>
10	3923	3929	7	3999	3991	-8
11	<b>3691</b>	<b>3713</b>	<b>22</b>	3808	3803	-5
12	3636	3609	-27	3720	3717	-3
13	3709	3715	6	3764	3746	-18
14	3923	3930	7	3961	3958	-3

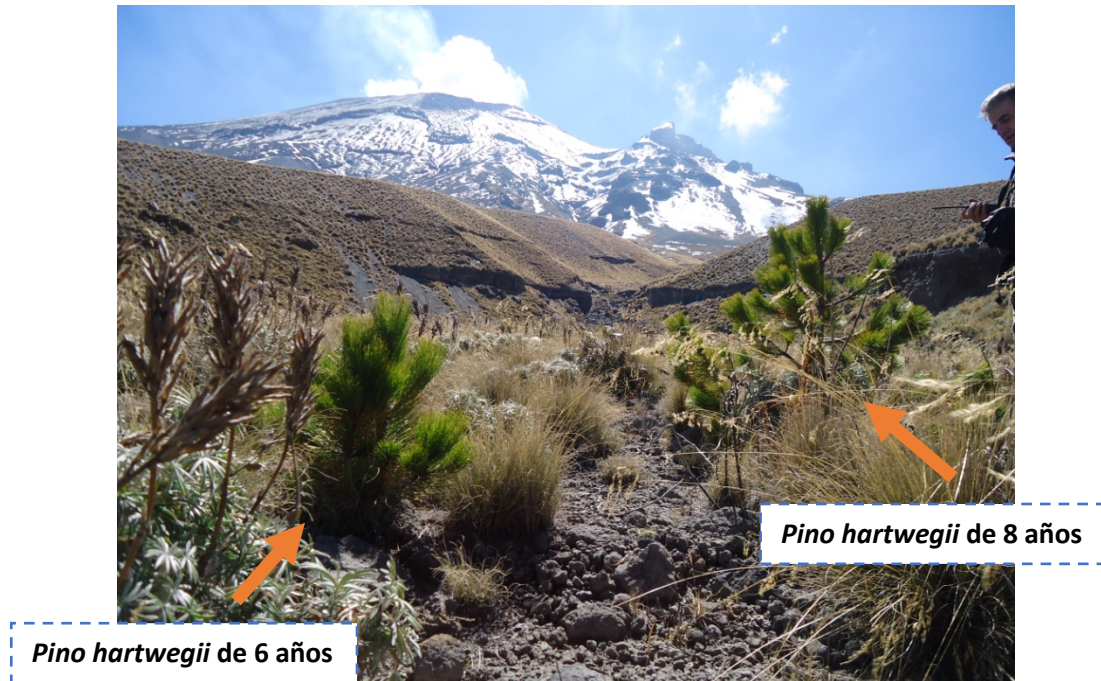
Tabla 4.13 Cambios altitudinales del *Timberline* y del *Treeline* de 1995-1999 a 2014. En negritas los segmentos con cambios en la altitud del LSB.

#### 4.8. Dendrocronología y observaciones de campo

Si bien se trata de observaciones preliminares, en campo se pudo constatar que en la ladera Norte la actividad volcánica parece no haber afectado al LSB particularmente a los individuos del *Tree species line*. El análisis dendrocronológico de las muestras establece edades diferenciadas de los pinos, es decir, hay pinos con edades desde los 24 a más de 130 años, encontrándose los más longevos en las cotas de menor altitud. Cabe mencionar, que la aplicación de la técnica fue de manera somera, por lo que se necesitaría tomar un número mayor de muestras en el LSB del volcán para realizar un análisis dendrocronológico a profundidad que incluya individuos del *Timberline* y del *Treeline*.

El pino muestreado a mayor altitud durante el trabajo de campo fue un ejemplar situado a 4,077 msnm (muestra P1-23), mientras que el individuo del *Tree species line* observado a mayor altitud en las imágenes se encontró a 4,189 m, es decir, que el individuo que se muestreó se encuentra en el promedio de los más altos (el más bajo se encuentra a los 3,806 msnm).

A una altitud de  $4,028 \pm 5$  m, sobre depósitos de lahar de 2001 en una terraza, se encontraron individuos de *Pinus hartwegii* de 6 y 8 años de edad de acuerdo a los nudos contabilizados en campo, lo que demuestra que la especie sigue creciendo pese a la actividad volcánica que inició en diciembre de 1994 (Figura 4.9).



**Figura 4. 9 Individuos más jóvenes encontrados en una terraza de la Barranca de Tenenepanco, ladera Norte del LSB del volcán Popocatepetl, a 4,028 m de altitud. Este grupo de árboles forma parte del *Tree species line*. Aquí se observan las muestras P-6 (de 6 años) y P-8 (de 8 años), establecidas sobre un manto de depósito de lahar del año 2001.**

Además se muestreó un manchón de pinos de mayor edad localizados en la misma barranca Tenenepanco, justo en la ladera opuesta a los anteriores. Por esa barranca fluyeron dos de los lahares más importantes del Popocatepetl en su actividad reciente (1997 y 2001). No obstante, estos pinos parecen no haber sufrido disturbios por dichos lahares (Figura 4.10 y 4.11).



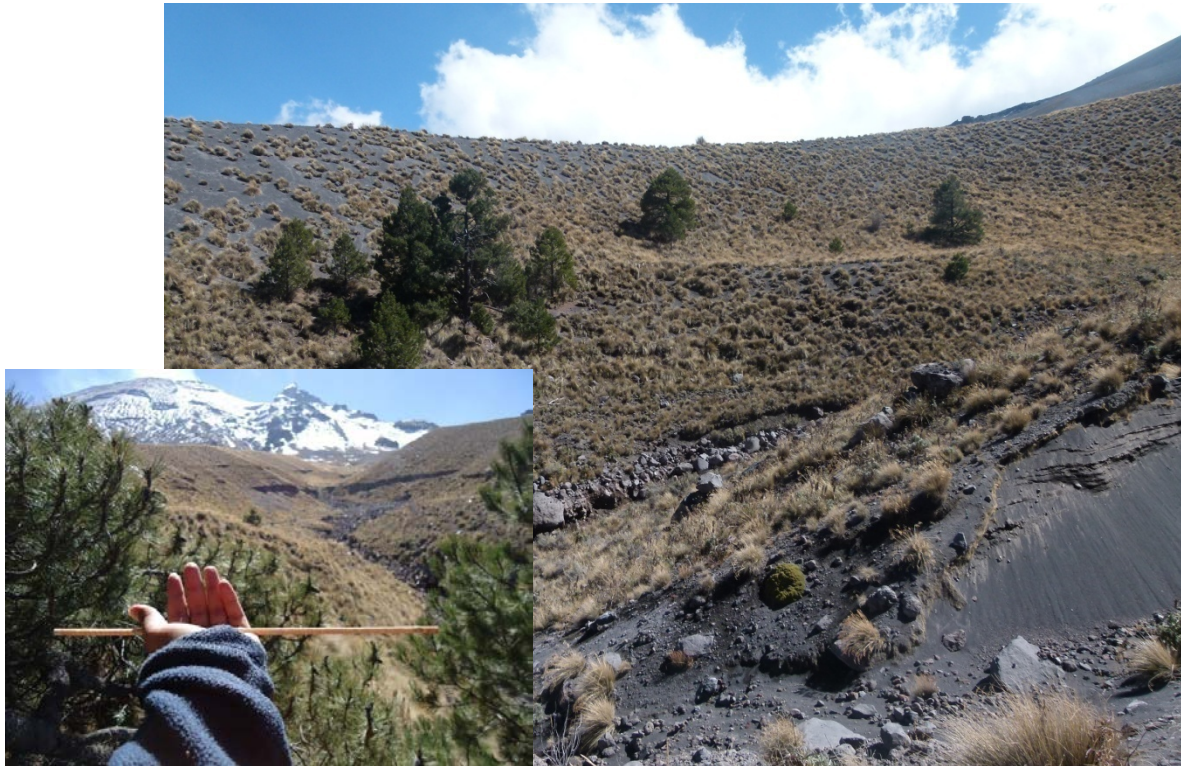


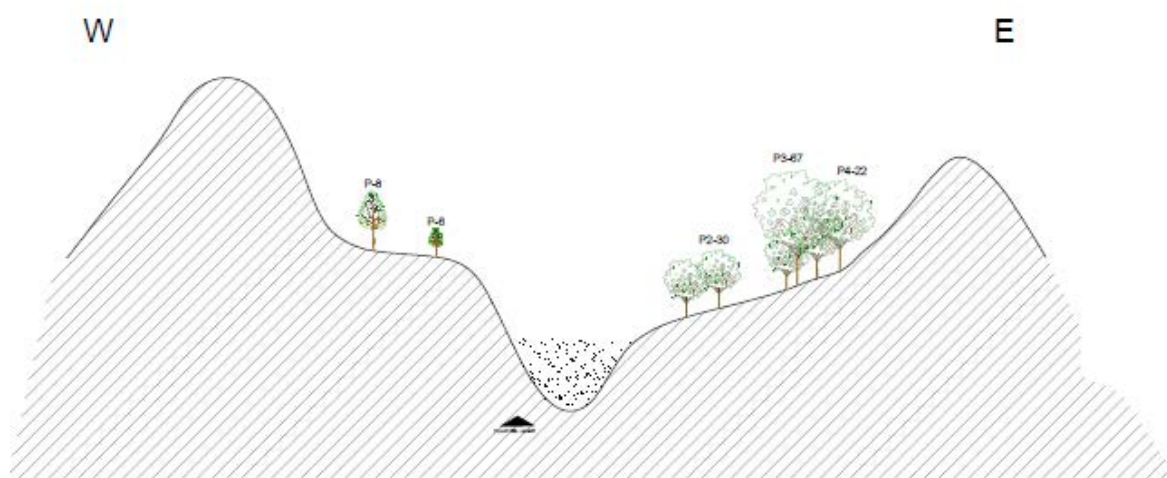
Figura 4. 10 Manchón de pinos muestreados en la ladera Este de la barranca de Tenenepanco-Huiloac a 4,028 m de altitud. Los pinos muestreados han sobrevivido a la actividad reciente del volcán, aunque los lahares de 1997 y 2001 fluyeron a pocos metros de ellos.

Con un conteo simple de anillos se pudo determinar la edad promedio de los pinos (Tabla 4.14).

Muestra	Edad	Longitud	Latitud	Altitud (msnm)
P1-23	24 años	19.049°	-98.629°	4,077
P2-30	36 años	19.050°	-98.626°	4,026
P3-67	46 años	19.050°	-98.626°	4,024
P4-22	16 años	19.049°	-98.626°	4,025
POT-01 B	28-29 años	19.052°	-98.633°	4,036
POT-02 A	30 años	19.052°	-98.632°	4,010
POT-03 A	139 años	19.052°	-98.631°	4,010

Tabla 4.14 Tabla con la localización de cada una de las muestras obtenidas y la edad respectiva de cada individuo de *Pinus hartwegii* en la barranca de Tenenepanco-Huiloac, ladera Este.

La actividad volcánica ha fluctuado en los veinte años desde su reactivación, los lahares han sido consecuencia de dicha actividad debido a la ablación de la nieve y el hielo causada por flujos piroclásticos. Los lahares de 1997 y 2001 fueron los más voluminosos, incluso uno de ellos llegó hasta Santiago Xalitzintla, una de las poblaciones más cercanas al volcán. No obstante lo anterior, el manchón de árboles no fue afectado ni por el lahar de 1997 ni por el de 2001.



**Figura 4. 11** Perfil a través de la barranca de Tenenepaco a 4,025 m. A la derecha se muestra el manchón de individuos de *Pinus hartwegii* de 16 a 46 años; a la izquierda se observan individuos de 6-8 años que rápidamente colonizaron un delgado depósito de lahar de 2001 sobre una terraza.

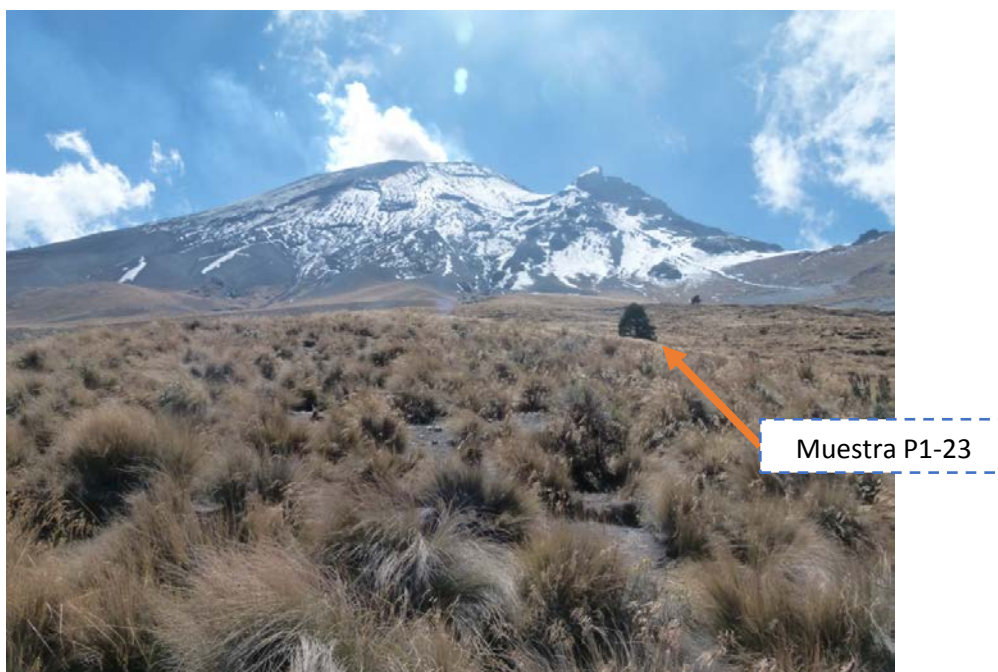
Conforme los individuos de *Pinus hartwegii* se alejan del *Tree species line* disminuyendo en altitud, es decir, en el *Timberline*, la edad del arbolado tiende a aumentar. Se determinó la edad para dos muestras cercanas al refugio Tlamacas que se encuentran por debajo del *Timberline* (Tabla 4.15).

Muestra	Edad
Tlamacas 1A	183 años
Tlamacas 2A	178 años

**Tabla 4.15** Edad de los individuos muestreados cerca del refugio Tlamacas, a unos 40 m al Norte del refugio, por debajo del *Timberline* a 3,950 m de altitud.

Si consideramos todos estos aspectos, podemos observar que la edad del arbolado disminuye (en la ladera Norte) al aumentar la altitud (16 a 46 años). Aparentemente los individuos del *Timberline* parece que se han mantenido estables, ya que la edad del arbolado es mayor a esa altitud. En tanto que los individuos del *Tree species line* parecen no ser afectados pues tienden a recolonizar rápidamente los depósitos recientes de lahar, continuando un ascenso de este límite del Popocatepetl pero para el sector Norte. No obstante, recordemos que de manera general tanto el *Treeline* como el *Timberline* han mostrado un descenso en altitud de 1995-1999 a 2014.

Cabe mencionar que los pinos muestreados pertenecen al segmento 14, el más alto para los *Timberline* de las tres fechas de análisis. Este segmento es el que menos impacto en cuanto a retroceso del LSB ha tenido, es por esto que se explica su edad joven conforme aumenta la altitud. Franco Ramos (2009) asegura que la recolonización de pinos en la barranca Tenenepanco-Huiloac es relativamente rápida; no obstante, su crecimiento es lento sobre todo por la presencia de suelos muy someros en estas superficies.



**Figura 4. 12** Al fondo se observa uno de los pinos muestreados con una edad calculada de 24 años. La muestra pertenece al P1-23, el pino a mayor altitud que se muestreó a 4,077 m.



**Figura 4.13** En un intento de replicar la imagen inferior, tomada en 1896 (en Farrington, 1897), se localizó el punto aproximado donde fue tomada. Nótese la aparente disminución de individuos de *Pinus hartwegii* en el LSB desde fines del siglo XIX.

#### 4.9. La dinámica volcánica como modeladora del Límite Superior del Bosque

Con la construcción del período de la reactivación del volcán (Capítulo I) y teniendo en cuenta los resultados de los segmentos en donde se encontró ascenso y descenso del *Timberline* y del *Treeline* para el período de 1995-1999 respecto a 2014, se pretende hacer un análisis en este apartado en donde de acuerdo al tipo de actividad volcánica pueda identificarse los efectos de la misma en los segmentos en donde hay cambios más latentes, esto con el propósito de conocer cómo ha afectado la actividad eruptiva en el LSB del Popocatepetl.

Una de las características de la actividad que presentó el volcán Popocatepetl en abril de 1995 son las caídas de cenizas y la expulsión de piroclastos los cuales propiciaron la ablación del glaciar teniendo como consecuencia el primer lahar en 1995 que se emplazó por la barranca de Tenenepanco- Huiloac recorriendo 3 km.

Lo mismo ocurrió en junio de 1997, cuando se generó un flujo piroclástico que fundió parte del glaciar y la nieve y generó un lahar que bajó por la misma barranca pero esta vez recorriendo 21 km, llegando incluso a las poblaciones más cercanas como Santiago Xalitzintla y San Nicolás de los Ranchos; el lahar comenzó a los 4,200 m y finalizó a los 2,400 m.

En enero del 2001 se generaron otros laháres que se desplazaron por las barrancas de La Espinera y Tepetelonconcone, al igual que Tenenepanco- Huiloac. Durante este mismo año, las laderas NE y NW tuvieron mayor impacto.

Se han reportado incendios forestales debido a la caída de piroclastos y balísticos. Sin embargo, en la mayoría de estos no se especifica la ladera en la que se producen. Pese a lo anterior se sabe de un incendio en la ladera NW en 1998 en Nexpayantla, cabe mencionar que en este siniestro los fragmentos incandescentes se tuvieron que desplazar 4.5 km del cráter del volcán para provocar dicho incendio en el LSB.

Por otra parte para que los incendios que fueron reportados en la zona del zacatonal alpino se produjeran, los fragmentos incandescentes debieron recorrer 2 km desde el cráter.

De acuerdo a la tabla 4.13 se puede observar que hay mayores cambios altitudinales en el *Treeline* que en el *Timberline* en cuanto a descenso se refiere. Esto es de esperarse por encontrarse por encima del *Timberline* y, por tener mayor dinamismo que éste. El incendio que se menciona en la barranca Nexpayantla, la cual abarca los segmentos 10 y 11, se ve reflejado por un descenso del *Treeline*.

La ladera NE es la más afectada en cuanto a descenso en ambos límites. En cuanto a la ladera NW se observa un ligero aumento en el *Timberline* pero descenso en el *Treeline*. La baja altitud del LSB del bosque en el W-NW se debe no sólo a las cenizas volcánicas y a la naturaleza de éstas, sino también a las condiciones edáficas que no han permitido un ascenso del LSB.

Respecto a los lahares que se emplazaron en la barranca de Tenenepanco- Huiloac en 1997 y 2001 (los más potentes) en el *Treeline* hay un descenso. Pese a esto, el *Tree species line* no se vio perturbado, pues se observó en campo la rápida recolonización del *Pinus hartwegii* con individuos de 6 y 8 años de edad misma que se calculó de acuerdo a los nudos contabilizados; de igual manera el manchón de árboles tampoco se vio perturbado al presentar edades desde 15 hasta 40 años.

Dicho todo lo anterior se puede observar que la actividad eruptiva impacta primero en el *Treeline*, límite con mayores descensos; las laderas más afectadas en los últimos 20 años son la NE y la NW mismas que se definen en los reportes de CENAPRED (2001, 2012) como las laderas en donde se emplazan los materiales de las erupciones del volcán con más frecuencia.

Lo anterior muestra que desde el nuevo período eruptivo en 1994 y hasta 2014 hay un descenso en promedio en general de 8 metros en el *Timberline* y de 22 m en el *Treeline*, esto como consecuencia del inicio e intensificación de la actividad volcánica.

Por lo tanto, si los mayores cambios se ven reflejados en un lapso relativamente corto (1995-2014), el análisis de los cambios en el LSB de un volcán activo deben realizarse en períodos cortos de tiempo debido a que los cambios serán más notables.

#### 4.10. El LSB de un volcán activo respecto a uno inactivo

Se ha mencionado ya que el LSB de las montañas del mundo tienden a aumentar en altitud en los últimos años (Leonelli 2011, Körner y Paulsen, 2004, García de Celis *et al.*, 2008, Torres Beltrán, 2013,).

Sin embargo, en un volcán activo como lo es el Popocatepetl las condiciones que mantienen el dinamismo del bosque varían por la actividad eruptiva como se ha corroborado ya.

Teniendo en cuenta lo anterior, con el propósito de conocer los cambios del *Timberline* y del *Treeline* y los factores que lo controlan, *grosso modo* se comparan los resultados obtenidos por Torres Beltrán (2013) en el Iztaccíhuatl con los del presente trabajo en el Popocatepetl, no sólo por la cercanía entre ambos volcanes, sino por su comportamiento volcánico diferenciado.

Ambos volcanes se encuentran en la misma latitud y muy cercanos entre sí, de tal modo que se espera que el comportamiento en cuanto a factores biofísicos sea muy similar.

Torres Beltrán (2013) encontró un ascenso estadísticamente significativo del LSB en el Iztaccíhuatl en 57 años (1955 a 2012) de 30 m en el *Timberline* y 67 m en el *Treeline*. Esto es de esperarse por el dinamismo que este último límite tiene por encontrarse por encima del bosque cerrado. Encuentra que la temperatura local y un aumento en la misma es lo que propicia, entre otras cosas, el ascenso del *Timberline* y del *Treeline*. El LSB del Iztaccíhuatl se encuentra a una altitud media de 4,042 msnm, y el del Popocatepetl a 3,818 m de elevación promedio.

En el Popocatepetl, también existe un aumento del *Timberline* y del *Treeline* de 1955 a 1995. Sin embargo, de 1995 a 2014 se registran descenso en el LSB sobre todo en el *Treeline*.

El comportamiento del LSB del volcán Popocatepetl de 1955 a 1995, es similar al del Iztaccíhuatl (1955-2012) controlado en primer instancia por la temperatura. Sin embargo,

en los últimos 20 años (1994-2014) el *Timberline* y el *Treeline* han descendido (de manera general) debido a la actividad volcánica.

Además de la temperatura, las variables biofísicas consideradas en el análisis del LSB del Popocatepetl fueron las mismas que Torres Beltrán (2013) utilizó para el Iztaccíhuatl, con el fin de comparar la dinámica del LSB de un volcán con actividad volcánica respecto a uno que está inactivo.

La correlación de las variables en el Popocatepetl indican que la orientación N-S juega un papel importante en el posicionamiento del *Pinus hartwegii*, en comparación con el Iztaccíhuatl, en donde la orientación E-W se correlaciona mejor con la altitud.

Para el Iztaccíhuatl, la correlación de la altitud con la variable “pendiente” fue positiva, es decir, que en el volcán inactivo, a mayor altura mayor pendiente en el terreno. Para el LSB, esta variable fue más determinante en el año 2012, en donde se convirtió en una variable relevante en el establecimiento de *Pinus hartwegii* en el Iztaccíhuatl. En cambio para el Popocatepetl, la variable “pendiente” se comporta de diferente manera en ambos límites del bosque; por una parte con el *Timberline* muestra relación negativa mientras que con el *Treeline* es positiva lo que indica que para el volcán activo, los individuos arbóreos aislados, aunado por otros factores como cambios en las temperaturas regionales, ascienden en pendientes escarpadas, tal como sugiere Leonelli (2011) al establecer que el ascenso en el *Treeline* será limitado por factores geomorfológicos y edáficos, además, en el futuro ambos factores determinaran la posición de este límite en las altas montañas del mundo. Mientras que en el bosque cerrado, estos factores no afectan la posición del *Pinus hartwegii*.

Existe muy baja correlación entre la morfología de las laderas y la altitud del LSB del Popocatepetl (Tabla 4.4), lo que sugiere que este factor no condiciona el ascenso o descenso del bosque. La pendiente se correlaciona negativamente con el *Timberline* lo que indica que las pendientes fuertes inhiben el ascenso del *Timberline*, mientras que en el caso del *Treeline* la correlación es muy baja y más de signo positivo. En el caso de la



radiación solar, presenta relación inversa tanto con el *Treeline* como con el *Timberline*. Esto contrasta con el *Treeline* del Iztaccíhuatl, donde los individuos de *Pinus hartwegii* se posicionan preferentemente en laderas que dispersan el agua y que están expuestas a la radiación solar (Torres Beltrán, 2013).

La correlación entre la acumulación de flujo y el LSB es extremadamente baja en el Popocatepetl, de modo que no parece una variable importante.

A pesar de mostrar una tendencia en el ascenso de su LSB, el Popocatepetl tiene otro factor –además del climático- que determina la posición del *Pinus hartwegii*, y es la actividad volcánica. Ésta no ha permitido que el bosque ascienda en algunas laderas, como la Oeste, debido a que no se han desarrollado las condiciones edáficas que permitan la colonización de cotas de mayor elevación. Situaciones como la anterior explican un descenso de LSB de manera general en el *Timberline* y el *Treeline*.

La temperatura, y un aumento regional de la misma, es la principal variable que puede estar determinando la posición del LSB en cotas de mayor elevación en ambos volcanes. En el Popocatepetl esta tendencia fue evidente en el *Timberline* entre 1955 y 1995-1999. A pesar de que el presente episodio eruptivo ha durado más en términos de tiempo e incluso ha sido más intenso que el de 1919-1921, de entrar en calma nuevamente el volcán, se esperaría que su LSB siguiera el comportamiento que había presentado hasta 1995 y continuará ascendiendo, como se observa no sólo en el Iztaccíhuatl sino en otras montañas del mundo.

## CONCLUSIONES

Al igual que en las demás montañas del centro de México, el LSB del Popocatépetl se encuentra formado por pinos de la especie *Pinus hartwegii*. Un aporte del análisis realizado en esta tesis fue conocer la dinámica del LSB en un volcán activo, el Popocatépetl. Así mismo, se caracterizaron las variables biofísicas que permiten o determinan dicha dinámica expresada en el ascenso y descenso del *Timberline* y del *Treeline*.

Por medio de un análisis multitemporal (1955,1995-1999 y 2014) en un Sistema de Información Geográfica (SIG), se encontró que el *Timberline* del Popocatépetl se situaba a una altitud ( $\pm 1$  desviación estándar) de 3,734 m  $\pm$  130 m en 1955 y a 3,772 m  $\pm$  129 m en 2014; el *Treeline* se encontraba a 3,894 m  $\pm$  101 m en 1955 y a 3,864  $\pm$  115 m en 2014; y el *Tree species line* a 4,043  $\pm$  59 m en 2014. Comparado con el dato de la altitud media del *Timberline* obtenido por Beaman (1962) en 3,911 msnm con una desviación estándar de 82 m para el mismo año de 1955. Se observa la clara diferencia entre la altitud encontrada por Beaman (1962) y la encontrada en el presente trabajo respecto a 1955. Sin embargo, la diferencia de medias varía debido al criterio que Beaman usó, al trazar el *Treeline* como parte del *Timberline* debido a lo abierto del bosque en la ladera Oeste del Popocatépetl.

Mediante la aplicación de la prueba T-Student se determinó un ascenso estadísticamente significativo del *Timberline* de 1955 de 38 metros entre 1955 y 2014, y de 46 metros entre 1955 y 1995-1999. Debido a que se analizó el período de 1995-1999 a 2014, que comprende la actividad volcánica actual del Popocatépetl, fue posible analizar la posible influencia de la actividad eruptiva en la posición del LSB. Se calculó un descenso del *Timberline* de 8 m de 1995-1999 al 2014.

Así mismo, el *Treeline* descendió 8 metros de 1955 a 1995-1999. De este último período al 2014 el límite descendió 22 metros, lo que sugiere que la dinámica del volcán en los últimos 20 años ha afectado más al *Treeline* que al *Timberline*, por encontrarse aquél por

encima del bosque cerrado, más cerca del cráter y por ende más expuesto a fenómenos de caídas y flujos piroclásticos.

Se identificaron también individuos del *Tree species line*. Cabe destacar que la mejor visibilidad obtenida fue en las imágenes de satélite de Google Earth. Sólo se obtuvieron los estadísticos descriptivos con el objetivo de conocer la media altitudinal a la que se encuentran los individuos de *Pinus hartwegii* en el *Tree species line*. En el año 2014 este límite se encontró a una elevación media de 4,043 msnm. Dicho de otra forma, los individuos arbóreos se encuentran 179 m por encima del *Treeline* del mismo período.

El ascenso del *Timberline* a partir de 1955 y antes de 1994, cuando inicia la reciente actividad eruptiva, aparentemente se debe a un aumento local de la temperatura, pues de acuerdo a las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio se encontró un ligero aumento de ésta a partir de 1977. La temperatura fue la variable que mejor se correlacionó con la altitud del LSB. Esto es consistente con lo reportado por Körner y Paulsen (2004), quienes reportan que a nivel global el LSB de las montañas está asociado con una temperatura media del suelo de  $6.7 \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ .

Se evaluaron además otras variables biofísicas que se consideran de importancia en el establecimiento del LSB determinándose que éstas no tienen el mismo comportamiento en el establecimiento y posición del *Timberline* y del *Treeline* ya que la correlación e importancia varía de acuerdo al tipo del LSB, variando además entre segmentos.

La orientación Norte-Sur, es la segunda variable que se correlacionó mejor con la altitud del LSB. Es decir, que los individuos de *Pinus hartwegii* tienen una mejor posición al Sur del volcán. Por otro parte, la orientación E-W muestra mejor correlación altitudinal del LSB al Este, pues en el Oeste la posición del *Timberline* y del *Treeline* se mantiene bajo por las condiciones edáficas que se presentan.

Respecto a las otras variables biofísicas analizadas la pendiente presenta valores bajos de correlación con la altitud; en general el *Timberline* prefiere las laderas menos escarpadas en comparación con el *Treeline* en donde el bosque prefiere laderas inclinadas, lo que

explica la manera dispersa de su posición. La morfología de laderas, radiación solar y acumulación de flujo, muestran correlaciones bajas con la altitud, es decir, estas variables no afectan significativamente la posición del LSB, si bien existe una relación entre la morfología de laderas y la acumulación del flujo del agua, ésta es débil y no significativa.

La comparación por segmento del LSB demostró que el segmento 14 (en el Norte) es el más alto en todos los *Timberline*. No obstante, esto no es igual para los *Treeline*, ya que el segmento más alto no se encuentra en la misma vertiente del volcán, lo que se explica por el mayor dinamismo que tiene este límite respecto al del bosque cerrado.

Una de las limitantes en el ascenso del *Pinus hartwegii* es la naturaleza de la ceniza volcánica, en particular su granulometría, misma que parece influir de manera importante en la baja altitud del LSB en la ladera Oeste tal como encontró Beaman (1962). Si bien no se realizó un análisis detallado de este aspecto, se pudo observar en el área inmediatamente al Sur de Tlamacas (ladera Norte del volcán a 4,000-4,1000 m) que una baja cobertura o ausencia del zacatonal (y presumiblemente también del *Pinus hartwegii*) de ciertas zonas, coincide con suelos de textura arenosa, lo cual resulta en una muy baja retención de agua en el suelo y condiciones edafóxicas como las descritas por Giménez de Azcárate y Escamilla (1999).

De acuerdo a los reportes de CENAPRED (2001, 2012) se pudo establecer *grosso modo* las vertientes del volcán que más han sido afectadas por la actividad eruptiva de los últimos 20 años. Sin embargo, se carece de información puntual acerca del impacto de la actividad volcánica en el LSB pues ésta sólo pudo establecerse por los cambios altitudinales obtenidos a partir de la posición del *Timberline* y del *Treeline* de 1995 al 2014 y en las diferencias altitudinales que por segmento de cada límite se obtuvieron.

En una porción de la ladera Norte del volcán los efectos de dicha actividad parece no haber afectado a los individuos del *Tree species line*, específicamente en la barranca de Tenenepaco-Huiloac a pesar de que dos de los lahares más potentes del Popocatepetl

(1997-2001) se emplazaron en ella, pues se ha observado una rápida recolonización del *Pinus hartwegii* a una altitud de 4,028 msnm, colonizando depósitos nuevos de lahar.

Así mismo, pueden considerarse analizar otras variables como son la precipitación, la humedad y la temperatura del suelo en el análisis del LSB, desempeñando ésta última un papel muy importante en el establecimiento, desarrollo y crecimiento del *Pinus hartwegii*.

Al comparar con un estudio similar (Torres Beltrán, 2013) al presente realizado se observó que el LSB del Popocatepetl está relativamente más bajo que el del Iztaccíhuatl. Por ejemplo, en 2014 el *Timberline* se encontraba 241 m más abajo en el Popocatepetl (3,772 m  $\pm$  129 m) que en el Iztaccíhuatl (4,013 m  $\pm$  83 m en 2012), y el *Treeline* 208 m por debajo (3,864  $\pm$  115 m del Popocatepetl contra 4,072 m  $\pm$  74 m del Iztaccíhuatl respectivamente). Si bien un volcán activo tiene condiciones muy particulares que influyen en la posición del *Timberline* y del *Treeline*, el análisis multitemporal del Popocatepetl permitió determinar que existía un ascenso hasta antes de 1994 siguiendo la misma tendencia que otras montañas del mundo y de México. Por lo tanto, de entrar en una calma eruptiva como en el pasado, teóricamente se esperaría que el bosque de *Pinus hartwegii* continúe colonizando cotas de mayor altitud como su volcán vecino, el Iztaccíhuatl.

Para el caso del Popocatepetl el ascenso del LSB estaba relacionado con un aumento local de la temperatura y el descenso actual, a la actividad eruptiva aunado a las variables geomorfológicas.

Es necesario explorar, profundizar y caracterizar el impacto de la actividad volcánica en el bosque, específicamente en su límite superior, explotando técnicas como la dendrocronología, misma que se utilizó de manera somera en este estudio. Con los resultados dendrocronológicos se encontró una edad joven del arbolado conforme se asciende en altitud, además de que individuos muestreados no fueron afectados por los lahares más potentes del Popocatepetl. No obstante, se encontró un descenso general del *Timberline* en 8m.

De realizar un análisis a profundidad, se podrá relacionar el período reciente de actividad volcánica con la edad del arbolado y establecer de esta forma el papel que juega la actividad eruptiva en la posición del *Timberline* y del *Treeline*, y de individuos del *Tree species line* en el Popocatepetl. Aunado a esto, un análisis dendrogeomorfológico puede ayudar a estimar el impacto en la vegetación por fenómenos volcánicos como son los lahares o los incendios provocados por el desplazamiento del material incandescente y de flujos piroclásticos a través del análisis de los anillos de crecimiento y el cambio en la morfología de éstos.

Conocer los factores que condicionan la posición del LSB de las montañas del mundo es importante, más aún no debe descartarse hacer este tipo de estudios en ambientes volcánicos activos, pues como pudo identificarse (aunque en menor medida) probablemente la actividad volcánica no es un factor que limite el crecimiento y ascenso altitudinal del *Timberline* y del *Treeline*, lo cual es interesante por la dinámica que la actividad eruptiva presenta y los efectos de la misma en la vegetación.

Si bien, la media altitudinal del *Timberline* y del *Treeline* obtenidas en este trabajo varían de los de Beaman (1962), al redefinir el LSB del Popocatepetl y hacer trazos originales en un Sistema de Información Geográfica ha sido posible enriquecer los datos de la posición de ambos límites para el volcán Popocatepetl, haciéndolo susceptible de comparar en un futuro próximo, sobre todo tratándose de un volcán activo.

## REFERENCIAS

- Aguilar, A.F. (2012). Evaluación de germinación en laboratorio y semillero de la especie *Pinus hartwegii* de diferentes años de colecta. Tesis de Licenciatura. Universidad Veracruzana. 32 p.
- Aguilera, J. y Ordoñez, E. (1895). *Expedición científica al Popocatepetl*. Ed. Comisión Geológica Mexicana. México. 36 p.
- Aguayo, M. (2007). Cómo realizar "paso a paso" un contraste de hipótesis con SPSS para Windows y alternativamente con EDIINFO y EPIDAT: (II) Asociación entre una variable cuantitativa y una categórica (comparación de medidas entre dos o más grupos independientes). Página web consultada el 2 de diciembre de 2014: [http://www.fabis.org/html/archivos/docuweb/contraste\\_hipotesis\\_2r.pdf](http://www.fabis.org/html/archivos/docuweb/contraste_hipotesis_2r.pdf)
- Aguayo, M. y Lora, E. (2007). Cómo realizar "paso a paso" un contraste de hipótesis con SPSS para Windows: (III) Relación o asociación y análisis de la dependencia (o no) entre dos variables cuantitativas. Correlación y regresión lineal simple. Página web consultada el día 2 de diciembre de 2014: [http://www.fabis.org/html/archivos/docuweb/contraste\\_hipotesis\\_3r.pdf](http://www.fabis.org/html/archivos/docuweb/contraste_hipotesis_3r.pdf)
- Almeida- Leñero.; Cleef, A.M.; Herrera, A.; Velázquez, A. y Luna, I. (1994). El zacatonal alpino del Volcán Popocatepetl, México, y su posición en las montañas tropicales de América. *Phytoecologia*: 22 (3), 391-436.
- Almeida- Leñero; Giménez de Azcarate, J.; Cleef, A.M.; González, T.A. (2004). Las comunidades vegetales del zacatonal alpino de los volcanes Popocatepetl y Nevado de Toluca, Región central de México. *Phytoecologia*: 34, 91-132.
- Alvarado, M.; Foroughbakhch, R.; Jurado, E.; Rocha, A. (2002). El cambio climático y la fenología de las plantas. *Ciencia UANL*: 5(4), 493-500.
- Andrés, N.; Palacios, D.; Zamorano, J.J.; Vázquez-Selem, L. (2010). Distribución del permafrost e intensidad de los procesos periglaciares en el estratovolcán Iztaccíhuatl (México). *Ería*: 83, 291-310.
- Andrés, N.; Palacios, D.; Zamorano, J.J.; Mendoza-Margáin, C.; Vázquez-Selem, L. (2012). Temperatura del suelo en el volcán Popocatepetl: Implicaciones entre actividad volcánica y deglaciación. *VIII Reunión Nacional de Geomorfología*.
- Arriaga, L. y Gómez, L. (2007). Posibles efectos del cambio climático en algunos componentes de la biodiversidad de México. En Martínez, J. y Fernández, A. (comp.), *Cambio climático: una visión desde México*. SEMARNAT-INE. México.
- Barón, F.J. y Téllez, M. (2004). *Apuntes de Bioestadística*. Ed. UMA. Málaga, España. 54 p.
- Beaman, J. (1962). The Timberlines of Iztaccíhuatl and Popocatepetl, México. *Ecology*: 43 (3), 377-385.
- Berdanier A. (2010). Global Treeline Position. *Nature Education Knowledge*: 3 (10), 1-8.
- CENAPRED (2001). Las cenizas volcánicas del Popocatepetl y sus efectos para la aeronavegación e infraestructura aeroportuaria. México, D.F.

- CENAPRED (2012). Historia de la Actividad del Volcán Popocatepetl, 17 años de erupciones. México, D.F.
- CLICOM (2014). Mexico Climatological Station Network Data. Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Página web consultada el día 11 de noviembre de 2014: <http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html>
- De Pedraza, G.J.; Carrasco, R.M.; Díez, A.; Martín, J.; Martín, A.; Sanz, M. (1996). *Geomorfología. Principios, Métodos y Aplicaciones*. Ed. Rueda. Madrid, España. 414 p.
- Delgado-Granados, H. (1996). Los glaciares del Popocatepetl: ¿huéspedes efímeros de la montaña? *Ciencias*: 41, 24-32.
- Delgado-Granados, H. (1997). The glaciers of Popocatepetl volcano (Mexico): changes and causes. *Quaternary International*: 43/44, 53-60.
- Delgado-Granados, H.; Miranda, J.P.; Huggel, C.; Ortega del Valle, S.; Alatorre, M.A. (2007). Chronicle of a death foretold: Extinction of the small-size tropical glaciers of Popocatepetl volcano (Mexico). *Global and Planetary Change*: 56 (1-2), 13-22.
- Demant, A. (1978). *Características del eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación*. Instituto de Geología, UNAM: 2 (2), 172-187.
- Demant, A. (1982). *Interpretación geodinámica del volcanismo del eje Neovolcánico Transmexicano*. Instituto de Geología, UNAM: 5 (2), 217-222.
- Espinasa, R. (2007). *Evolución morfoestratigráfica del volcán Popocatepetl*. Tesis de Doctorado, UNAM. 137 p.
- ESRI (2013). Manual de ArcGis 10.1. Página web consultada el día 27 de noviembre de 2014: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.1/index.html#/na/00qn0000001p000000/>
- Farrington, O.C. (1897). *Observations on Popocatepetl and Ixtaccihuatl. With a review of the geographic and geologic features of the mountains*. Field Columbian Museum, Publication 18, Geological Series, 1. Field Columbian Museum, Chicago, 120 pp.
- Franco Ramos, O. (2005). *Geomorfología del volcán Popocatepetl*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. 144 p.
- Franco Ramos, O. (2009). *Procesos morfodinámicos en la vertiente norte del volcán Popocatepetl*. Tesis de Maestría en Geografía, UNAM. 113 p.
- García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana)*. Instituto de Geografía. UNAM. México, D.F. 246 p.
- García-Romero, A. (1998). *Análisis integrado de paisajes en el occidente de la cuenca de México (La vertiente oriental de la Sierra de las Cruces, Monte Alto y Monte Bajo)*. Tesis de Doctorado. Facultad de Geografía e Historia, Universidad Complutense de Madrid. 531 p.
- García de Celis, A.; Arroyo, P.; Gandía, A. (2008). Cambios recientes en el límite superior del bosque en Urbión: Gestión forestal, ganadería y clima. *Zubía Monográfico*: 20, 97-118.
- Giménez de Azcárate, J., y Escamilla, M. (1999). Las comunidades edafoxerófilas (enebrales y zacatonales) en las montañas del centro de México. *Phytocoenologia*, 29(4): 449-468.



- González, E. (2006). Peligros y riesgos volcánicos en Biogeografía: efectos sobre la vegetación. IV Congreso Español de Biogeografía.
- Harchs, M.; Hulme, P.E.; McGlone, M.S.; Duncan, R.P. (2009). Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*: 12, 1040-1049.
- Holtmeier, F.K. y Broll, G. (2005). Sensivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape and local scales. *Global Ecol. Biogeogr*: 14, 395-410.
- Imágenes satelitales del Servicio de Imágenes del Planeta Google Earth™ de Abril de 2014.
- INEGI (1995). E14B52a, Ortofoto. Escala: 1: 75,000.
- INEGI (1995). E14B51c, Ortofoto. Escala: 1: 75,000.
- INEGI (1999). E14B42d, Ortofoto. Escala: 1: 75,000.
- INEGI (1999). E14B41f, Ortofoto. Escala: 1: 75,000.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)- CONABIO (1995). "Edafología". Escalas 1: 250,000 y 1:1,000,000. México.
- Körner, C. (1998). A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*: 115, 445-459.
- Körner, C. (2012). Alpine Treelines. Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits. Ed. Springer. Basilea, Suiza. 219 p.
- Körner, C. y Paulsen, J. (2004). A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*: 31, 713-732.
- Lauer, W. (1978). Timberline studies in Central Mexico. *Arctic and Alpine Research*: 10 (2), 383-396.
- Lauer, W. y Stiehl, E. (1973). Hygrothermische kilmatypen im raum Puebla-Tlaxcala (Mexiko). *Erdkunde*: 27, 230-240.
- Lauer, W. y Klaus, D. (1975). Geocological investigations on the Timberline of Pico of Orizaba, Mexico. *Arctic and Alpine Research*: 7(4), 315-330.
- Leonelli, G.; Pelfini, M.; Morra di Cella, U.; Garavaglia, V. (2011). Climate Warming and the Recent Treeline Shift in the European Alps: The Role of Geomorphological Factors in High -Altitude Sites. *Ambio*: 40, 264-273.
- Macías, J.L. (2005). Geología e historia eruptiva de algunos de los grandes volcanes activos de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*: Tomo LVLL, 3, 379-424.
- Macías, J.L.; Arce, J.L.; García-Tenorio, E.; Layer, P.W.; Rueda, H.; Reyes, A.; López-Pizaña, F.; Avellán, D. (2012). Geology and geochronology of Tlaloc, Telapón, Iztaccíhuatl, and Popocatepetl volcanoes, Sierra Nevada, central Mexico. *The Geological Society of America*: 25, 163-193.
- Mooser, F.; Montiel, A.; Zuñiga, A. (1996). Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla. Estratigrafía, tectónica y aspectos geotérmicos. Comisión Federal de Electricidad, México.

- Muñoz, E. (2007). *Los lahares del Popocatepetl: obtención y tratamiento de la información para la prevención de riesgos*. Tesis de Doctorado. Facultad de Geografía e Historia, Universidad Complutense de Madrid. 222 p.
- Resler, L. (2006). Geomorphic Controls of Spatial Pattern and Process at Alpine Treeline. *The Professional Geographer*: 58(2), 124-138.
- Robin, C. (1984). Le Volcán Popocatepetl (Mexique) : structure, evolution pétrologique et risques. *Bull. Volcanol*: 47 (1): 1-23.
- Rodríguez, D (2002). Ecología del fuego en el ecosistema de *Pinus hartwegii* Lindl. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*: 7 (2), 143-149.
- Sánchez-González, A. y López-Mata, L. (2003). Clasificación y ordenación de la vegetación del norte de la Sierra Nevada, a lo largo de un gradiente altitudinal. *Anales del Instituto de Biología. UNAM. Serie Botánica*: 74 (1), 47-71.
- Siebe, C.; Abrams, M.; Macías, J.L. (1995). Derrumbes gigantes, depósitos de avalancha de escombros y edad del actual cono del volcán Popocatepetl. CENAPRED. México, 195-220.
- Sveinbjörnsson, B. (2000). North American and European Treelines: External Forces and Internal Processes Controlling Position. *Ambio*: 29 (7), 388-395.
- Stokes, M.A. y Smiley, T.L. (1996). *An introduction to Tree-ring dating*. The University of Arizona Press, Tucson, 73 pp.
- SPSS (2011). Guía breve de IBM SPSS Statistics 20, USA. 183 p.
- SPSS (2013). IBAM SPSS, Versión 22.0 (software) USA.
- Tanarro, L.M.; Orozco, J.J.; Palacios, D. (2004). Control de la deglaciación del volcán Popocatepetl (México) por fotogrametría como aplicación a la prevención de lahares. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. (Sec. Geol.)*: 99 (1-4), 105-117.
- Torres Beltrán, C. (2013). *Análisis de los Cambios del Límite Superior del Bosque en el volcán Iztaccíhuatl*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM. 122 p.
- Villanueva, J.; Cerano, J.; Vázquez-Selem, L.; Sthale, D.; Fulé, P.; Yocom, L.; Franco-Ramos, O.; Ruíz, J.A. (2013). Red dendrocronológica del pino de altura (*Pinus hartwegii*) para estudios dendroclimáticos en el noreste y centro de México Lindl. *Investigaciones Geográficas. UNAM. Boletín del Instituto de Geografía*.

# ANEXOS

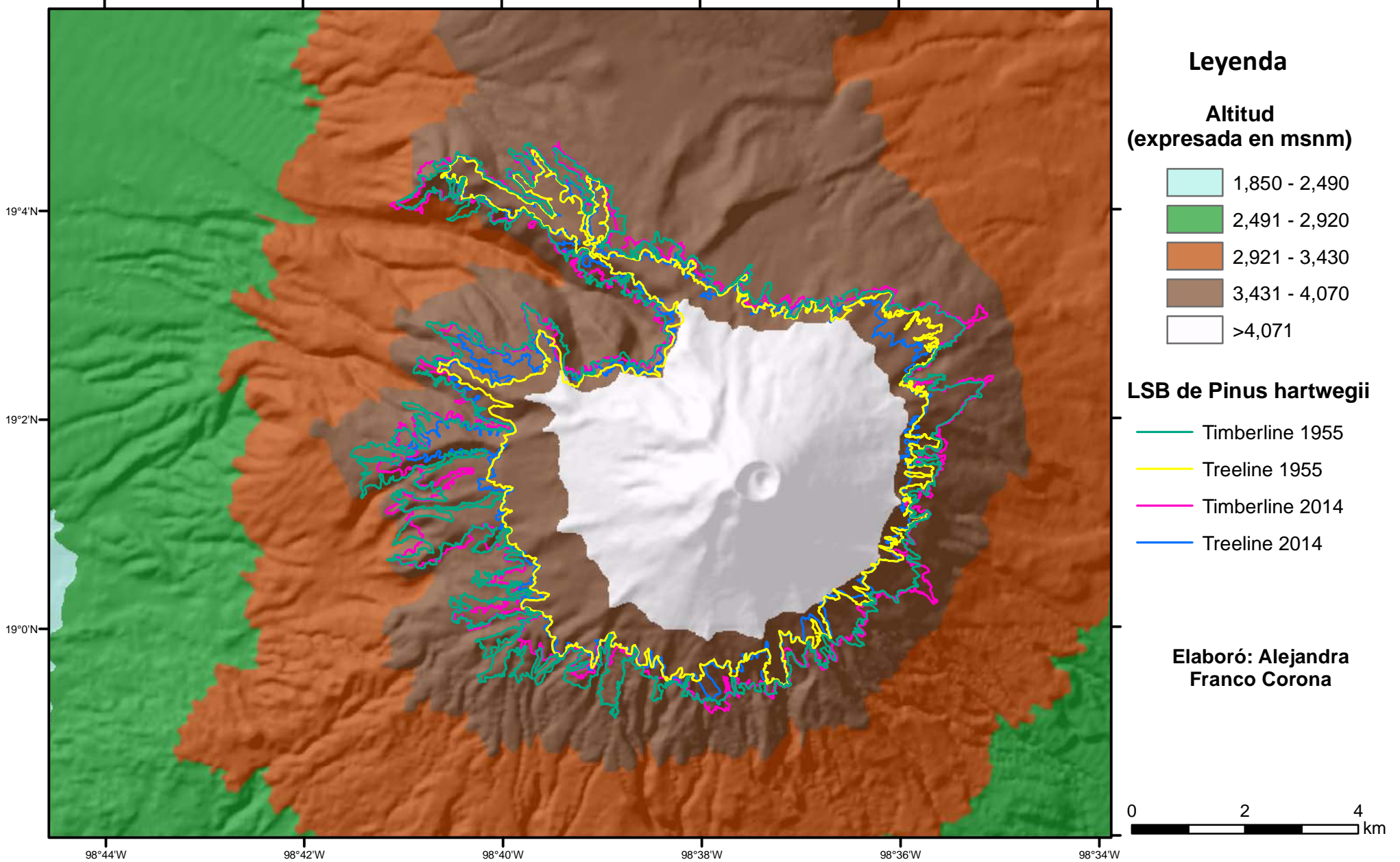
---

# ANEXO A

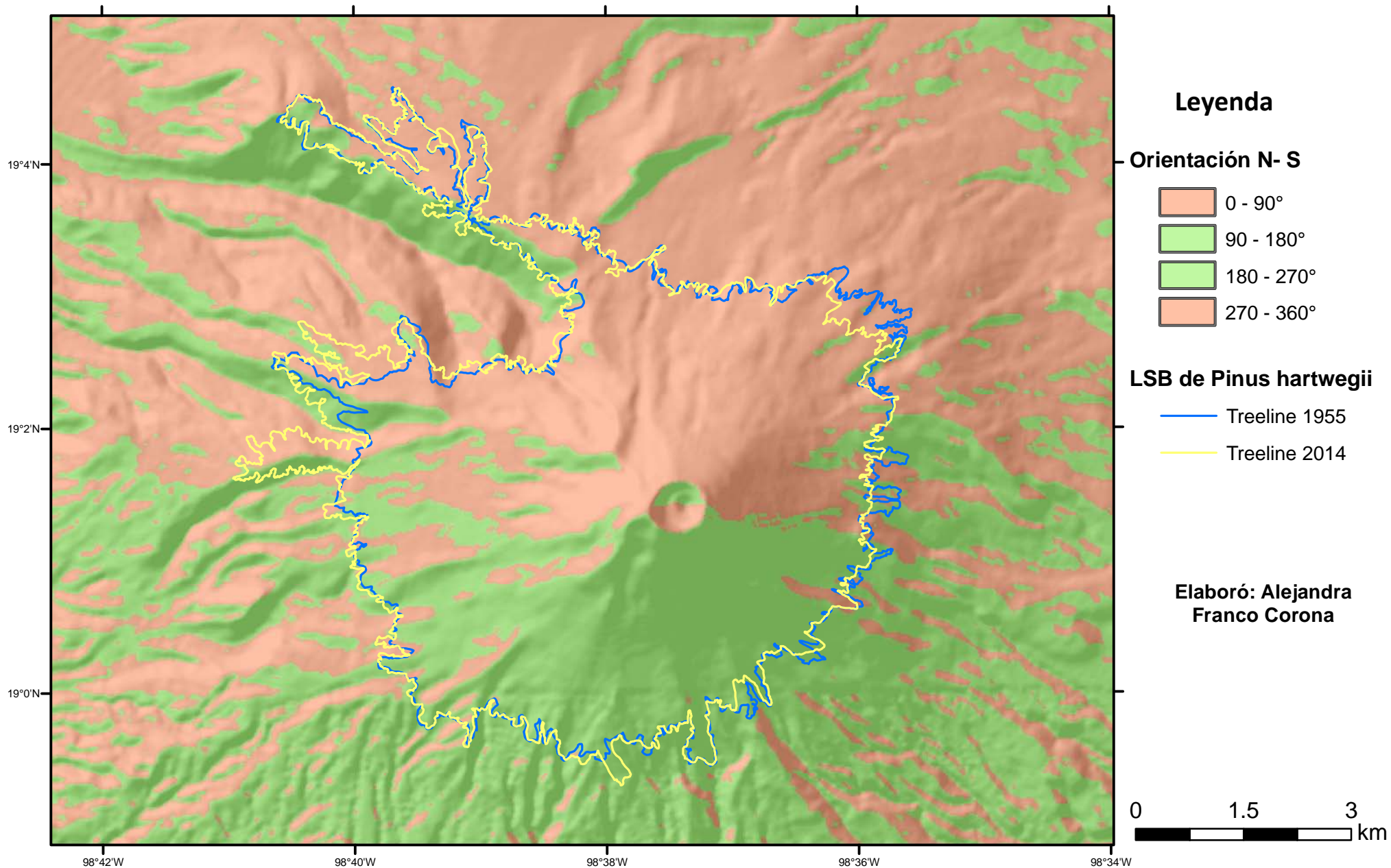
Mapas

---

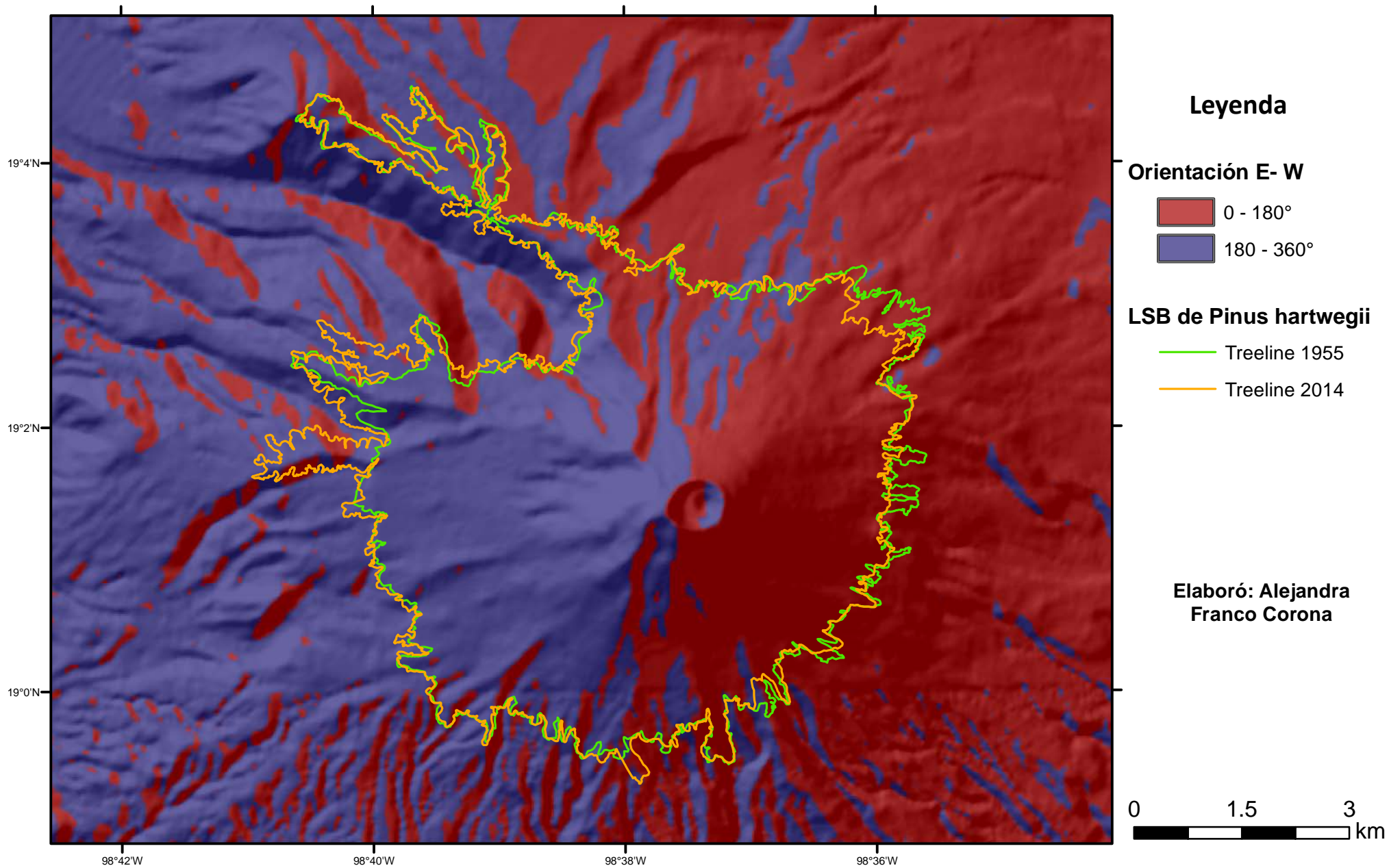
# Mapa altimétrico



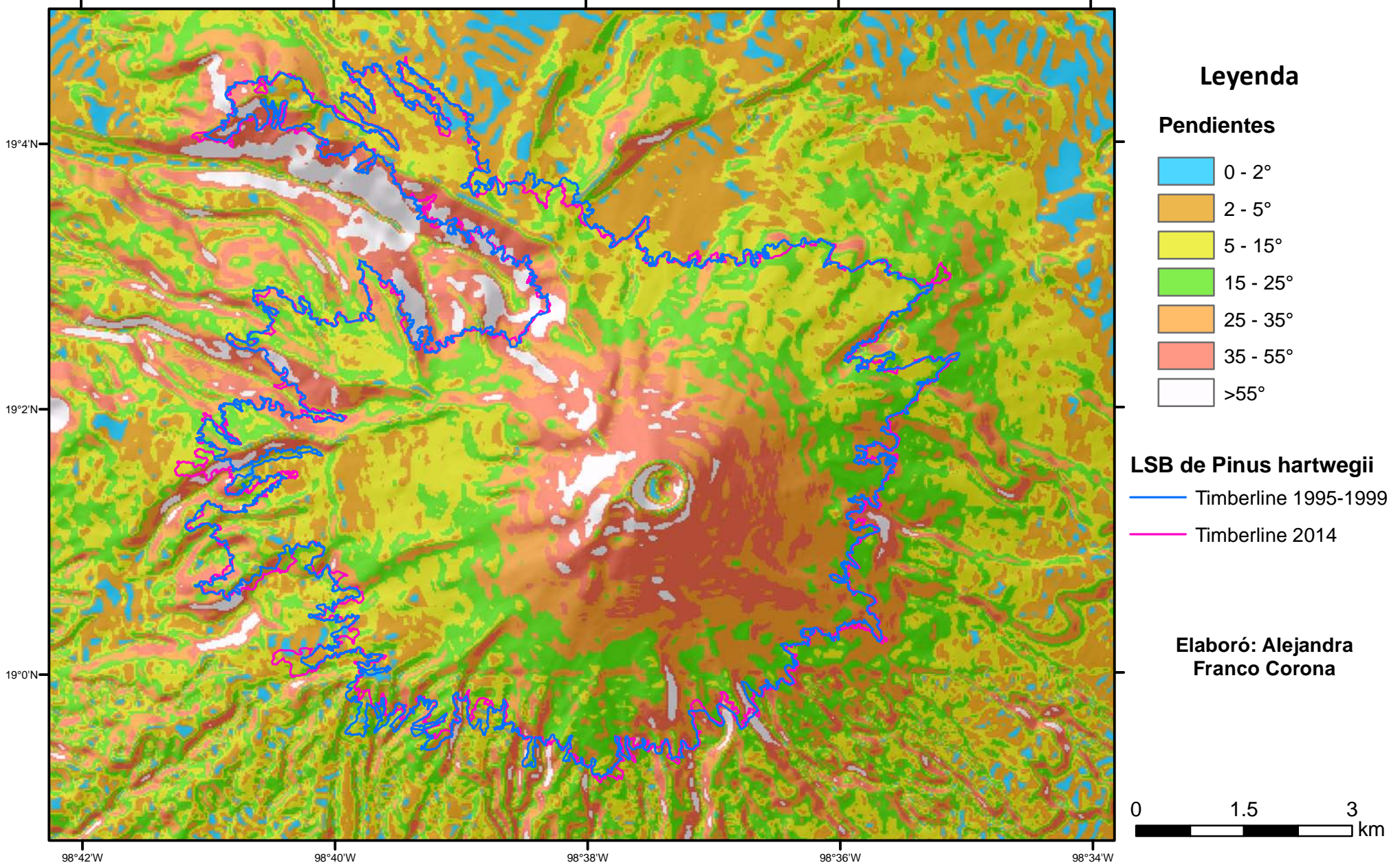
# Mapa de orientación de laderas Norte- Sur



# Mapa de orientación de laderas Este- Oeste

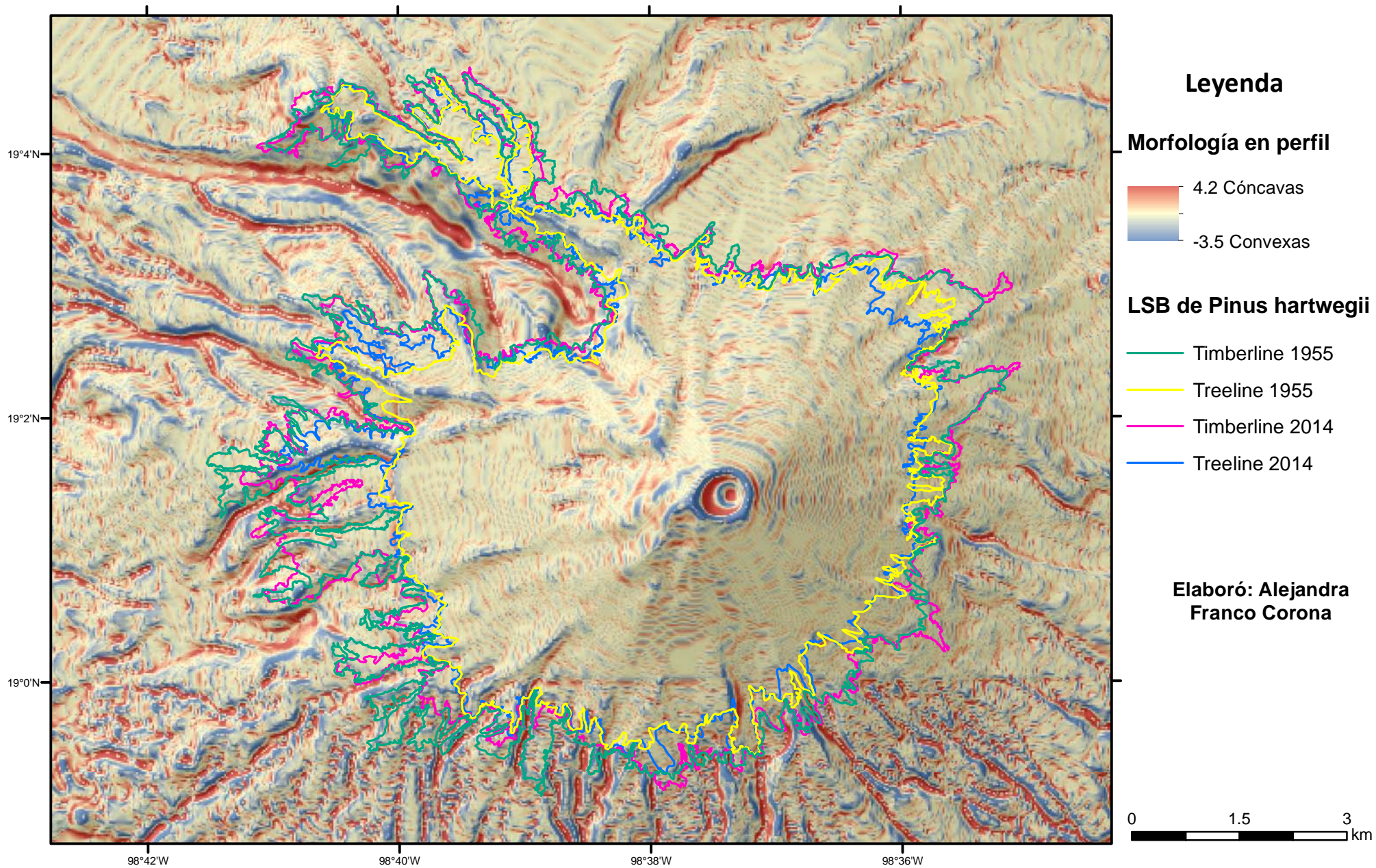


# Mapa de pendientes

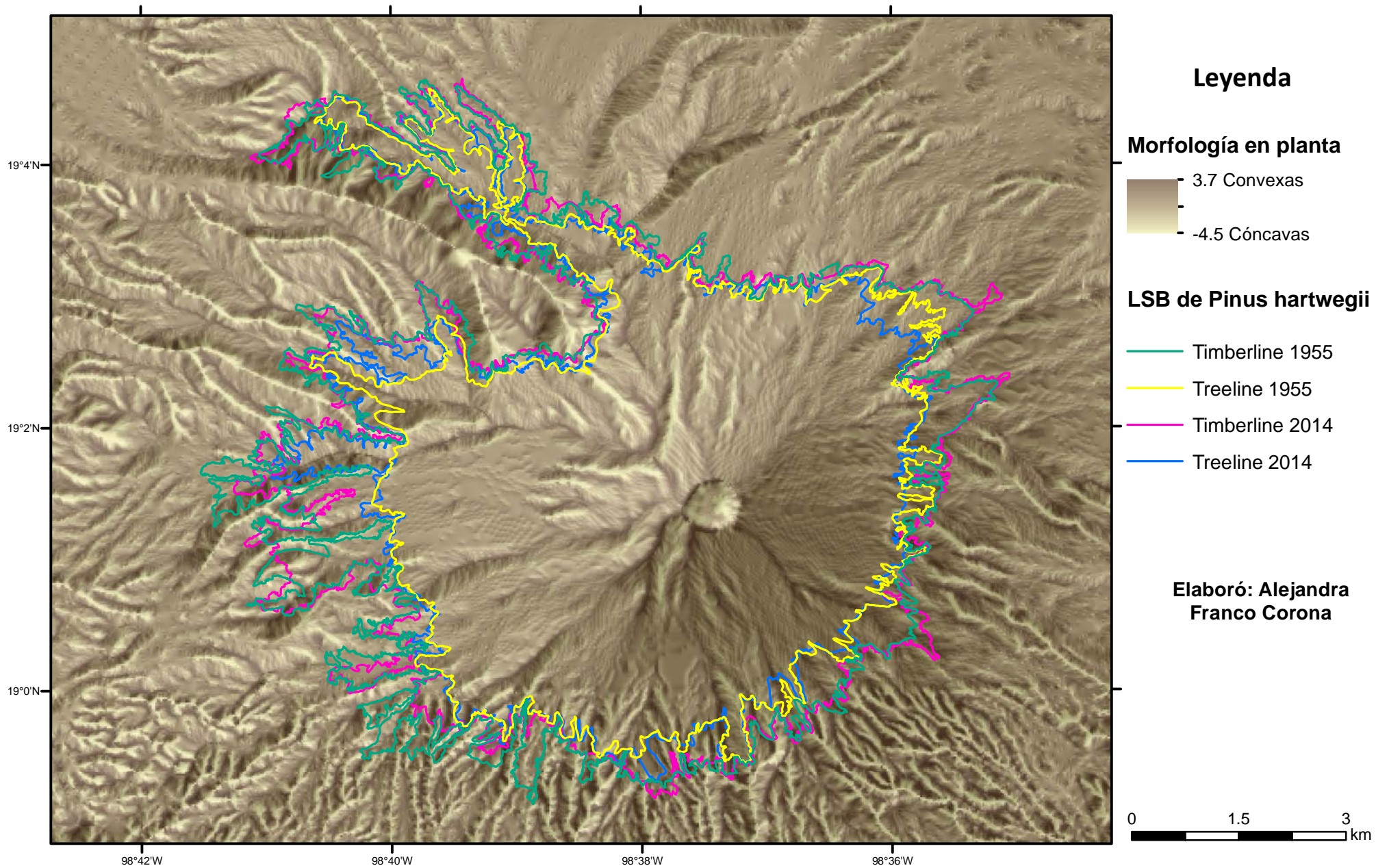




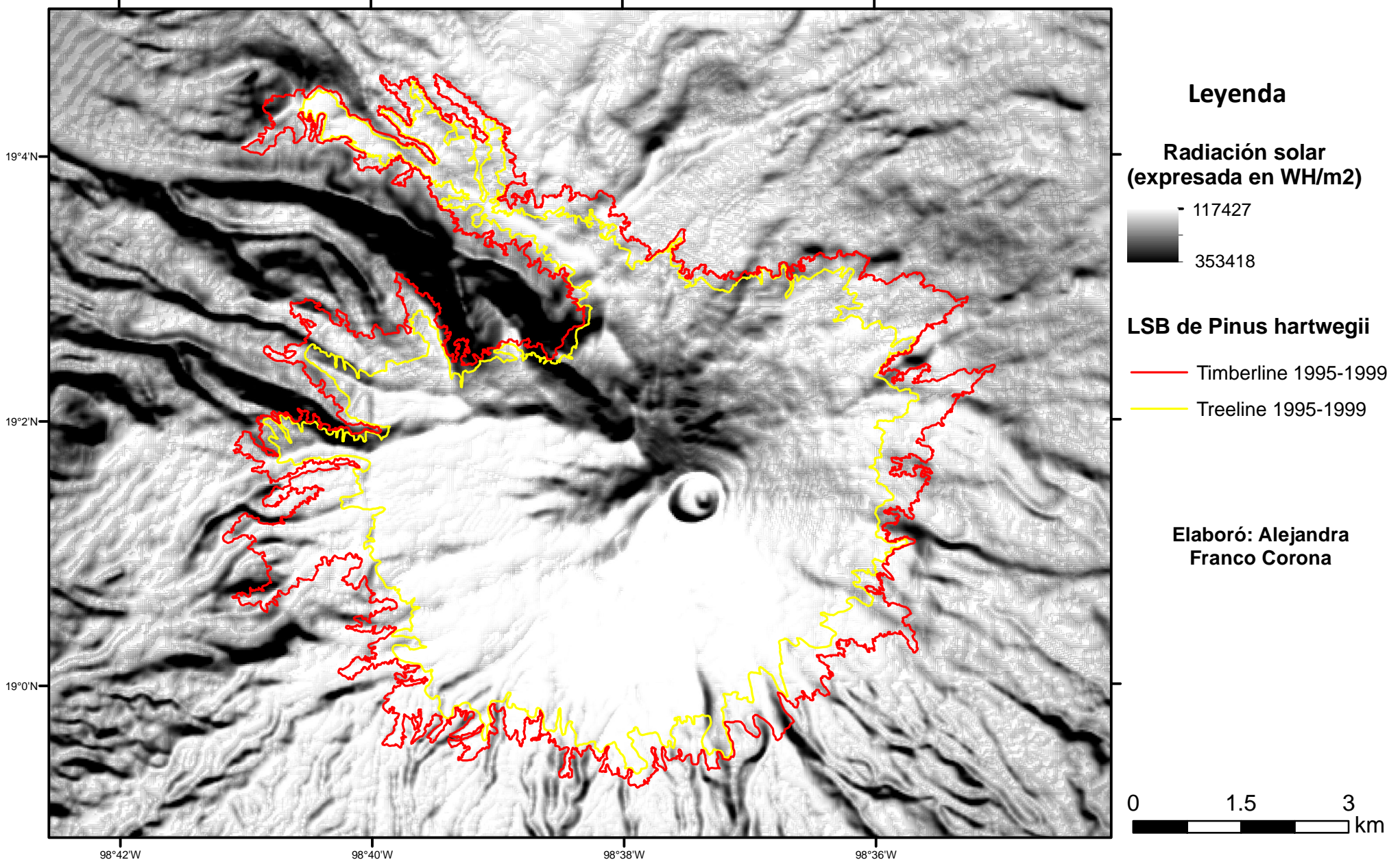
# Mapa de geometría del relieve en perfil



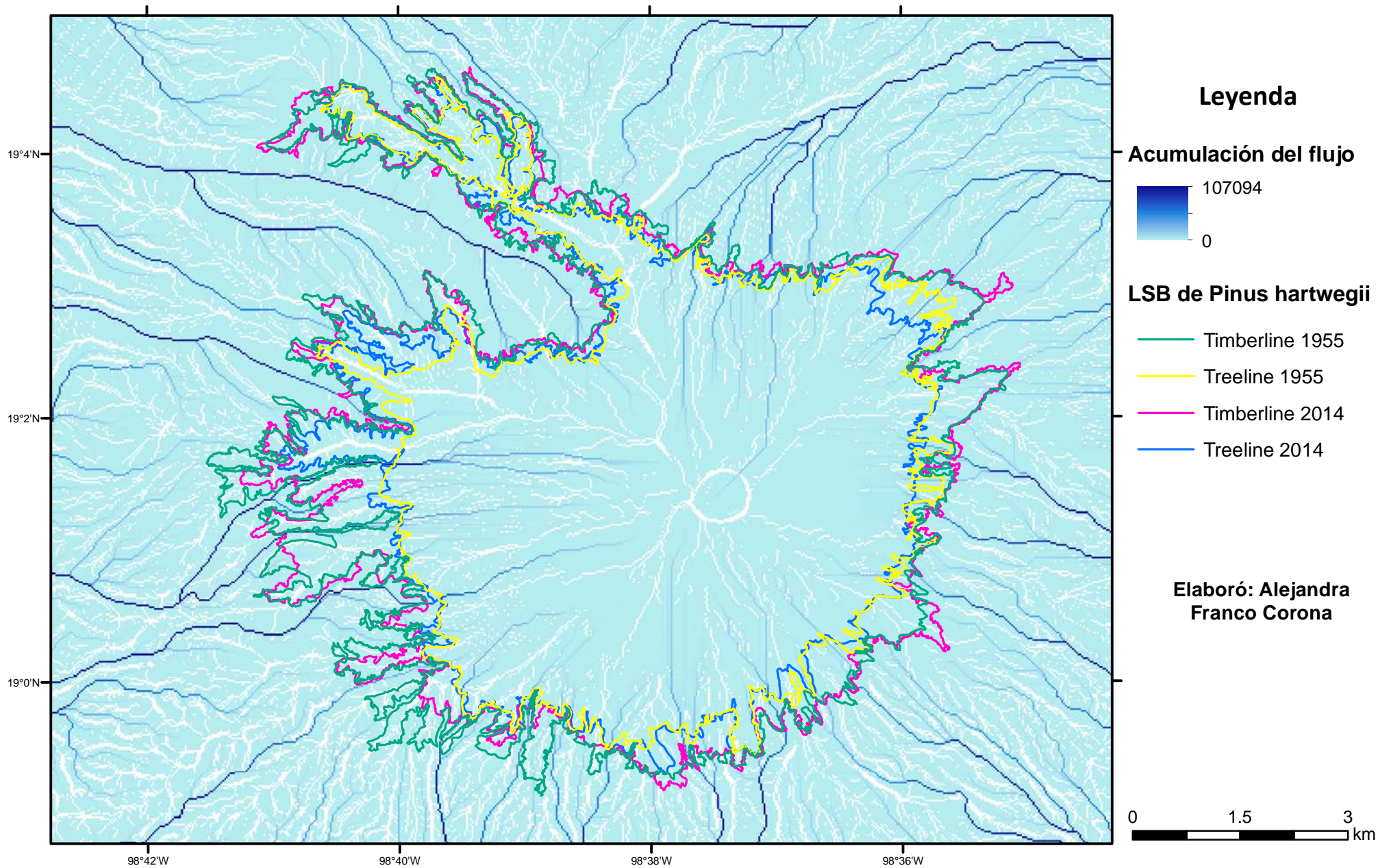
# Mapa de geometría del relieve en planta



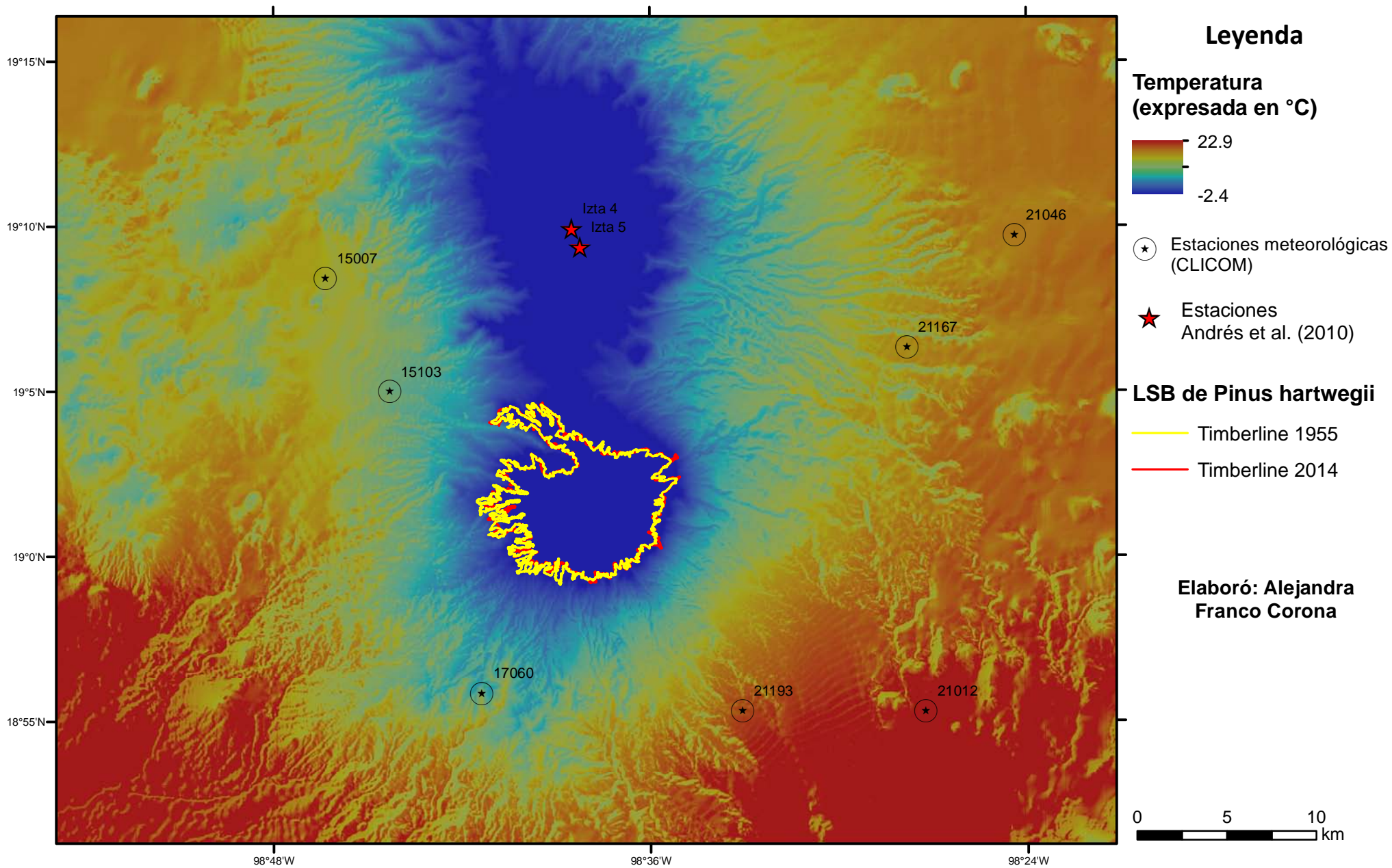
# Mapa de radiación solar



# Mapa de acumulación del flujo



# Mapa de temperaturas interpoladas



# ANEXO B

## Pruebas Estadísticas

---

# ANEXO B1

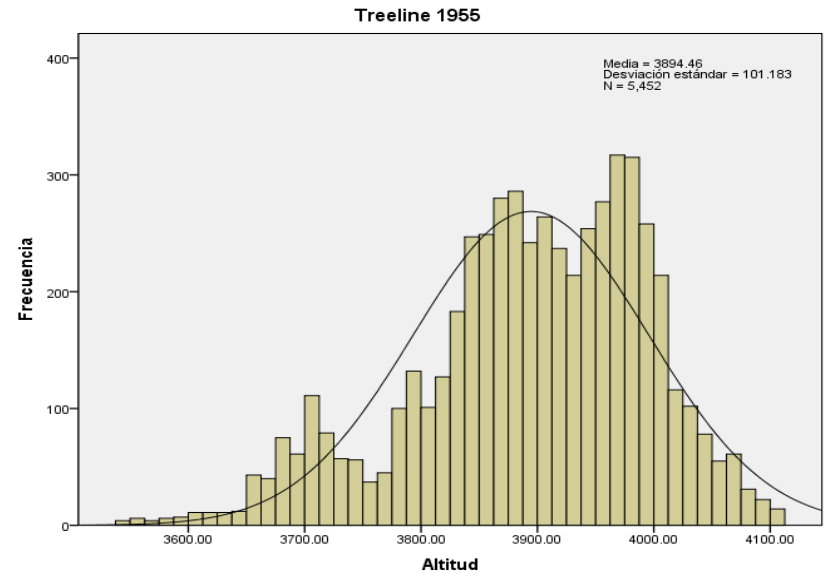
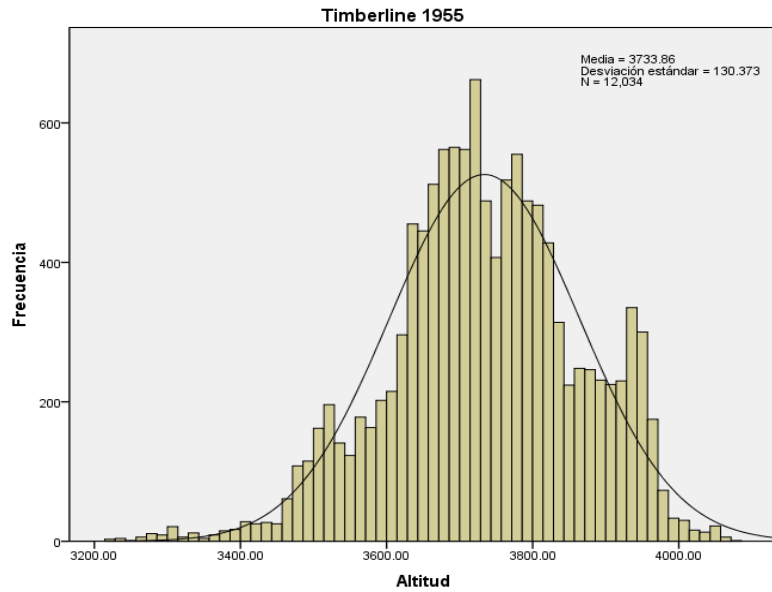
Tabla de variables (muestra en SPSS)

	Punto	Altitud	Orientación	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil
1	0	3808.18	225.08	-44.92	-45.08	14.97	20
2	1	3808.18	225.08	-44.92	-45.08	14.97	20
3	2	3814.17	225.06	-44.94	-45.06	17.59	-44
4	3	3814.17	225.06	-44.94	-45.06	17.59	-44
5	4	3818.89	223.44	-46.56	-43.44	16.32	-31
6	5	3823.25	212.60	-57.40	-32.60	15.74	20
7	6	3818.89	223.44	-46.56	-43.44	16.32	-31
8	7	3813.32	210.24	-59.76	-30.24	17.88	-19
9	8	3820.56	197.41	-72.59	-17.41	17.01	.00
10	9	3820.56	197.41	-72.59	-17.41	17.01	.00
11	10	3819.51	188.04	-81.96	-8.04	18.31	-15
12	11	3819.51	188.04	-81.96	-8.04	18.31	-15
13	12	3819.51	188.04	-81.96	-8.04	18.31	-15
14	13	3827.57	188.99	-81.01	-8.99	16.35	-17
15	14	3834.50	192.62	-77.38	-12.62	13.63	-26
16	15	3834.50	192.62	-77.38	-12.62	13.63	-26
17	16	3834.50	192.62	-77.38	-12.62	13.63	-26
18	17	3839.77	199.93	-70.07	-19.93	8.58	-52
19	18	3839.77	199.93	-70.07	-19.93	8.58	-52
20	19	3841.84	163.89	-73.89	-16.11	4.57	.07
21	20	3841.84	163.89	-73.89	-16.11	4.57	.07
22	21	3841.84	163.89	-73.89	-16.11	4.57	.07
23	22	3841.84	163.89	-73.89	-16.11	4.57	.07
24	23	3842.50	144.96	-54.96	-35.04	9.26	.39
25	24	3842.50	144.96	-54.96	-35.04	9.26	.39
26	25	3842.90	157.31	-67.31	-22.69	13.61	.97
27	26	3842.90	157.31	-67.31	-22.69	13.61	.97
28	27	3851.23	155.92	-65.92	-24.08	17.02	-11
29	28	3857.84	142.50	-52.50	-37.50	12.39	-42
30	29	3860.16	125.67	-35.67	-54.33	10.66	.34
31	30	3862.66	130.25	-40.25	-49.75	14.69	.77
32	31	3869.07	139.58	-49.58	-40.42	15.69	.13
33	32	3875.95	143.21	-53.21	-36.79	17.23	-47
34	33	3878.70	171.06	-81.06	-8.94	12.68	-26
35	34	3869.07	139.58	-49.58	-40.42	15.69	.13
36	35	3872.43	166.61	-76.61	-13.39	13.02	.09

	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp	Tipo_suelo	Segmento
1	.34	1028517.19	1.00	6.9	Litosol	5
2	.34	1028517.19	1.00	6.9	Litosol	5
3	.40	1024869.56	8.00	6.9	Litosol	5
4	.40	1024869.56	8.00	6.8	Litosol	5
5	-.09	1028690.31	3.00	6.8	Litosol	5
6	-.56	1036770.69	810.00	6.8	Litosol	5
7	-.09	1028690.31	3.00	6.8	Litosol	5
8	-.62	1034352.25	816.00	6.8	Litosol	5
9	-.36	1042591.25	4.00	6.8	Litosol	5
10	-.36	1042591.25	4.00	6.8	Litosol	5
11	-.08	1043996.19	2.00	6.8	Litosol	5
12	-.08	1043996.19	2.00	6.8	Litosol	5
13	-.08	1043996.19	2.00	6.8	Litosol	5
14	.11	1046239.19	1.00	6.8	Litosol	5
15	.26	1046691.75	.00	6.8	Litosol	5
16	.26	1046691.75	.00	6.8	Litosol	5
17	.26	1046691.75	.00	6.7	Litosol	5
18	.34	1040501.00	.00	6.7	Litosol	5
19	.34	1040501.00	.00	6.7	Litosol	5
20	.25	1029399.06	.00	6.7	Litosol	5
21	.25	1029399.06	.00	6.7	Litosol	5
22	.25	1029399.06	.00	6.7	Litosol	5
23	.25	1029399.06	.00	6.7	Litosol	5
24	.09	1029893.88	.00	6.7	Litosol	5
25	.09	1029893.88	.00	6.7	Litosol	5
26	-.55	1030548.75	6.00	6.7	Litosol	5
27	-.55	1030548.75	6.00	6.7	Litosol	5
28	-.27	1030735.13	4.00	6.7	Litosol	5
29	.22	1027709.75	2.00	6.7	Litosol	5
30	.02	1015506.38	.00	6.6	Litosol	5
31	-.30	1012176.00	13.00	6.6	Litosol	5
32	.22	1025911.00	1.00	6.5	Litosol	5
33	.42	1027659.75	10.00	6.5	Litosol	5
34	.58	1047476.31	.00	6.5	Litosol	5
35	.22	1025911.00	1.00	6.5	Litosol	5
36	.46	1045653.63	.00	6.6	Litosol	5

# ANEXO B2

## Histogramas y estadísticos descriptivos por LSB



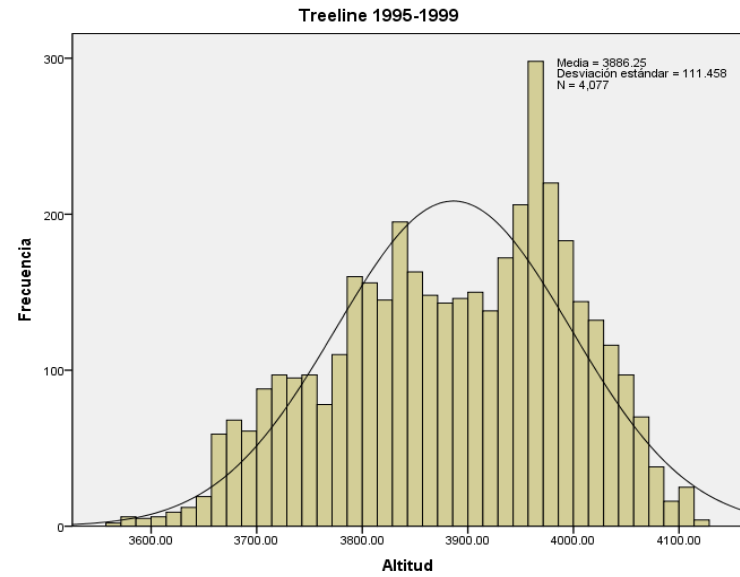
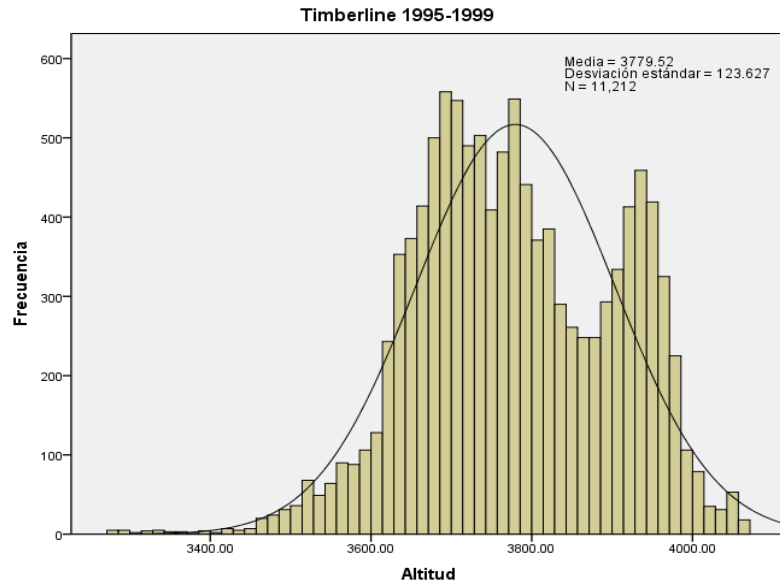
<i>Timber 55</i>	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	12034	853.29	3220.09	4073.39	3733.86	130.37	16997.12
Orient_NS	12034	179.98	-89.99	89.99	-7.08	52.14	2718.59
Orient_EW	12034	179.98	-89.99	89.99	-4.67	51.53	2655.61
Pendiente	12034	46.8	0.63	47.43	19.98	9.18	84.31
Morfperfil	12034	3.49	-1.84	1.65	-0.01	0.29	0.08
Morfplant	12034	4.6	-2.34	2.26	0	0.32	0.1
Rad_solar	12034	390848.3	658177.6	1049025.9	959455.2	60765.75	3692477426
Acc_flujo	12034	5873	0	5873	70.9	436.94	190923.18
Temp	12034	5.2	5.3	10.5	7.36	0.78	0.61
N válido (por lista)	12034						

<i>Tree 55</i>	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	5452	562.11	3543.55	4105.66	3894.46	101.18	10237.96
Orient_NS	5452	179.88	-89.89	89.99	6.77	52.83	2791.15
Orient_EW	5452	179.99	-89.99	90	-2.97	50.78	2578.84
Pendiente	5452	46.02	2.22	48.24	19.26	7.86	61.89
Morfperfil	5452	3.03	-1.47	1.56	-0.04	0.22	0.05
Morfplant	5452	2.97	-1.63	1.34	0.01	0.25	0.06
Rad_solar	5452	375491.2	682484.4	1057975.6	970617.6	47918.94	2296225120
Acc_flujo	5452	4485	0	4485	40.2	188.93	35696.58
Temp	5452	3.4	5.1	8.5	6.39	0.6	0.36
N válido (por lista)	5452						



# ANEXO B2

## Histogramas y estadísticos descriptivos por LSB

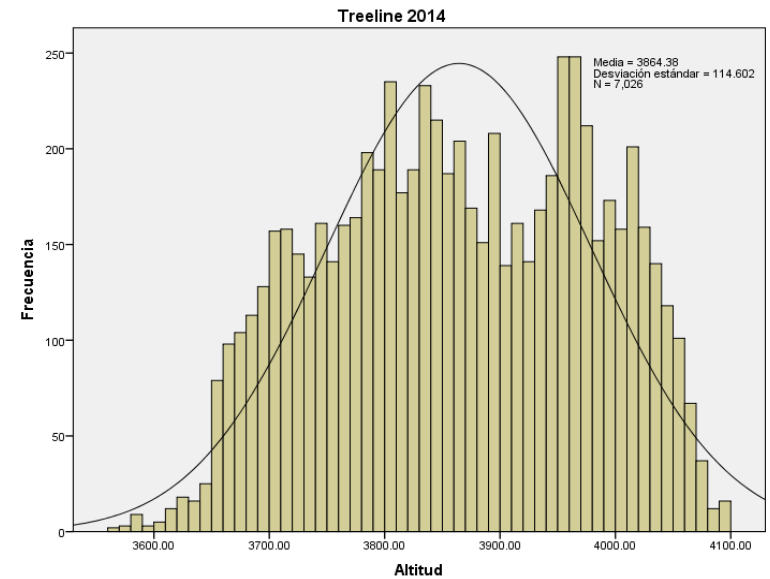
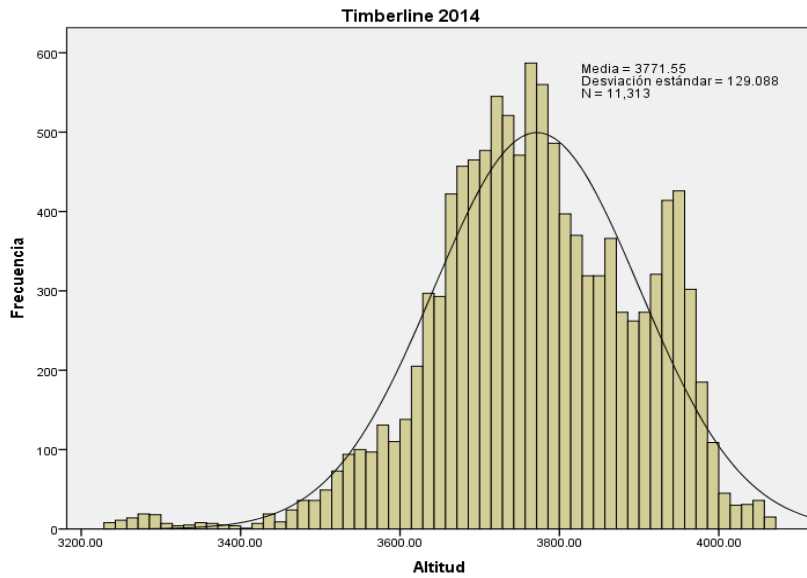


<b>Timber 95-99</b>	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	11212	788.91	3274.18	4063.08	3779.52	123.62	15283.58
Orient_NS	11212	179.96	-89.97	89.99	3.57	53.29	2840.03
Orient_EW	11212	179.98	-89.99	89.99	0.18	50.83	2583.83
Pendiente	11212	47.05	0.45	47.5	21.24	9.04	81.79
Morfperfil	11212	3.41	-1.84	1.56	-0.03	0.26	0.06
Morfplant	11212	4.45	-2.45	2.01	0	0.3	0.09
Rad_solar	11212	396891.6	658202.4	1055094	944453.3	70927.22	5030671489
Acc_flujo	11212	5709	0	5709	49.19	281.05	78992.96
Temp	11212	4.7	5.4	10.1	7.08	0.74	0.55
N válido (por lista)	11212						

<b>Tree 95-99</b>	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	4077	560.35	3562.53	4122.89	3886.24	111.45	12422.98
Orient_NS	4077	179.96	-89.97	89.99	9.47	56.09	3146.59
Orient_EW	4077	179.96	-89.97	90	-1.46	47.47	2253.73
Pendiente	4077	46.44	0.87	47.3	19.65	8.76	76.9
Morfperfil	4077	2.89	-1.42	1.48	-0.03	0.22	0.05
Morfplant	4077	3.42	-2.12	1.29	0.01	0.25	0.06
Rad_solar	4077	384879.1	673716.1	1058595.1	962069.3	62466.9	3902114633
Acc_flujo	4077	4485	0	4485	37.87	211.1	44564.99
Temp	4077	3.3	5.1	8.4	6.44	0.66	0.44
N válido (por lista)	4077						

# ANEXO B2

## Histogramas y estadísticos descriptivos por LSB



<b>Timber 14</b>	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	11313	836.35	3229.4	4065.76	3771.5486	129.08	16663.62
Orient_NS	11313	179.88	-89.9	89.98	-0.2279	50.38	2538.94
Orient_EW	11313	179.99	-89.99	90	-3.7891	54.03	2919.45
Pendiente	11313	45.03	2.31	47.33	20.9797	8.54	73.03
Morfperfil	11313	3.23	-1.74	1.49	-0.0181	0.25	0.06
Morfplanta	11313	4.23	-2.45	1.79	-0.0123	0.31	0.1
Rad_solar	11313	390048	658852	1048900	952711.2	60074.61	3608958799
Acc_flujo	11313	5783	0	5783	49.3759	249.62	62310.61
Temp	11313	5	5.4	10.4	7.135	0.77	0.6
N válido (por lista)	11313						

<b>Tree 14</b>	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	7026	536.29	3562.53	4098.82	3864.37	114.6	13133.65
Orient_NS	7026	179.93	-89.94	89.99	2.1	54.63	2984.8
Orient_EW	7026	179.94	-89.97	89.97	-3.51	49.77	2477.56
Pendiente	7026	49.1	0.87	49.96	20.74	9.1	82.88
Morfperfil	7026	2.82	-1.42	1.4	-0.03	0.24	0.06
Morfplanta	7026	3.42	-2.12	1.29	0	0.26	0.07
Rad_solar	7026	418378	639553.3	1057931.3	959734.4	65387.66	4275546229
Acc_flujo	7026	4486	0	4486	37.15	207.37	43004.52
Temp	7026	3.2	5.2	8.4	6.57	0.68	0.47
N válido (por lista)	7026						

# ANEXO B3

## Pruebas T-Student

Estadísticos de grupo					
	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Altitud	<b>Timber 55</b>	12034	3733.861	130.37301	1.18845
	<b>Tree 55</b>	5452	3894.46	101.18284	1.37034

Prueba de muestras independientes											
		Prueba de Levene de calidad de varianzas		Prueba T para la igualdad de medias							
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia		
										Inferior	Superior
Altitud	Se asumen varianzas iguales	339.991	0	-80.619	17484	0	-160.6	1.992	-164.504	-156.695	
	No se asumen varianzas iguales			-88.538	13320.925	0	-160.6	1.814	-164.155	-157.044	

Estadísticos de grupo					
	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Altitud	<b>Timber 95-99</b>	11212	3779.523	123.6268	1.16754
	<b>Tree 95-99</b>	4077	3886.248	111.45846	1.74559

Prueba de muestras independientes											
		Prueba de Levene de calidad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias							
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia		
										Inferior	Superior
Altitud	Se asumen varianzas iguales	39.832	0	-48.428	15287	0	-106.7254	2.2038	-111.0452	-102.4057	
	No se asumen varianzas iguales			-50.82	7959.463	0	-106.7254	2.1001	-110.8421	-102.6088	

# ANEXO B3

## Pruebas T-Student

Estadísticos de grupo					
	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Altitud	<b>Timber 14</b>	11313	3771.5486	129.08767	1.21366
	<b>Tree 14</b>	7026	3864.3774	114.60218	1.36722

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene de calidad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Altitud	Se asumen varianzas iguales	15.284	0	-49.389	18337	0	-92.8288	1.8795	-96.5129	-89.1448
	No se asumen varianzas iguales			-50.777	16208.146	0	-92.8288	1.8282	-96.4123	-89.2454

Estadísticas de grupo					
	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Altitud	<b>Timber 55</b>	12034	3733.861	130.37301	1.18845
	<b>Timber 95-99</b>	11212	3779.523	123.6268	1.16754

Prueba de muestras independientes										
		Prueba de Levene de calidad de varianzas		prueba t para la igualdad de medias						
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Altitud	Se asumen varianzas iguales	1.088	0.297	-27.36	23244	0	-45.66181	1.66913	-48.93343	-42.3902
	No se asumen varianzas iguales			-27.41	23236.79	0	-45.66181	1.666	-48.92729	-42.39634

# ANEXO B3

## Pruebas T-Student

Estadísticas de grupo					
	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Altitud	<b>Timber 55</b>	12034	3733.861	130.37301	1.18845
	<b>Timber 14</b>	11313	3771.549	129.08767	1.21366

### Prueba de muestras independientes

	Prueba de Levene de calidad de varianzas	prueba t para la igualdad de medias								
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Altitud	Se asumen varianzas iguales	0.936	0.333	-22.18	23345	0	-37.68776	1.69916	-41.01823	-34.35729
	No se asumen varianzas iguales			-22.19	23282.3	0	-37.68776	1.69864	-41.01721	-34.35831

Estadísticas de grupo					
	Grupo	N	Media	Desviación estándar	Media de error estándar
Altitud	<b>Timber 95-99</b>	11212	3779.523	123.6268	1.16754
	<b>Timber 14</b>	11313	3771.549	129.08767	1.21366

### Prueba de muestras independientes

	Prueba de Levene de calidad de varianzas	prueba t para la igualdad de medias								
		F	Sig.	t	gl	Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
									Inferior	Superior
Altitud	Se asumen varianzas iguales	0.001	0.982	4.73	22523	0	7.97406	1.6844	4.67251	11.2756
	No se asumen varianzas iguales			4.74	22496.6	0	7.97406	1.68407	4.67315	11.27496

# ANEXO B4

## Pruebas ANOVA

### Prueba de homogeneidad de varianzas

ALTITUD			
Estadístico de Levene	df1	df2	Sig.
91.553	5	51108	0

### ANOVA

ALTITUD					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	174578333	5	34915666.6	2338.519	0
Dentro de grupos	763076772	51108	14930.672		
Total	937655105	51113			

Variable dependiente:		Comparaciones múltiples				
HSD Tukey		ALTITUD				
(I) GRUPO		Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	95% de intervalo de confianza	
					Límite inferior	Límite superior
TIMBER 55	Tree 55	-160.599*	1.995	0	-166.284	-154.915
	Timber 95-99	-45.661*	1.604	0	-50.233	-41.091
	Tree 95-99	-152.387*	2.214	0	-158.697	-146.077
	Timber 14	-37.687*	1.6	0	-42.248	-33.128
	Tree 14	-130.516*	1.835	0	-135.745	-125.288
TREE 55	Timber 55	160.599*	1.995	0	154.915	166.284
	Timber 95-99	114.937*	2.017	0	109.188	120.687
	Tree 95-99	8.212*	2.53	0.015	1.002	15.422
	Timber 14	122.911*	2.015	0	117.171	128.653
	Tree 14	30.083*	2.205	0	23.798	36.368
TIMBER 95-99	Timber 55	45.661*	1.604	0	41.091	50.233
	Tree 55	-114.937*	2.017	0	-120.687	-109.188
	Tree 95-99	-106.725*	2.235	0	-113.094	-100.357
	Timber 14	7.974*	1.628	0	3.334	12.614
	Tree 14	-84.854*	1.859	0	-90.153	-79.556
TREE 95-99	Timber 55	152.387*	2.214	0	146.077	158.697
	Tree 55	-8.212*	2.53	0.015	-15.422	-1.002
	Timber 95-99	106.725*	2.235	0	100.357	113.094
	Timber 14	114.699*	2.232	0	108.339	121.06
	Tree 14	21.870*	2.406	0	15.015	28.726
TIMBER 14	Timber 55	37.687*	1.6	0	33.128	42.248
	Tree 55	-122.911*	2.015	0	-128.653	-117.171
	Timber 95-99	-7.9748*	1.628	0	-12.614	-3.334
	Tree 95-99	-114.699*	2.232	0	-121.06	-108.339
	Tree 14	-92.828*	1.856	0	-98.118	-87.54
TREE 14	Timber 55	130.516*	1.835	0	125.288	135.745
	Tree 55	-30.083*	2.205	0	-36.368	-23.798
	Timber 95-99	84.854*	1.859	0	79.556	90.153
	Tree 95-99	-21.870*	2.406	0	-28.726	-15.015
	Timber 14	92.828*	1.856	0	87.54	98.118

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

## ANEXO B5

### Correlaciones por cada LSB y variable biofísica

Correlaciones <i>Timberline</i> 1955		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	.353**	.105**	-.158**	-.045**	-.020*	-.003	-.011	-.999**
	Sig. (bilateral)		.000	.000	.000	.000	.029	.755	.222	.000
	N	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034
Orient_NS	Correlación de Pearson	.353**	1	.481**	-.338**	-.140**	.074**	-.512**	-.029**	-.352**
	Sig. (bilateral)	.000		.000	.000	.000	.000	.000	.002	.000
	N	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034
Orient_EW	Correlación de Pearson	.105**	.481**	1	-.260**	-.044**	.042**	-.231**	-.066**	-.105**
	Sig. (bilateral)	.000	.000		.000	.000	.000	.000	.000	.000
	N	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034
Pendiente	Correlación de Pearson	-.158**	-.338**	-.260**	1	-.023*	-.025**	-.539**	-.115**	.158**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000		.012	.005	.000	.000	.000
	N	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	-.045**	-.140**	-.044**	-.023*	1	-.414**	.110**	.066**	.040**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.012		.000	.000	.000	.000
	N	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034
Morfo_planta	Correlación de Pearson	-.020*	.074**	.042**	-.025**	-.414**	1	-.008	-.237**	.025**
	Sig. (bilateral)	.029	.000	.000	.005	.000		.401	.000	.006
	N	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034
Rad_solar	Correlación de Pearson	-.003	-.512**	-.231**	-.539**	.110**	-.008	1	.064**	.003
	Sig. (bilateral)	.755	.000	.000	.000	.000	.401		.000	.752
	N	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034
Acc_flujo	Correlación de Pearson	-.011	-.029**	-.066**	-.115**	.066**	-.237**	.064**	1	.010
	Sig. (bilateral)	.222	.002	.000	.000	.000	.000	.000		.253
	N	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034
Temp	Correlación de Pearson	-.999**	-.352**	-.105**	.158**	.040**	.025**	.003	.010	1
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.000	.006	.752	.253	
	N	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034	12034

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

## ANEXO B5

### Correlaciones por cada LSB y variable biofísica

Correlaciones <i>Treeline</i> 1955		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	.178**	.068**	.174**	.000	.044**	-.224**	.005	-.999**
	Sig. (bilateral)		.000	.000	.000	.997	.001	.000	.710	.000
	N	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452
Orient_NS	Correlación de Pearson	.178**	1	.506**	-.522**	.121**	.029*	-.585**	-.002	-.178**
	Sig. (bilateral)	.000		.000	.000	.000	.030	.000	.902	.000
	N	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452
Orient_EW	Correlación de Pearson	.068**	.506**	1	-.379**	.052**	.002	-.295**	.001	-.069**
	Sig. (bilateral)	.000	.000		.000	.000	.899	.000	.915	.000
	N	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452
Pendiente	Correlación de Pearson	.174**	-.522**	-.379**	1	-.039**	-.102**	-.297**	-.029*	-.176**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000		.004	.000	.000	.033	.000
	N	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	.000	.121**	.052**	-.039**	1	-.356**	-.104**	.039**	-.005
	Sig. (bilateral)	.997	.000	.000	.004		.000	.000	.004	.698
	N	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452
Morfo_planta	Correlación de Pearson	.044**	.029*	.002	-.102**	-.356**	1	.106**	-.223**	-.038**
	Sig. (bilateral)	.001	.030	.899	.000	.000		.000	.000	.005
	N	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452
Rad_solar	Correlación de Pearson	-.224**	-.585**	-.295**	-.297**	-.104**	.106**	1	.018	.226**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.000	.000		.195	.000
	N	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452
Acc_flujo	Correlación de Pearson	.005	-.002	.001	-.029*	.039**	-.223**	.018	1	-.005
	Sig. (bilateral)	.710	.902	.915	.033	.004	.000	.195		.686
	N	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452
Temp	Correlación de Pearson	-.999**	-.178**	-.069**	-.176**	-.005	-.038**	.226**	-.005	1
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.698	.005	.000	.686	
	N	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452	5452

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).



## ANEXO B5

### Correlaciones por cada LSB y variable biofísica

Correlaciones <i>Timberline 95-99</i>		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	.389**	.210**	-.107**	-.022*	-.023*	-.125**	-.004	-.999**
	Sig. (bilateral)		.000	.000	.000	.021	.016	.000	.653	.000
	N	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212
Orient_NS	Correlación de Pearson	.389**	1	.491**	-.283**	-.025**	.038**	-.545**	-.018	-.388**
	Sig. (bilateral)	.000		.000	.000	.009	.000	.000	.055	.000
	N	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212
Orient_EW	Correlación de Pearson	.210**	.491**	1	-.159**	-.044**	.002	-.325**	-.005	-.210**
	Sig. (bilateral)	.000	.000		.000	.000	.862	.000	.622	.000
	N	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212
Pendiente	Correlación de Pearson	-.107**	-.283**	-.159**	1	-.045**	-.018	-.566**	-.108**	.107**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000		.000	.063	.000	.000	.000
	N	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	-.022*	-.025**	-.044**	-.045**	1	-.372**	.041**	.077**	.017
	Sig. (bilateral)	.021	.009	.000	.000		.000	.000	.000	.069
	N	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212
Morfo_planta	Correlación de Pearson	-.023*	.038**	.002	-.018	-.372**	1	.013	-.243**	.028**
	Sig. (bilateral)	.016	.000	.862	.063	.000		.156	.000	.003
	N	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212
Rad_solar	Correlación de Pearson	-.125**	-.545**	-.325**	-.566**	.041**	.013	1	.059**	.126**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.000	.156		.000	.000
	N	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212
Acc_flujo	Correlación de Pearson	-.004	-.018	-.005	-.108**	.077**	-.243**	.059**	1	.004
	Sig. (bilateral)	.653	.055	.622	.000	.000	.000	.000		.698
	N	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212
Temp	Correlación de Pearson	-.999**	-.388**	-.210**	.107**	.017	.028**	.126**	.004	1
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.069	.003	.000	.698	
	N	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212	11212

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* . La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

## ANEXO B5

### Correlaciones por cada LSB y variable biofísica

Correlaciones <i>Treeline</i> 95-99		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	.152**	.085**	.067**	.003	.036*	-.084**	.017	-.999**
	Sig. (bilateral)		.000	.000	.000	.825	.023	.000	.274	.000
	N	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077
Orient_NS	Correlación de Pearson	.152**	1	.495**	-.443**	.120**	-.020	-.552**	.007	-.151**
	Sig. (bilateral)	.000		.000	.000	.000	.202	.000	.667	.000
	N	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077
Orient_EW	Correlación de Pearson	.085**	.495**	1	-.289**	.057**	.009	-.285**	.005	-.085**
	Sig. (bilateral)	.000	.000		.000	.000	.568	.000	.735	.000
	N	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077
Pendiente	Correlación de Pearson	.067**	-.443**	-.289**	1	.020	-.093**	-.414**	-.067**	-.068**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000		.193	.000	.000	.000	.000
	N	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	.003	.120**	.057**	.020	1	-.359**	-.151**	.068**	-.008
	Sig. (bilateral)	.825	.000	.000	.193		.000	.000	.000	.628
	N	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077
Morfo_planta	Correlación de Pearson	.036*	-.020	.009	-.093**	-.359**	1	.126**	-.211**	-.030
	Sig. (bilateral)	.023	.202	.568	.000	.000		.000	.000	.053
	N	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077
Rad_solar	Correlación de Pearson	-.084**	-.552**	-.285**	-.414**	-.151**	.126**	1	.040*	.085**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.000	.000		.011	.000
	N	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077
Acc_flujo	Correlación de Pearson	.017	.007	.005	-.067**	.068**	-.211**	.040*	1	-.018
	Sig. (bilateral)	.274	.667	.735	.000	.000	.000	.011		.255
	N	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077
Temp	Correlación de Pearson	-.999**	-.151**	-.085**	-.068**	-.008	-.030	.085**	-.018	1
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.628	.053	.000	.255	
	N	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077	4077

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

## ANEXO B5

### Correlaciones por cada LSB y variable biofísica

Correlaciones <i>Timberline</i> 2014		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	.356**	.114**	-.155**	-.027**	-.034**	-.040**	.011	-.999**
	Sig. (bilateral)		.000	.000	.000	.004	.000	.000	.258	.000
	N	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313
Orient_NS	Correlación de Pearson	.356**	1	.482**	-.377**	-.044**	.046**	-.513**	-.023*	-.356**
	Sig. (bilateral)	.000		.000	.000	.000	.000	.000	.014	.000
	N	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313
Orient_EW	Correlación de Pearson	.114**	.482**	1	-.227**	-.064**	.047**	-.288**	-.025**	-.114**
	Sig. (bilateral)	.000	.000		.000	.000	.000	.000	.009	.000
	N	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313
Pendiente	Correlación de Pearson	-.155**	-.377**	-.227**	1	.007	-.093**	-.516**	-.039**	.156**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000		.458	.000	.000	.000	.000
	N	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	-.027**	-.044**	-.064**	.007	1	-.429**	.015	.087**	.023*
	Sig. (bilateral)	.004	.000	.000	.458		.000	.105	.000	.013
	N	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313
Morfo_planta	Correlación de Pearson	-.034**	.046**	.047**	-.093**	-.429**	1	.068**	-.279**	.039**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.000		.000	.000	.000
	N	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313
Rad_solar	Correlación de Pearson	-.040**	-.513**	-.288**	-.516**	.015	.068**	1	.035**	.040**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.105	.000		.000	.000
	N	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313
Acc_flujo	Correlación de Pearson	.011	-.023*	-.025**	-.039**	.087**	-.279**	.035**	1	-.012
	Sig. (bilateral)	.258	.014	.009	.000	.000	.000	.000		.220
	N	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313
Temp	Correlación de Pearson	-.999**	-.356**	-.114**	.156**	.023*	.039**	.040**	-.012	1
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.013	.000	.000	.220	
	N	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313	11313

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

## ANEXO B5

### Correlaciones por cada LSB y variable biofísica

Correlaciones <i>Treeline</i> 2014		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	.153**	.053**	.078**	-.035**	.021	-.111**	.027*	-.999**
	Sig. (bilateral)		.000	.000	.000	.003	.082	.000	.022	.000
	N	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026
Orient_NS	Correlación de Pearson	.153**	1	.485**	-.417**	.056**	-.033**	-.551**	.018	-.154**
	Sig. (bilateral)	.000		.000	.000	.000	.006	.000	.132	.000
	N	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026
Orient_EW	Correlación de Pearson	.053**	.485**	1	-.259**	.034**	-.015	-.283**	.011	-.053**
	Sig. (bilateral)	.000	.000		.000	.004	.220	.000	.367	.000
	N	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026
Pendiente	Correlación de Pearson	.078**	-.417**	-.259**	1	.003	-.073**	-.444**	-.081**	-.078**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000		.776	.000	.000	.000	.000
	N	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	-.035**	.056**	.034**	.003	1	-.343**	-.092**	.071**	.031*
	Sig. (bilateral)	.003	.000	.004	.776		.000	.000	.000	.010
	N	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026
Morfo_planta	Correlación de Pearson	.021	-.033**	-.015	-.073**	-.343**	1	.139**	-.225**	-.015
	Sig. (bilateral)	.082	.006	.220	.000	.000		.000	.000	.206
	N	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026
Rad_solar	Correlación de Pearson	-.111**	-.551**	-.283**	-.444**	-.092**	.139**	1	.041**	.112**
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.000	.000		.001	.000
	N	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026
Acc_flujo	Correlación de Pearson	.027*	.018	.011	-.081**	.071**	-.225**	.041**	1	-.028*
	Sig. (bilateral)	.022	.132	.367	.000	.000	.000	.001		.020
	N	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026
Temp	Correlación de Pearson	-.999**	-.154**	-.053**	-.078**	.031*	-.015	.112**	-.028*	1
	Sig. (bilateral)	.000	.000	.000	.000	.010	.206	.000	.020	
	N	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026	7026

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

## ANEXO B6

### Correlaciones por segmento de cada LSB

#### Estadísticos descriptivos segmento 8 del *Timberline* 1955

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	1512	421.34	3409.93	3831.26	3634.2107	99.21481	9843.579
Orient_NS	1512	179.76	-89.98	89.78	-11.8073	49.28959	2429.464
Orient_EW	1512	179.98	-89.99	89.99	10.7359	57.65144	3323.688
Pendiente	1512	38.17	2.83	41	19.364	8.42466	70.975
Morfo_perfil	1512	2.52	-1.17	1.34	0.0763	0.29427	0.087
Morfo_planta	1512	2.59	-1.36	1.23	-0.0313	0.28785	0.083
Rad_solar	1512	323449.06	709562.13	1033011.19	956992.4445	54518.22198	2972236528
Acc_flujo	1512	5873	0	5873	202.42	992.49186	985040.093
Temp	1512	2.5	6.8	9.3	7.96	0.5956	0.355
N válido (por lista)	1512						

#### Estadísticos descriptivos segmento 14 del *Timberline* 1955

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	925	191.19	3812.09	4003.28	3921.0274	35.15395	1235.8
Orient_NS	925	102.31	-12.83	89.47	61.8173	17.78463	316.293
Orient_EW	925	176.54	-87.41	89.13	26.4314	19.68545	387.517
Pendiente	925	20.76	2.55	23.3	11.2333	3.19151	10.186
Morfo_perfil	925	0.97	-0.48	0.49	-0.0087	0.13559	0.018
Morfo_planta	925	1.07	-0.6	0.48	-0.0078	0.14877	0.022
Rad_solar	925	156982.06	867547.63	1024529.69	970014.316	22524.33226	507345543.8
Acc_flujo	925	2137	0	2137	63.4638	266.35632	70945.688
Temp	925	1.1	5.8	6.9	6.237	0.2094	0.044
N válido (por lista)	925						

# ANEXO B6

## Correlaciones por segmento de cada LSB

<b>Correlaciones Segmento 8 Timberline 55</b>		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pend.	Morf_perfil	Morf_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	.106**	0.041	.110**	.180**	-.093**	-.074**	.117**	-.999**
	Sig. (bilateral)		0	0.113	0	0	0	0.004	0	0
	N	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512
Orient_NS	Correlación de Pearson	.106**	1	.414**	-.332**	-.470**	.176**	-.691**	-0.047	-.108**
	Sig. (bilateral)	0		0	0	0	0	0	0.069	0
	N	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512
Orient_EW	Correlación de Pearson	0.041	.414**	1	-.182**	-.145**	0.045	-.207**	-.203**	-0.042
	Sig. (bilateral)	0.113	0		0	0	0.08	0	0	0.105
	N	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512
Pendiente	Correlación de Pearson	.110**	-.332**	-.182**	1	.156**	.082**	-.377**	-.231**	-.108**
	Sig. (bilateral)	0	0	0		0	0.001	0	0	0
	N	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	.180**	-.470**	-.145**	.156**	1	-.414**	.353**	0.002	-.182**
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0		0	0	0.934	0
	N	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512
Morfo_planta	Correlación de Pearson	-.093**	.176**	0.045	.082**	-.414**	1	-.161**	-.337**	.099**
	Sig. (bilateral)	0	0	0.08	0.001	0		0	0	0
	N	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512
Rad_solar	Correlación de Pearson	-.074**	-.691**	-.207**	-.377**	.353**	-.161**	1	.126**	.076**
	Sig. (bilateral)	0.004	0	0	0	0	0		0	0.003
	N	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512
Acc_flujo	Correlación de Pearson	.117**	-0.047	-.203**	-.231**	0.002	-.337**	.126**	1	-.117**
	Sig. (bilateral)	0	0.069	0	0	0.934	0	0		0
	N	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512
Temp	Correlación de Pearson	-.999**	-.108**	-0.042	-.108**	-.182**	.099**	.076**	-.117**	1
	Sig. (bilateral)	0	0	0.105	0	0	0	0.003	0	
	N	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512	1512

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

# ANEXO B6

## Correlaciones por segmento de cada LSB

Correlaciones segmento 14 Timberline 55		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	-0.054	0.011	.241**	-0.006	.098**	-.114**	-0.041	-.998**
	Sig. (bilateral)		0.098	0.729	0	0.847	0.003	0.001	0.207	0
	N	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Orient_NS	Correlación de Pearson	-0.054	1	-.559**	0.011	.216**	0.043	-.371**	.079*	0.057
	Sig. (bilateral)	0.098		0	0.735	0	0.195	0	0.016	0.085
	N	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Orient_EW	Correlación de Pearson	0.011	-.559**	1	-0.018	-0.06	0.029	.175**	-0.052	-0.016
	Sig. (bilateral)	0.729	0		0.578	0.068	0.372	0	0.116	0.617
	N	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Pendiente	Correlación de Pearson	.241**	0.011	-0.018	1	0.014	-.103**	-.907**	-.079*	-.244**
	Sig. (bilateral)	0	0.735	0.578		0.678	0.002	0	0.017	0
	N	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	-0.006	.216**	-0.06	0.014	1	-.367**	-.116**	.118**	-0.005
	Sig. (bilateral)	0.847	0	0.068	0.678		0	0	0	0.889
	N	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Morfo_planta	Correlación de Pearson	.098**	0.043	0.029	-.103**	-.367**	1	.116**	-.260**	-.087**
	Sig. (bilateral)	0.003	0.195	0.372	0.002	0		0	0	0.008
	N	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Rad_solar	Correlación de Pearson	-.114**	-.371**	.175**	-.907**	-.116**	.116**	1	0.031	.116**
	Sig. (bilateral)	0.001	0	0	0	0	0		0.348	0
	N	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Acc_flujo	Correlación de Pearson	-0.041	.079*	-0.052	-.079*	.118**	-.260**	0.031	1	0.038
	Sig. (bilateral)	0.207	0.016	0.116	0.017	0	0	0.348		0.243
	N	925	925	925	925	925	925	925	925	925
Temp	Correlación de Pearson	-.998**	0.057	-0.016	-.244**	-0.005	-.087**	.116**	0.038	1
	Sig. (bilateral)	0	0.085	0.617	0	0.889	0.008	0	0.243	
	N	925	925	925	925	925	925	925	925	925

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

## ANEXO B6

### Correlaciones por segmento de cada LSB

#### Estadísticos descriptivos segmento 12 del *Treeline* de 1955

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	263	126.62	3669.76	3796.37	3721.6608	30.97232	959.285
Orient_NS	263	179.53	-89.67	89.86	13.0207	58.02913	3367.38
Orient_EW	263	177.61	-89.13	88.48	18.12	43.73395	1912.659
Pendiente	263	36.82	2.22	39.04	13.7182	6.49455	42.179
Morfo_perfil	263	1.78	-1.24	0.54	-0.0725	0.22179	0.049
Morfo_planta	263	1.4	-0.51	0.89	0.0116	0.20076	0.04
Rad_solar	263	154737.25	879862.06	1034599.31	976325.1694	38405.04324	1474947346
Acc_flujo	263	143	0	143	9.7262	19.65934	386.49
Temp	263	0.7	7	7.7	7.434	0.1828	0.033
N válido (por lista)	263						

#### Estadísticos descriptivos segmento 5 del *Treeline* de 1955

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	356	240.86	3701.09	3941.95	3847.266	52.0216	2706.246
Orient_NS	356	102.01	-89.69	12.32	-48.6359	26.12116	682.315
Orient_EW	356	178.18	-89.11	89.07	-33.2742	34.54222	1193.165
Pendiente	356	32.68	3.29	35.97	20.6905	6.25981	39.185
Morfo_perfil	356	2.87	-1.47	1.4	-0.0524	0.38864	0.151
Morfo_planta	356	2.63	-1.47	1.16	-0.0121	0.45196	0.204
Rad_solar	356	144554.13	910200.38	1054754.5	1007457.965	33254.96892	1105892958
Acc_flujo	356	2267	0	2267	78.2416	335.11658	112303.119
Temp	356	1.4	6.1	7.5	6.679	0.3091	0.096
N válido (por lista)	356						



# ANEXO B6

## Correlaciones por segmento de cada LSB

Correlaciones segmento 12 del Treeline de 1955		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	.354**	.356**	-.425**	.175**	0.063	-0.003	.160**	-.993**
	Sig. (bilateral)		0	0	0	0.004	0.31	0.958	0.009	0
	N	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Orient_NS	Correlación de Pearson	.354**	1	.370**	-.463**	.363**	-0.087	-.782**	0	-.345**
	Sig. (bilateral)	0		0	0	0	0.157	0	0.994	0
	N	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Orient_EW	Correlación de Pearson	.356**	.370**	1	-.373**	.127*	-0.069	-.153*	.129*	-.347**
	Sig. (bilateral)	0	0		0	0.04	0.264	0.013	0.037	0
	N	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Pendiente	Correlación de Pearson	-.425**	-.463**	-.373**	1	-.361**	0.086	-.130*	-.140*	.415**
	Sig. (bilateral)	0	0	0		0	0.162	0.035	0.023	0
	N	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	.175**	.363**	.127*	-.361**	1	-.372**	-.240**	.158*	-.182**
	Sig. (bilateral)	0.004	0	0.04	0		0	0	0.01	0.003
	N	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Morfo_planta	Correlación de Pearson	0.063	-0.087	-0.069	0.086	-.372**	1	0.106	-.291**	-0.037
	Sig. (bilateral)	0.31	0.157	0.264	0.162	0		0.086	0	0.55
	N	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Rad_solar	Correlación de Pearson	-0.003	-.782**	-.153*	-.130*	-.240**	0.106	1	0.101	0.003
	Sig. (bilateral)	0.958	0	0.013	0.035	0	0.086		0.101	0.962
	N	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Acc_flujo	Correlación de Pearson	.160**	0	.129*	-.140*	.158*	-.291**	0.101	1	-.169**
	Sig. (bilateral)	0.009	0.994	0.037	0.023	0.01	0	0.101		0.006
	N	263	263	263	263	263	263	263	263	263
Temp	Correlación de Pearson	-.993**	-.345**	-.347**	.415**	-.182**	-0.037	0.003	-.169**	1
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0.003	0.55	0.962	0.006	
	N	263	263	263	263	263	263	263	263	263

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

# ANEXO B6

## Correlaciones por segmento de cada LSB

<b>Correlaciones segmento 5 del Treeline de 1955</b>		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	.109*	0.02	-.270**	-.251**	.308**	.239**	-.249**	-.996**
	Sig. (bilateral)		0.039	0.708	0	0	0	0	0	0
	N	356	356	356	356	356	356	356	356	356
Orient_NS	Correlación de Pearson	.109*	1	-.266**	.194**	-.153**	-0.01	-.756**	-.150**	-.112*
	Sig. (bilateral)	0.039		0	0	0.004	0.848	0	0.005	0.035
	N	356	356	356	356	356	356	356	356	356
Orient_EW	Correlación de Pearson	0.02	-.266**	1	-.279**	.147**	-0.012	.308**	0.061	-0.02
	Sig. (bilateral)	0.708	0		0	0.005	0.823	0	0.251	0.709
	N	356	356	356	356	356	356	356	356	356
Pendiente	Correlación de Pearson	-.270**	.194**	-.279**	1	-.158**	0.08	-.678**	-0.079	.270**
	Sig. (bilateral)	0	0	0		0.003	0.133	0	0.139	0
	N	356	356	356	356	356	356	356	356	356
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	-.251**	-.153**	.147**	-.158**	1	-.314**	.149**	-0.011	.235**
	Sig. (bilateral)	0	0.004	0.005	0.003		0	0.005	0.831	0
	N	356	356	356	356	356	356	356	356	356
Morfo_planta	Correlación de Pearson	.308**	-0.01	-0.012	0.08	-.314**	1	.126*	-.410**	-.294**
	Sig. (bilateral)	0	0.848	0.823	0.133	0		0.017	0	0
	N	356	356	356	356	356	356	356	356	356
Rad_solar	Correlación de Pearson	.239**	-.756**	.308**	-.678**	.149**	.126*	1	0.023	-.236**
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0.005	0.017		0.659	0
	N	356	356	356	356	356	356	356	356	356
Acc_flujo	Correlación de Pearson	-.249**	-.150**	0.061	-0.079	-0.011	-.410**	0.023	1	.248**
	Sig. (bilateral)	0	0.005	0.251	0.139	0.831	0	0.659		0
	N	356	356	356	356	356	356	356	356	356
Temp	Correlación de Pearson	-.996**	-.112*	-0.02	.270**	.235**	-.294**	-.236**	.248**	1
	Sig. (bilateral)	0	0.035	0.709	0	0	0	0	0	
	N	356	356	356	356	356	356	356	356	356

\*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

# ANEXO B6

## Correlaciones por segmento de cada LSB

Correlaciones segmento 10 del Treeline de 1955		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	.386**	.392**	-.130*	-.317**	.241**	-.148**	-0.021	-.995**
	Sig. (bilateral)		0	0	0.013	0	0	0.005	0.692	0
	N	362	362	362	362	362	362	362	362	362
Orient_NS	Correlación de Pearson	.386**	1	.395**	-.167**	0.096	.106*	-.481**	.133*	-.388**
	Sig. (bilateral)	0		0	0.001	0.067	0.043	0	0.012	0
	N	362	362	362	362	362	362	362	362	362
Orient_EW	Correlación de Pearson	.392**	.395**	1	-0.007	-.143**	0.045	-.256**	0.053	-.397**
	Sig. (bilateral)	0	0		0.893	0.007	0.396	0	0.319	0
	N	362	362	362	362	362	362	362	362	362
Pendiente	Correlación de Pearson	-.130*	-.167**	-0.007	1	.269**	-.293**	-.761**	0.066	.128*
	Sig. (bilateral)	0.013	0.001	0.893		0	0	0	0.209	0.015
	N	362	362	362	362	362	362	362	362	362
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	-.317**	0.096	-.143**	.269**	1	-.401**	-.301**	.181**	.305**
	Sig. (bilateral)	0	0.067	0.007	0		0	0	0.001	0
	N	362	362	362	362	362	362	362	362	362
Morfo_planta	Correlación de Pearson	.241**	.106*	0.045	-.293**	-.401**	1	.234**	-.393**	-.228**
	Sig. (bilateral)	0	0.043	0.396	0	0		0	0	0
	N	362	362	362	362	362	362	362	362	362
Rad_solar	Correlación de Pearson	-.148**	-.481**	-.256**	-.761**	-.301**	.234**	1	-.151**	.152**
	Sig. (bilateral)	0.005	0	0	0	0	0		0.004	0.004
	N	362	362	362	362	362	362	362	362	362
Acc_flujo	Correlación de Pearson	-0.021	.133*	0.053	0.066	.181**	-.393**	-.151**	1	0.014
	Sig. (bilateral)	0.692	0.012	0.319	0.209	0.001	0	0.004		0.791
	N	362	362	362	362	362	362	362	362	362
Temp	Correlación de Pearson	-.995**	-.388**	-.397**	.128*	.305**	-.228**	.152**	0.014	1
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0.015	0	0	0.004	0.791	
	N	362	362	362	362	362	362	362	362	362

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

## ANEXO B6

### Correlaciones por segmento de cada LSB

#### Estadísticos descriptivos del segmento 7 del *Timberline* de 1995-1999

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	723	336.68	3459.87	3796.55	3628.4191	89.60705	8029.424
Orient_NS	723	179.07	-89.91	89.16	-21.1789	46.34407	2147.773
Orient_EW	723	179.8	-89.99	89.8	-11.3107	53.41711	2853.388
Pendiente	723	43.44	2	45.45	20.886	7.86391	61.841
Morfo_perfil	723	2.88	-1.84	1.04	-0.0724	0.36654	0.134
Morfo_planta	723	3.33	-1.33	2.01	0.0476	0.4074	0.166
Rad_solar	723	334336.69	703278.19	1037614.88	953885.2822	73370.99889	5383303479
Acc_flujo	723	3842	0	3842	78.5864	365.68969	133728.952
Temp	723	2	7	9	7.991	0.5368	0.288
N válido (por lista)	723						

#### Estadísticos descriptivos del segmento 2 del *Treeline* del 95-99

	N	Rango	Mínimo	Máximo	Media	Desviación estándar	Varianza
Altitud	180	168.92	3944.31	4113.23	4021.8159	45.09484	2033.545
Orient_NS	180	143.1	-53.47	89.62	2.6797	30.36072	921.773
Orient_EW	180	179.72	-89.82	89.9	-13.6797	69.14157	4780.556
Pendiente	180	17.43	10.88	28.31	19.5923	3.57919	12.811
Morfo_perfil	180	0.84	-0.38	0.47	-0.0026	0.13245	0.018
Morfo_planta	180	1.28	-0.76	0.53	-0.0196	0.22874	0.052
Rad_solar	180	175807.81	861558.19	1037366	976923.3149	42931.60755	1843122927
Acc_flujo	180	789	0	789	49.5722	127.05456	16142.861
Temp	180	1	5.1	6.1	5.634	0.2722	0.074
N válido (por lista)	180						

# ANEXO B6

## Correlaciones por segmento de cada LSB

Correlaciones del segmento 7 del <i>Timberline</i> de 1995-1999		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	-.299**	-.175**	-.317**	0.063	-.132**	.465**	0.001	-.999**
	Sig. (bilateral)		0	0	0	0.093	0	0	0.975	0
	N	723	723	723	723	723	723	723	723	723
Orient_NS	Correlación de Pearson	-.299**	1	.415**	.082*	-.132**	.077*	-.789**	-0.056	.296**
	Sig. (bilateral)	0		0	0.027	0	0.038	0	0.132	0
	N	723	723	723	723	723	723	723	723	723
Orient_EW	Correlación de Pearson	-.175**	.415**	1	0.023	-0.045	.096**	-.376**	-.113**	.172**
	Sig. (bilateral)	0	0		0.532	0.229	0.01	0	0.002	0
	N	723	723	723	723	723	723	723	723	723
Pendiente	Correlación de Pearson	-.317**	.082*	0.023	1	-.126**	-0.052	-.590**	-.198**	.313**
	Sig. (bilateral)	0	0.027	0.532		0.001	0.159	0	0	0
	N	723	723	723	723	723	723	723	723	723
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	0.063	-.132**	-0.045	-.126**	1	-.371**	.122**	.107**	-0.068
	Sig. (bilateral)	0.093	0	0.229	0.001		0	0.001	0.004	0.066
	N	723	723	723	723	723	723	723	723	723
Morfo_planta	Correlación de Pearson	-.132**	.077*	.096**	-0.052	-.371**	1	0.021	-.297**	.138**
	Sig. (bilateral)	0	0.038	0.01	0.159	0		0.564	0	0
	N	723	723	723	723	723	723	723	723	723
Rad_solar	Correlación de Pearson	.465**	-.789**	-.376**	-.590**	.122**	0.021	1	.079*	-.461**
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0.001	0.564		0.034	0
	N	723	723	723	723	723	723	723	723	723
Acc_flujo	Correlación de Pearson	0.001	-0.056	-.113**	-.198**	.107**	-.297**	.079*	1	0.002
	Sig. (bilateral)	0.975	0.132	0.002	0	0.004	0	0.034		0.956
	N	723	723	723	723	723	723	723	723	723
Temp	Correlación de Pearson	-.999**	.296**	.172**	.313**	-0.068	.138**	-.461**	0.002	1
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0.066	0	0	0.956	
	N	723	723	723	723	723	723	723	723	723

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).

# ANEXO B6

## Correlaciones por segmento de cada LSB

Correlacione del segmento 2 del <i>Treeline</i> del 95-99		Altitud	Orient_NS	Orient_EW	Pendiente	Morfo_perfil	Morfo_planta	Rad_solar	Acc_flujo	Temp
Altitud	Correlación de Pearson	1	-0.12	0.035	-.335**	-.378**	.159*	.294**	-0.035	-.997**
	Sig. (bilateral)		0.107	0.645	0	0	0.033	0	0.639	0
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Orient_NS	Correlación de Pearson	-0.12	1	.553**	0.082	0.143	0.016	-.890**	-0.052	0.123
	Sig. (bilateral)	0.107		0	0.273	0.055	0.833	0	0.488	0.099
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Orient_EW	Correlación de Pearson	0.035	.553**	1	.222**	0.102	-0.073	-.573**	-0.011	-0.034
	Sig. (bilateral)	0.645	0		0.003	0.174	0.333	0	0.879	0.651
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Pendiente	Correlación de Pearson	-.335**	0.082	.222**	1	0.101	-0.067	-.499**	-0.027	.346**
	Sig. (bilateral)	0	0.273	0.003		0.176	0.368	0	0.72	0
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Morfo_perfil	Correlación de Pearson	-.378**	0.143	0.102	0.101	1	-.546**	-.196**	.231**	.376**
	Sig. (bilateral)	0	0.055	0.174	0.176		0	0.008	0.002	0
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Morfo_planta	Correlación de Pearson	.159*	0.016	-0.073	-0.067	-.546**	1	0.031	-.479**	-.153*
	Sig. (bilateral)	0.033	0.833	0.333	0.368	0		0.679	0	0.04
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Rad_solar	Correlación de Pearson	.294**	-.890**	-.573**	-.499**	-.196**	0.031	1	0.047	-.301**
	Sig. (bilateral)	0	0	0	0	0.008	0.679		0.534	0
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Acc_flujo	Correlación de Pearson	-0.035	-0.052	-0.011	-0.027	.231**	-.479**	0.047	1	0.037
	Sig. (bilateral)	0.639	0.488	0.879	0.72	0.002	0	0.534		0.625
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Temp	Correlación de Pearson	-.997**	0.123	-0.034	.346**	.376**	-.153*	-.301**	0.037	1
	Sig. (bilateral)	0	0.099	0.651	0	0	0.04	0	0.625	
	N	180	180	180	180	180	180	180	180	180

\*\* La correlación es significativa en el nivel 0,01 (2 colas).

\* La correlación es significativa en el nivel 0,05 (2 colas).