



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN GEOGRAFÍA

Centro de Investigaciones en
Geografía Ambiental

Aspectos ecológicos y patrones de
distribución de *Pinus martinezii* Larsen en
la cuenca del lago de Cuitzeo, México: Un
modelo de distribución potencial aplicado
a la conservación

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

**MAESTRO EN GEOGRAFÍA
EN MANEJO INTEGRADO DEL PAISAJE**

P R E S E N T A

OSCAR ADRIÁN LEAL NARES

ASESOR DE TESIS: DR. ELEAZAR CARRANZA GONZÁLEZ

CO-ASESOR: DR. MANUEL E. MENDOZA CANTÚ

MÉXICO, D.F.

NOVIEMBRE, 2009



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por brindarme su confianza y apoyo incondicional para continuar con mi preparación como profesionista, sin ustedes no podría haber obtenido estos logros, por lo que este trabajo se los debo a ustedes.

A mi mesa de sinodales, por brindarme sus experiencias que fueron muy importantes para darle forma y estructura al trabajo de tesis, especialmente a mi Asesor el Dr. Eleazar Carranza y mi Co- Asesor el Dr. Manuel Mendoza, quienes me guiaron y me apoyaron desde el principio para culminar de manera satisfactoria este ciclo.

A mis compañeros y amigos, quienes me ayudaron con el trabajo de campo, con quienes compartí las experiencias inolvidables de este trabajo de investigación: Miguel Ángel Silva, José Luis Villa, Teodoro Carlón, Agustín Arellano y Oscar Jurado; a ustedes, mi más profundo agradecimiento por su amistad y apoyo.

A mis maestros de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y del International Institute for Geo-Information. Science and Earth Observation (ITC), cuyos conocimientos y enseñanzas aplico de en el ámbito profesional. De la misma manera quiero agradecer al Instituto de Geografía por darme la oportunidad de formar parte de su alumnado del posgrado.

Quiero agradecer también a todos aquellos que participaron en la elaboración de la tesis mediante su revisión, pues fue una parte muy importante de este trabajo

CONTENIDO

INDICE DE CUADROS	<i>iv</i>
INDICE DE FIGURAS	<i>vii</i>
INDICE DE ANEXOS	<i>xi</i>
RESUMEN	<i>xiii</i>
ABSTRACT	<i>xv</i>
CAPITULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivo general	2
1.1.1. Objetivos específicos	2
1.2. Hipótesis	3
1.3. Enfoques	3
1.4. Literatura citada	6
CAPITULO 2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	9
2.1. Cuenca de Cuitzeo	9
2.2. Ubicación	10
2.3. Características físico geográficas y climáticas de la cuenca de Cuitzeo	11
2.3.1. Clima	11
2.3.2. Hidrología	15
2.3.3. Fisiografía	17
2.3.4. Geología	18
2.3.5. Geomorfología	19
2.3.6. Suelos	23
2.3.7. Cobertura y uso del suelo	24
2.3.7.1. Matorrales	26
2.3.7.2. Bosques	27
2.3.7.3. Pastizales	28
2.3.7.4. Vegetación acuática	29
2.4. Literatura citada	30
CAPITULO 3 ANÁLISIS Y MODELAMIENTO DE LAS VARIABLES CLIMÁTICAS	33
3.1. Antecedentes	33
3.2. Objetivo	35
3.3. Hipótesis	35
3.4. Metodología	35
3.4.1. Análisis y sistematización de la información climática	35
3.4.2. Selección de las variables climáticas de interés	36
3.4.3. Modelamiento de las variables climáticas	38
3.4.3.1. Modelo de regresión	38
3.4.3.2. Ajuste del modelo de regresión por corrección residual	39
3.4.3.3. Estimación de la confiabilidad del modelo	40
3.5. Resultados y discusión	41
3.5.1. Análisis y sistematización de la información climática	41

3.5.2.	Selección de las variables climáticas de interés	44
3.5.3.	Modelamiento de las variables climáticas	46
3.5.3.1.	Modelo de regresión	47
3.5.3.2.	Modelos de regresión de la temperatura	49
3.5.3.3.	Modelos de regresión de la precipitación	51
3.5.4.	Ajuste del modelo de regresión por corrección residual	54
3.5.5.	Confiabilidad del modelo	62
3.6.	Conclusiones	64
3.7.	Literatura citada	65
CAPITULO 4	CARACTERIZACION DE LAS LOCALIDADES DE <i>Pinus martinezii</i> Larsen EN LA CUENCA DE CUITZEO	68
4.1.	Antecedentes	68
4.1.1.	Taxonomía de <i>Pinus martinezii</i>	69
4.1.2.	Descripción morfológica	70
4.1.3.	Distribución de las poblaciones de <i>Pinus martinezii</i>	72
4.2.	Objetivo	74
4.3.	Hipótesis	74
4.4.	Materiales y métodos	74
4.4.1.	Localidades de muestreo	74
4.4.2.	Registro de información en campo	75
4.4.2.1.	Número de individuos o densidad (abundancia)	77
4.4.2.2.	Cobertura de las copas de los árboles	77
4.4.2.3.	Altura de los individuos	77
4.4.2.4.	Diámetro a la altura del pecho (DAP)	78
4.4.2.5.	Frecuencia	78
4.4.2.6.	Cálculo del Área Basal	78
4.4.2.7.	Calculo de Volumen de madera	79
4.4.2.8.	Calculo del Valor de Importancia	79
4.5.	Resultados y discusión	80
4.5.1.	Localidades muestreadas	80
4.5.2.	Descripción y análisis de los parámetros fisonómicos y valor de importancia de las localidades de <i>Pinus martinezii</i>	80
4.5.3.	Condiciones generales de las localidades de <i>Pinus martinezii</i>	82
4.6.	Conclusiones	91
4.7.	Literatura citada	92
CAPITULO 5	MODELO DE DISTRIBUCION POTENCIAL DE <i>Pinus martinezii</i>	95
5.1.	Antecedentes	95
5.1.1.	Perfil bioclimático	95
5.1.2.	Concepto de nicho ecológico	96
5.1.3.	Modelos de distribución potencial	98
5.1.4.	Análisis multicriterio	102
5.2.	Objetivos	101
5.3.	Hipótesis	102
5.4.	Materiales y métodos	102
5.4.1.	Obtención del perfil bioclimático de <i>Pinus martinezii</i>	102
5.4.2.	Elaboración del modelo de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i>	103
5.4.2.1.	Asignación de pesos	104
5.4.2.2.	Obtención del mapa de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i>	105
5.4.2.3.	Evaluación de la confiabilidad	106
5.4.2.4.	Identificación de zonas potenciales de conservación y	106

	reforestación	
5.5.	Resultados y discusión	109
5.5.1.	Perfil bioclimático de <i>Pinus martinezii</i>	109
5.5.1 .1.	Análisis del perfil bioclimático por localidad	109
5.5.1 .2.	Perfil bioclimático de <i>Pinus martinezii</i>	112
5.5.2.	Modelo de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i>	117
5.5.2.1.	Estandarización de los criterios	117
5.5.2.2.	Estandarización de los factores	118
5.5.2.3.	Estandarización de los atributos	119
5.5.2.4.	Agregación de los factores en el análisis multicriterio	120
5.5.2.5.	Mapa de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i>	126
5.5.3.	Confiabilidad del modelo	132
5.5.4.	Zonas potenciales para el desarrollo de <i>Pinus martinezii</i>	134
5.5.4.1.	Zonas potenciales para reforestacion con <i>Pinus martinezii</i>	134
5.5.4.2.	Zonas potenciales para la conservación de <i>Pinus martinezii</i>	136
5.6.	Conclusiones	137
5.7.	Literatura citada	139
CAPITULO 6	CONCLUSIONES GENERALES	143
	ANEXOS	145

INDICE DE CUADROS

2.1.	Áreas Naturales Protegidas de carácter estatal ubicadas al interior de la cuenca de Cuitzeo	10
2.2.	Municipios que integran la Cuenca del Lago de Cuitzeo	11
2.3.	Estaciones meteorológicas localizadas en el interior de la cuenca de Cuitzeo, con más de 20 años registrando datos de temperatura y precipitación	14
2.4.	Superficie de cobertura por sustrato geológico en la Cuenca de Cuitzeo	20
2.5.	Superficie de cobertura por zonas geomorfológicas mayores en la Cuenca de Cuitzeo	22
2.6.	Superficie de cobertura por unidad de suelo en la Cuenca de Cuitzeo	23
2.7.	Leyenda generalizada de la cobertura y uso del suelo (López y Bocco 2001)	25
2.8.	Leyenda de la cobertura y uso del suelo adaptada	26
3.1.	Métodos estadísticos utilizados para la predicción de la distribución de variables climáticas	34
3.2.	Estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis climático; información proporcionada por la CNA	37
3.3.	Resumen de información climática de las estaciones meteorológicas proporcionadas por CNA con más de 20 años de registro	42
3.4.	Matriz de correlación múltiple para la selección de las variables climáticas	46
3.5.	Variables seleccionadas para el análisis de correlación	48
3.6.	Análisis de correlación y regresión de las estaciones del <i>Modelo cuenca</i>	49
3.7.	Análisis de correlación y regresión de las estaciones del <i>Modelo buffer 10</i>	49
3.8.	Análisis de correlación y regresión de las estaciones del <i>Modelo buffer 20</i>	50
3.9.	Datos residuales obtenidos para los modelos de regresión múltiple y regresión simple para el modelamiento de la temperatura	56
3.10.	Datos residuales obtenidos para el modelo de regresión simple para el modelamiento de la precipitación (<i>Modelo cuenca</i>)	57

3.11.	Datos residuales obtenidos para el modelo de regresión simple para el modelamiento de la precipitación (<i>Modelo buffer 20</i>)	58
3.12.	Medidas de exactitud para la validación de la cartografía de la temperatura, mediante la obtención de coeficientes de determinación (R^2) y RMSE	63
3.13.	Medidas de exactitud para la validación de la cartografía de la precipitación, mediante la obtención de coeficientes de determinación (R^2) y RMSE	63
4.1.	Localidades de <i>Pinus martinezii</i> en la Cuenca de Cuitzeo según Silva (2005)	75
4.2.	Sitios de muestreo de las localidades de <i>P. martinezii</i> en la cuenca de Cuitzeo	81
4.3.	Estimación de parámetros fisonómicos por localidad de <i>Pinus martinezii</i>	81
4.4.	Índice de Valor de Importancia Relativa por localidad	82
5.1.	Escala de comparación pareada	104
5.2.	Puntos utilizados para la evaluación de confiabilidad del modelo de distribución potencia de <i>Pinus martinezii</i>	106
5.3.	Leyenda de la cartografía de cobertura y uso del suelo para los años 1975 y 2000 (López y Bocco 2001)	108
5.4.	Factores físico geográficos y climáticos de <i>Pinus martinezii</i> obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica para la localidad de Nueva Victoria	109
5.5.	Factores físico geográficos y climáticos de <i>Pinus martinezii</i> obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica para la localidad de Agua Zarca	110
5.6.	Factores físico geográficos y climáticos de <i>Pinus martinezii</i> obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica para la localidad de El Temascal	111
5.7.	Factores físico geográficos y climáticos de <i>Pinus martinezii</i> obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica para la localidad de Cerro Mozo	111
5.8.	Factores físico geográficos y climáticos de <i>Pinus martinezii</i> obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica para la localidad de Laguna Verde	111
5.9.	Acomodo de los factores con relación a su importancia jerárquica y valores estandarizados para los tres Modelos, basados en tres escenarios distintos	119
5.10.	Obtención de los valores normalizados de los atributos mediante el método de categorías con base en los datos obtenidos en el perfil bioclimático	120
5.11	Árbol de decisiones multicriterio del <i>Modelo 1</i>	123
5.12	Árbol de decisiones multicriterio del <i>Modelo 2</i>	124

5.13	Árbol de decisiones multicriterio del <i>Modelo 3</i>	125
5.14	Localidades registradas por Silva (2005) que no fueron consideradas en las zonas con aptitud del modelo de distribución potencial	133
5.15	Localidades registradas por Silva (2005) consideradas en las zonas con aptitud del modelo de distribución potencial	133

INDICE DE FIGURAS

1.1.	Esquema metodológico para la obtención del modelo de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i>	4
2.1.	Cuenca de Cuitzeo	12
2.2.	Climogramas representativos de los tres tipos climáticos registrados por las estaciones meteorológicas en la Cuenca de Cuitzeo	13
2.3.	Ubicación de las estaciones meteorológicas con más de 20 años de registros de temperatura y precipitación localizadas al interior de la cuenca, y el tipo climático registrado en cada una de ellas según García (2004)	14
2.4.	Hidrología superficial de la cuenca de Cuitzeo	16
2.5.	Distribución de las pendientes en la Cuenca de Cuitzeo	21
3.1.	Distribución espacial de las estaciones meteorológicas con registros de temperatura y precipitación superiores a 20 años	41
3.2.	Distribución espacial de los registros de precipitación por clases en las estaciones meteorológicas	43
3.3.	Distribución espacial de los registros de temperatura por clases en las estaciones meteorológicas	44
3.4.	Grafica de distribución de <i>outliers</i> , utilizando el algoritmo de distancia de Mahalanobis	45
3.5.	Análisis de regresión múltiple de la temperatura del <i>Modelo buffer 20</i> , utilizando como variables independientes la altitud y la exposición	50
3.6.	Mapa de temperatura media anual, obtenido mediante el análisis de regresión múltiple con información del <i>Modelo buffer 20</i>	51
3.7.	Análisis de regresión simple de la temperatura del <i>Modelo buffer 20</i> , utilizando como variable independiente la altitud	52
3.8.	Mapa de temperatura media anual, obtenido mediante el análisis de regresión simple con información del <i>Modelo buffer 20</i>	52
3.9.	Análisis de regresión simple de la precipitación del <i>Modelo cuenca</i> , utilizando como variable independiente la altitud	53
3.10.	Mapa de precipitación anual, obtenido mediante el análisis de regresión simple con información del <i>Modelo cuenca</i>	53
3.11.	Análisis de regresión simple de la precipitación del <i>Modelo buffer 20</i> , utilizando como variable independiente la altitud	54
3.12.	Mapa de precipitación anual, obtenido mediante el análisis de regresión simple con información del <i>Modelo buffer 20</i>	55

3.13.	Mapa de anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación múltiple de la temperatura	57
3.14.	Mapa de anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación simple de la temperatura	58
3.15.	Mapa de anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación simple de la precipitación (<i>Modelo cuenca</i>)	59
3.16.	Mapa de anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación simple de la precipitación (<i>Modelo buffer 20</i>)	59
3.17.	Mapa de temperatura media anual corregido, obtenido mediante el análisis de regresión múltiple corregido con residuales con información del <i>Modelo buffer 20</i>	60
3.18.	Mapa de temperatura media anual corregido, obtenido mediante análisis de regresión simple corregido con residuales con información del <i>Modelo buffer 20</i>	60
3.19.	Mapa de precipitación anual corregido, obtenido mediante corrección por residuales con información del <i>Modelo cuenca</i>	61
3.20.	Mapa de precipitación anual corregido, obtenido mediante corrección por residuales con información del <i>Modelo buffer 20</i>	61
4.1.	Individuo de <i>Pinus martinezii</i> Larsen	71
4.2.	Cono de <i>Pinus martinezii</i> Larsen	72
4.3.	Cuadrante utilizado para el levantamiento de información ecológica en campo	76
4.4.	Distribución de las poblaciones de <i>Pinus martinezii</i> en la cuenca de Cuitzeo	82
4.5.	Población de <i>Pinus martinezii</i> de la localidad de Nueva Victoria	83
4.6.	Individuos jóvenes de <i>P. martinezii</i> de la localidad de Nueva Victoria	84
4.7.	Aspecto de la población de <i>Pinus martinezii</i> en la localidad de Agua Zarca	85
4.8.	La extracción de resina en individuos de <i>P. martinezii</i> en la localidad de Agua Zarca	85
4.9.	Condición de deterioro de la porción Oeste de la localidad de Agua Zarca por erosión del suelo	86
4.10.	Población de <i>Pinus martinezii</i> conformando un bosque mixto en la localidad El Temascal	86
4.11.	Caminos utilizados para la extracción de madera en la localidad El Temascal	87
4.12.	Presencia de pedestales como evidencia de la erosión en Cerro Mozo	88
4.13.	Condición de deterioro de la localidad de Cerro Mozo ocasionada por el incendio y su posterior pérdida de suelo	88

4.14.	Individuos de <i>Pinus martinezii</i> de la localidad de Laguna verde	89
4.15.	Evidencia de la extracción de madera realizada en la localidad de Laguna verde	90
4.16.	Condiciones de deterioro de la localidad de La Joya por la extracción de madera	90
5.1.	Modelo gráfico de la abundancia de una población a lo largo de un gradiente de un factor ambiental (Tomado de Cox y Moore 1994)	96
5.2.	Áreas aptas para la reforestación con <i>Pinus martinezii</i>	107
5.3.	Áreas aptas para la conservación de <i>Pinus martinezii</i>	108
5.4.	Distribución de los sitios registrados en campo de <i>Pinus martinezii</i> por rangos de altitud	112
5.5.	Distribución de los sitios registrados en campo de <i>Pinus martinezii</i> por clases de suelos	113
5.6.	Distribución de los sitios registrados en campo de <i>Pinus martinezii</i> por clases geomorfológicas	113
5.7.	Distribución de los sitios registrados en campo de <i>Pinus martinezii</i> por clases geológicas	114
5.8.	Distribución de los sitios registrados en campo de <i>Pinus martinezii</i> por clases de pendientes	115
5.9.	Distribución de los sitios registrados en campo de <i>Pinus martinezii</i> por clases de exposición de ladera	115
5.10.	Distribución de los sitios registrados en campo de <i>Pinus martinezii</i> por rangos de precipitación anual	116
5.11.	Distribución de los sitios registrados en campo de <i>Pinus martinezii</i> por rangos de temperatura media anual	116
5.12.	Normalización de los criterios del Modelo 1 mediante el método jerárquico, utilizando el modulo de Análisis multicriterio de ILWIS	117
5.13.	Normalización de los criterios de los Modelos 2 y 3 mediante comparación pareada utilizando el modulo de Análisis Multicriterio de ILWIS	118
5.14.	Normalización del mapa de altitud mediante el uso de una función de costo beneficio del modulo Multicriterio de ILWIS	121
5.15.	Normalización del mapa de temperatura media anual mediante el uso de una función de costo beneficio del modulo Multicriterio de ILWIS	121
5.16.	Normalización del mapa de precipitación anual mediante el uso de una función de costo beneficio del modulo Multicriterio de ILWIS	121
5.17.	Modulo de Análisis Multicriterio de ILWIS para la obtención del mapa de distribución potencial del <i>Modelo 1</i>	122
5.18.	Modulo de Análisis Multicriterio de ILWIS para la obtención del mapa de	122

	distribución potencial del <i>Modelo 2</i>	
5.19.	Modulo de Análisis Multicriterio de ILWIS para la obtención del mapa de distribución potencial del <i>Modelo 3</i>	122
5.20.	Histograma del mapa de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i> para el <i>Modelo 1</i> .	126
5.21.	Mapa de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i> obtenido a partir del análisis multicriterio para el <i>Modelo 1</i>	127
5.22.	Histograma del mapa de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i> para el <i>Modelo 2</i>	127
5.23.	Mapa de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i> obtenido a partir del análisis multicriterio para el <i>Modelo 2</i>	128
5.24.	Histograma del mapa de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i> para el <i>Modelo 3</i>	129
5.25.	Mapa de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i> obtenido a partir del análisis multicriterio para el <i>Modelo 3</i>	129
5.26.	Histograma generado en ILWIS con base en el mapa de distribución potencial del <i>Modelo 3</i> para el establecimiento de rangos de aptitud	130
5.27.	Mapa de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i>	130

INDICE DE ANEXOS

2.1.	Mapa de Geología de la cuenca de Cuitzeo	146
2.2.	Mapa de Zonas Geomorfológicos de la cuenca de Cuitzeo	147
2.3.	Mapa de Altimetría de la cuenca de Cuitzeo	148
2.4.	Mapa de Pendientes de la cuenca de Cuitzeo	149
2.5.	Mapa de Edafología de la cuenca de Cuitzeo	150
2.6.	Mapa de Cobertura y uso del suelo de la cuenca de Cuitzeo	151
2.7.	Mapa de Exposición de ladera de la cuenca de Cuitzeo	152
3.1.	Información de las estaciones ubicadas al interior de la cuenca, utilizadas para la construcción del modelo de regresión y su validación	153
3.2.	Información de las estaciones ubicadas en un buffer de 10km de la cuenca, utilizadas para la construcción del modelo de regresión y su validación	154
3.3.	Información de las estaciones ubicadas en un buffer de 20km de la cuenca, utilizadas para la construcción del modelo de regresión y su validación	155
3.4.	Mapa de Temperatura media anual de la cuenca de Cuitzeo	156
3.5.	Mapa de Precipitación anual de la cuenca de Cuitzeo	157
4.1.	Formato para el registro de información en campo	158
4.2.	Tablas para el cálculo de volumen de madera para especies del género <i>Pinus</i> en el Estado de Michoacán	159
4.3.	Información fisonómica por individuo registrada en el trabajo de campo	161
5.1.	Factores geofísicos y climáticos de las poblaciones de <i>Pinus martinezii</i> en la cuenca de Cuitzeo, obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica	170
5.2.	Áreas de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i>	172
5.3.	Áreas de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i> (Zona Oriente)	173
5.4.	Áreas de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i> (Zona Sur)	174
5.5.	Áreas de distribución potencial de <i>Pinus martinezii</i> (Zona Poniente)	175
5.6.	Sitios utilizados para la confiabilidad del modelo de distribución potencia de <i>Pinus martinezii</i>	176
5.7.	Áreas potenciales para la reforestación zona oriente	177
5.8.	Áreas potenciales para la reforestación zona sur	178

5.9.	Áreas potenciales para la conservación zona oriente	179
5.10	Áreas potenciales para la conservación zona sur	180

RESUMEN

El presente estudio se realizó para determinar los aspectos ecológicos y patrones de distribución del *Pinus martinezii* en la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Esta especie se encuentra en estatus de **Pr** “sujeta a protección especial” según la Norma Oficial Mexicana -059-2001 ya que sus poblaciones están fuertemente afectadas por la extracción clandestina de madera, incluso dentro del área de estudio. En esta región, se tienen registradas seis poblaciones consideradas como importantes de acuerdo a su extensión. En estas localidades, se realizó la medición de los parámetros fisonómicos de 248 individuos distribuidos en 18 sitios de muestreo, con base en los cuales se elaboró un Índice de Valor de Importancia (VI) que permitió establecer la comparación de condiciones en las poblaciones actuales de *P. martinezii*. A partir de este análisis se determinó que las poblaciones de Nueva Victoria y Agua Zarca son las que presentan un mayor grado de conservación con respecto a las demás, que están sujetas a las actividades de extracción selectiva en la zona.

Como herramienta para la conservación de esta especie, se obtuvo un mapa de distribución potencial, el cual puede ser una referencia para realizar labores de conservación o reforestación, así como para determinar los sitios de colecta de semilla para el establecimiento de viveros y para realizar exploraciones en busca de nuevas localidades para la reforestación y protección de la especie en la cuenca de Cuitzeo.

Se establecieron los rangos de tolerancia de *P. martinezii* a los factores ambientales en el área de estudio, a partir de los cuales se obtuvo el perfil bioclimático de la especie, mismo que puede ser utilizado para medir su ocurrencia en el espacio geográfico. Con base en los registros de campo se determinó que la presencia del *P. martinezii* está definida en un rango altitudinal de 2,280 hasta 3,020 m y en suelos principalmente de tipo luvisoles y andosoles.

El modelo de distribución potencial está basado en el concepto de nicho fundamental n–dimensional de Hutchinson, tomando en consideración los

requerimientos ambientales que esta especie necesita para su distribución, para el cual se utilizaron como herramientas el análisis multicriterio y los Sistemas de Información Geográfica, obteniendo una confiabilidad del modelo de un 81.25%. Sin embargo, el nicho real de esta especie varía debido a otros factores que restringen su distribución, como son las barreras biogeográficas y la competencia interespecífica.

Con base en los resultados obtenidos, es necesario llevar a cabo acciones de reforestación en las localidades de La Joya, El Temazcal y Laguna Verde, debido a las condiciones de disturbio que presentan; mientras que en las comunidades de Nueva Victoria y Agua Zarca se puede realizar conservación orientada al manejo sostenible de las poblaciones y reforestación en algunas áreas en las que existe extracción de madera.

Tomando en cuenta el “VI”, el perfil bioclimático, el modelo de distribución potencial y la experiencia de los recorridos en campo, se determinó que las poblaciones para la colecta de semillas y el establecimiento de viveros de *Pinus martinezii* son las localidades de Nueva Victoria, Agua Zarca y Laguna Verde.

FORMA DE CITAR EL DOCUMENTO

Leal- Nares, O.A. 2008. Aspectos ecológicos y patrones de distribución de *Pinus martinezii* Larsen en la cuenca del lago de Cuitzeo, México: Un modelo de distribución potencial aplicado a la conservación. Tesis de maestría. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. 182 pp.

ABSTRACT

The present research was done in order to approach ecological aspects and distribution pattern of *Pinus martinezii* inside of the Cuitzeo Lagoon basin. This species is considered as “subject to special protection” according to Mexican laws (NOM-059-2001) due to illegal logging that constitutes the main problem of pine populations in the basin of Cuitzeo Lagoon. There are six important populations of this species in the study area based in their extensions; those were characterized by physiognomic measurements of 248 individuals and 18 sampling sites, with the fieldwork data were elaborated an Importance Value Index (VI) which allows a quick comparison of the ecological conditions among the populations of *P. martinezii*, according to this data, the localities of Nueva Victoria and Agua Zarca were the top ranked with respect to the others surveyed, which are under significant pressure by selective extraction activities.

The potential distribution map was developed as a conservation tool for this species, which is a reference to conduct reforestation and other conservation efforts, although this information is strongly useful to carry out reforestations and may be also a reference to determine sites for seed collection and establishment of greenhouses; is able to find new localities for reforestation issues and protection of *P. martinezii* in the Basin.

The optimal ranges of environmental factors for *P. martinezii* in the basin were established and the bioclimatic profile obtained, which provides important information to measure its occurrence in the geographical space. Its altitudinal range is from 2,280 to 3,020 meters, mainly in Luvisols and Andosols soil types.

A potential distribution model was developed, based on the fundamental niche concept of n-dimensional Hutchinson's concept, which considers the environmental requirements of the species for its distribution. The model was created using different tools as the multicriteria analysis and the Geographic Information Systems. The real niche of the species can be different due to multiple factors which can restrict their distribution, such biogeographical barriers and interspecific competition.

Based on the results, it is necessary to carry out reforestation in the localities of La Joya, El Temazcal and Laguna Verde, due to the disturbance conditions, in the other hand, the actions in the communities of Nueva Victoria and Agua Zarca can be oriented into sustainable forestry management and reforestation in some areas where there is logging. Considering the VI, thue potential distribution map and the fieldwork, the best populations for seed collection and the establishment of greenhouses were Nueva Victoria, Agua Zarca and Laguna Verde.

CAPITULO 1

Introducción general

México es considerado el tercer país de importancia en conservación en el mundo, pues se calcula que posee entre el 8 y el 12% del total de las especies del planeta. En cuanto a la flora vascular, aunque no se conoce de manera completa, se ha calculado que puede alcanzar el cuarto lugar a nivel mundial. Muchas de las familias de plantas que se encuentran distribuidas en el país alcanzan aquí su máxima diversidad, muchas de ellas son también endémicas de algunas regiones o ecosistemas del país (Challenger 1998). El endemismo de plantas vasculares en el país ha sido calculado en un 52% de las especies; algunos botánicos consideran que el territorio mexicano ha sido un probable centro de origen y evolución de diversas familias de plantas, entre las que se encuentran los pinos (Pinaceae) (Rzedowski 1993, Farjon y Styles 1997).

Como contribución al conocimiento de la flora, se han realizado numerosos listados taxonómicos producto de la colecta de especies por especialistas en determinadas zonas del país. Sin embargo, debido a lo complejo de esta labor, poco se sabe sobre la distribución geográfica de las especies y de los factores físicos y biológicos que la determinan, debido a esto existe un interés por este conocimiento, principalmente para especies de importancia ecológica y económica.

El género *Pinus* constituye el más ampliamente distribuido de la Familia Pinaceae y es considerado económicamente importante debido a sus características forestales. En México se cuenta con aproximadamente el 45% de las especies de los pinos conocidos en el mundo, distribuyéndose principalmente en la Sierra Madre Oriental y el Sistema Volcánico Transversal, regiones consideradas como centros de diversidad de este género (Farjon y Styles 1997, Styles 1998). En Michoacán hay registros de 16 especies, de las cuales *Pinus rzedowskii* y *Pinus martinezii* están listadas en la Norma Oficial Mexicana-059-2001 bajo el estatus **Pr** “sujetas a protección especial”. Por su parte, en la cuenca de Cuitzeo, se han registrado 6

localidades de *P. martinezii* con poblaciones importantes, que se encuentran bajo una fuerte presión debido a las actividades de extracción de madera en forma clandestina (Madrigal- Sánchez y Guridi- Gómez 2005, Rodríguez y Carrillo 2005).

Existen estudios numerosos en relación a la biodiversidad y el estatus de conservación de los pinos en México, pero poco se sabe aun sobre su distribución geográfica y los factores que la determinan. Actualmente se han desarrollado metodologías basadas en modelos heurísticos, estadísticos y computacionales, que son utilizadas para modelar la distribución potencial de las especies, basados en los registros de ocurrencia de las especies y la información ambiental. Por lo anterior, se propone el siguiente objetivo para el presente trabajo.

1.1. Objetivo general

Realizar la caracterización ecológica de las poblaciones de *Pinus martinezii* en la Cuenca de Cuitzeo y determinar sus patrones de distribución a través de la construcción de un modelo de distribución potencial basado en el nicho fundamental de la especie.

1.1.1. Objetivos específicos

1. Analizar y crear una base de datos con la información de las estaciones meteorológicas de la cuenca de Cuitzeo
2. Obtener un modelo de precipitación y temperatura a partir de métodos de interpolación que utilizan variables climáticas y geográficas.
3. Obtener un índice de valor de importancia relativa generado a partir de datos fisonómicos y estructurales, que permita caracterizar y comparar el grado de conservación de las distintas localidades de *P. martinezii* de la cuenca de Cuitzeo.
4. Identificar los factores ambientales que determinan el nicho fundamental de *P. martinezii*, mediante la elaboración de un perfil bioclimático de la especie.

5. Elaborar un modelo de distribución potencial de *P. martinezii*, utilizando información ambiental y datos de presencia de la especie, para espacializar su nicho fundamental, el cual pueda ser utilizado para identificar áreas de conservación y reforestación en la cuenca de Cuitzeo.

1.2 Hipótesis

Los rangos de tolerancia de *Pinus martinezii* a los factores ambientales determinan su distribución geográfica e inciden en las condiciones ecológicas de sus poblaciones, por lo que un modelo de distribución potencial basado en el nicho fundamental de la especie puede constituirse como una herramienta para su conservación.

1.3 Enfoques

Como parte de la presente investigación se realizó el trabajo de campo en seis poblaciones de *Pinus martinezii* que poseen un área mayor a 22.5 Ha en la cuenca de Cuitzeo, efectuando mediciones de los individuos para determinar su grado de conservación; registrando la posición geográfica de los sitios de muestreo para utilizarlos como puntos de presencia en la elaboración del perfil bioclimático y la obtención del modelo de distribución potencial. La presente tesis aborda la investigación en capítulos relacionados con la metodología utilizada como se muestra el esquema conceptual de la figura 1.1.

El *Capítulo 2* está conformado por trabajo de gabinete en donde se realiza una descripción detallada de los factores físico biológicos en la Cuenca de Cuitzeo, mediante una extensa investigación bibliográfica. Se efectuó también la estandarización y el análisis espacial con la información geográfica para la zona de estudio para generar una base de datos geográfica confiable, utilizando distintos software de Sistemas de Información Geográfica (SIG) como son: ILWIS 3.3, ARCVIEW 3.2, ERDAS 9.1 y ARCGIS 9.2.

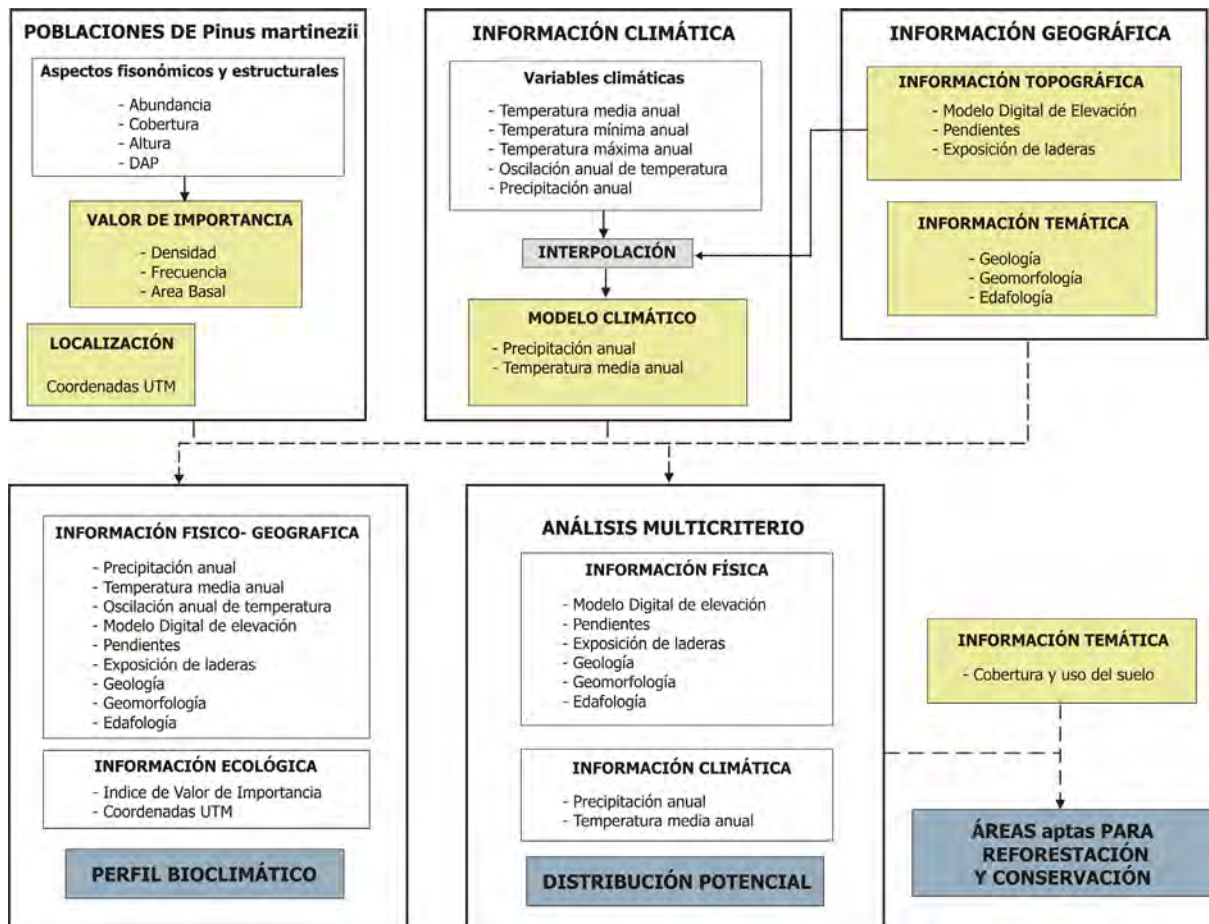


Figura 1.1. Esquema metodológico para la obtención del modelo de distribución potencial de *Pinus martinezii*.

Un aspecto importante a considerar fue la estandarización de las bases de datos geográficas con ayuda de los SIG, debido a que se utilizaron datos provenientes de diversas fuentes. La información geográfica utilizada como base para la obtención del perfil bioclimático y el modelo de distribución potencial, fueron las cartas temáticas de edafología, geología y las curvas de terreno digitales de INEGI (escala 1:50,000), a partir de las cuales se derivaron otras capas de información (Modelo Digital de Elevación, Pendientes, Exposición de ladera, Temperatura media anual y Precipitación anual); otras fuentes de información fueron la cartografía geomorfológica de Mendoza (2002) y las coberturas de vegetación y uso del suelo para los años 1975 y 2000 de López y Bocco (2001). Para la estandarización de los mapas en formato vectorial se consideró un área mínima cartografiable de 3 x 3 mm (22,500 m²) y en los mapas con formato raster el tamaño de píxel de 20m.

En el *Capítulo 3*, se realizó el análisis y modelamiento climático, basado en los registros de temperatura y precipitación de las estaciones meteorológicas de la región con datos superiores a los 20 años. El modelamiento espacial fue necesario debido a que la información climática disponible de INEGI para el país se encuentra únicamente a escalas pequeñas (1:500,000 y 1:1,000,000), y era necesario tener este insumo para la obtención del perfil bioclimático y el modelo de distribución potencial, ya que la distribución geográfica de las especies vegetales está determinada fuertemente por los factores climáticos (Hanson y Churchill 1961).

Para el modelamiento de las variables climáticas se realizó el análisis estadístico de las variables climáticas mediante métodos mixtos basados en interpoladores globales como los modelos de regresión simple y regresión múltiple (Hartkamp *et al.* 1999) e interpoladores locales utilizados como método de corrección para interpolar los residuales y obtener una aproximación exacta para la elaboración de cartografía climática (Vicente- Serrano *et al.* 2003). Estos interpoladores utilizan la información de las estaciones meteorológicas para la elaboración de mapas de variables climáticas, estableciendo relaciones entre estos y otros factores independientes como la elevación, exposición de ladera y la posición geográfica (Ninyerola *et al.* 2005).

El *Capítulo 4*, corresponde al estudio y caracterización ecológica de las poblaciones de *P. martinezii*, a partir del trabajo de campo realizado en las localidades presentes en la Cuenca de Cuitzeo, los sitios de muestreo fueron ubicados de forma representativa utilizando cuadrantes de forma circular con un área de 1,000m², se midieron y registraron parámetros fisonómicos de los individuos como: densidad, cobertura, frecuencia, DAP y altura. Estos datos obtenidos en campo fueron utilizados para obtener un valor para comparar las poblaciones y caracterizar las condiciones ecológicas de las localidades de la especie, utilizando el Índice de Valor de Importancia (VIR) el cual está basado en las proporciones relativas (%) de la densidad, frecuencia y área basal (Curtis 1959, Matteucci y Colma 1982).

En el *Capítulo 5*, se obtuvo el perfil bioclimático y el modelo de distribución potencial de *P. martinezii*, utilizando información físico-geográfica (altitud, geología,

geomorfología, edafología, pendientes, exposición de la ladera) y climática (temperatura media anual y precipitación anual) estandarizada a escala 1:50,000 (Figura 1.1) (Petraglia y Tomaselli 2003).

El perfil se determinó con base en los rangos de tolerancia a los diversos factores ambientales, obtenidos por sobreposición cartográfica con la base de datos de los puntos de presencia de la especie. El análisis y modelamiento espacial para la distribución potencial fue elaborado mediante el uso de técnicas multicriterio en ILWIS, que permite un análisis o desagregación de los componentes o criterios para asignarles valores numéricos, ya sean bajo juicios determinados por el experto o como en este caso también basados en la recopilación de información del trabajo de campo y los resultados obtenidos en el perfil bioclimático y de esta manera determinar las variables que tienen un mayor peso en la distribución de la especie.

Una vez obtenido el nicho fundamental de la especie, se identificaron las zonas para conservación y reforestación, utilizando el mapa de distribución potencial y los mapas de cobertura y uso del suelo para la Cuenca de Cuitzeo para los años de 1975 y 2000, elaborados por López y Bocco (2001). A partir de un análisis temporal basado en el cambio de cobertura se obtuvieron los sitios potenciales para la conservación y reforestación y las áreas de posible distribución de *P. martinezii* para futuras expediciones.

En el Capítulo 6, se presentan las conclusiones generales de la presente investigación, realizando un análisis de los resultados obtenidos y como estos pueden incidir en la conservación de las poblaciones de *P. martinezii* en la cuenca de Cuitzeo.

El Capítulo 7, esta conformado por recomendaciones basadas en las observaciones realizadas en el trabajo de campo, así como en la falta de información básica para la especie para realizar un aprovechamiento sustentable.

1.4. Literatura citada

Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión

Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Agrupación Sierra Madre, S.C. México.

Curtis, J.T. 1959. The vegetation of Wisconsin. An ordination of plant communities. Univ of Wisconsin Press. Madison 657 pp

Farjon, A. y T. Styles, B. 1997. *Pinus* (Pinaceae). Flora Neotropica. Monograph 75. Organization for Flora Neotropica. The New York Botanical garden. New York.

Hanson, H.E. y E. Churchill, D. 1961. The plant Community. Reinhold Publishing Corporation. New York. 217 pp.

Hartkamp, A.D., K. De Beurs, A. Stein, y J.W. White. 1999. Interpolation Techniques for Climate Variables. NRG-GIS Series 99-01. Mexico, D.F. CIMMYT.

Hutchinson, G. E. 1957. Concluding remarks. Cold Spring Harbor Simposia on Quantitative Biology 22:415-427.

López, E y G. Bocco. 2001. Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo. En: Mendoza, M., E. López y G. Bocco. Regionalización ecológica, conservación de recursos naturales y ordenamiento territorial en la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa SIMORELOS- CONACYT. Michoacán.

Madrigal- Sánchez, X. y Guridi- Gómez, L.I. 2005. Especies arbóreas y arborescentes en estado crítico de conservación. En: La Biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Villaseñor G., L.E. y O.A. Leal- Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México.

Matteucci, S. y A. Colma. 1982. Metodología para el Estudio de la Vegetación. Secretaría General de los Estados Americanos- Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D.C.

Mendoza C., M.E. 2002. Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Tesis de Doctorado. Instituto de geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 188 pp.

Ninyerola M., Pons, X.y Roure, J.M. 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.

Petraglia, A. y M. Tomaselli. 2003. Ecological profiles of wetland plant species in the northern Apennines (N. Italy). J. Limnol. 62(1): 71-78.

Rodríguez L., G y Carillo S., A. 2005. Gimnospermas. En: La Biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Villaseñor G., L.E. y O.A. Leal- Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México.

- Rzedowski, J.** 1993. Diversity and origins of the fanerogamic flora of México. En: Ramamoorthy, T.P., R. Bye, A. Lot y J. Fa (Eds.) Biological Diversity of Mexico: origins and distribution. Oxford University Press. Nueva York.
- Styles T., B.** 1998. El género Pinus: su panorama en México. En: Diversidad Biológica de México: orígenes y su distribución. Ramamoorthy T., P.R. Bye, A. Lot, J. Fa (Comps.). Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vicente Serrano, S.M., Saz, M.A. y Cuadrat, J.M.** 2003. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research* 24: 161-180.

CAPITULO 2

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1. Cuenca de Cuitzeo

La cuenca de Cuitzeo está localizada en la porción norte del Estado de Michoacán y al sur de Guanajuato, la parte baja de la cuenca tiene una superficie de 1,830 m correspondiente a la planicie, mientras que la parte mas alta tiene 3,420 m. Al interior de la misma se ubica el Lago de Cuitzeo, segundo cuerpo de agua más grande de México, calificado como la zona lacustre más importante de Michoacán y considerado como uno de los cuerpos de agua más susceptibles a la alteración, debido a que es un vaso plano y extenso en el cual se produce una gran evaporación (Israde 2005).

Debido a su importancia, el gobierno del Estado de Michoacán por medio de la Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente (SUMA), llevó a cabo el Ordenamiento Ecológico del Territorio de la cuenca con la finalidad de concertar políticas que incorporen criterios ambientales, en atención a la problemática económica y social (Periódico Oficial de Michoacán 2006).

Entre las principales actividades que han provocado el deterioro de los recursos naturales de la cuenca están el cambio de uso del suelo, la erosión, la contaminación y el abatimiento del manto freático, los cuales han agravado la eutroficación de las aguas del lago y una disminución en los niveles del vaso. Otro de los factores que han intensificado la problemática ambiental es el crecimiento de la población y la expansión de los asentamientos humanos hacia los terrenos agrícolas, bosques y matorrales, ya que esto conlleva a una mayor presión sobre los ecosistemas.

Una de las estrategias implementadas para la conservación de la biodiversidad al interior de la cuenca, ha sido la creación de Áreas Naturales Protegidas (ANP); en el documento de Ordenamiento Ecológico del Territorio elaborado por SUMA se

menciona la existencia de 7 ANP de carácter estatal, sin embargo en el presente trabajo se realizó la corrección del dato mediante la recopilación de información, obteniendo un total de 8 ANP con un área de 1,370 Ha mismas que se ubican en tres diferentes categorías (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Áreas Naturales Protegidas de carácter estatal ubicadas al interior de la cuenca de Cuitzeo

ANP	MUNICIPIO	CATEGORÍA
Loma de Santa María y depresiones aledañas de la ciudad de Morelia	Morelia	Zona Sujeta a Preservación Ecológica
Manantial La Mintzita	Morelia	Zona Sujeta a Preservación Ecológica
Cerro Punhuato	Morelia	Zona Sujeta a Preservación Ecológica
Ex escuela agrícola denominada La Huerta	Morelia	Zona Sujeta a Preservación Ecológica
Las Tinajas	Huandacareo	Zona Sujeta a Preservación Ecológica
Instituto Tecnológico Agropecuario No 7	Tarímbaro	Parque Urbano Ecológico
Fideicomiso de la Ciudad Industrial de Morelia	Morelia	Parque Urbano Ecológico
Francisco Zarco	Morelia	Prototipo

El Lago de Cuitzeo ha sido considerado como un humedal primordial para la conservación por su diversidad biológica, lo anterior se ha visto reflejado en diversos talleres participativos que han tenido como objeto la identificación de áreas prioritarias de conservación en Michoacán (SEDUE- UMSNH 2000, Velásquez *et al.* 2005), en ellos han participado los sectores social, académico y gubernamental. Los resultados obtenidos han identificado a la zona del Lago de Cuitzeo como un área en la que es necesario ejercer acciones de conservación.

2.2. Ubicación

La cuenca de Cuitzeo esta localizada entre los 19° 30' y 20° 05'N de Latitud y 100° 30' y 101° 35 W de Longitud, la superficie ha sido estimada por Mendoza y colaboradores (2001) en 4,003 Km² (Figura 2.1), abarcando un total de 28 Municipios, de los cuales 23 corresponden a la parte norte de Michoacán (92.8%) y 5 al sur del Estado de Guanajuato (7.2%) (Cuadro 2.2).

Cuadro 2.2. Municipios que integran la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

MUNICIPIO	ESTADO	SUPERFICIE APROX. (Km ²)
Acuitzio	Michoacán	139.9
Álvaro Obregón	Michoacán	159.5
Charo	Michoacán	201.5
Chucándiro	Michoacán	181.7
Copándaro	Michoacán	173.3
Cuitzeo	Michoacán	254.6
Hidalgo	Michoacán	16.7
Huandacareo	Michoacán	95.3
Huaniqueo	Michoacán	6.0
Huiramba	Michoacán	63.9
Indaparapeo	Michoacán	168.0
Lagunillas	Michoacán	80.4
Madero	Michoacán	4.0
Morelia	Michoacán	1065.3
Morelos	Michoacán	44.2
Pátzcuaro	Michoacán	80.9
Queréndaro	Michoacán	161.4
Quiroga	Michoacán	26.6
Santa Ana Maya	Michoacán	103.7
Tacámbaro	Michoacán	0.7
Tarímbaro	Michoacán	257.0
Tzintzuntzan	Michoacán	1.4
Zinapécuaro	Michoacán	428.8
Acámbaro	Guanajuato	146.3
Moroleón	Guanajuato	31.7
Salvatierra	Guanajuato	63.5
Uriangato	Guanajuato	30.2
Yuriria	Guanajuato	16.6

2.3. Características físico geográficas y climáticas de la cuenca de Cuitzeo

2.3.1. Clima

Los tipos climáticos al interior de la cuenca de acuerdo con la clasificación de García (2004) son tres: templado con lluvias en verano “Cb”, secos “BS” y semicálidos “A(C)” (Figuras 2.2) con distintas variaciones en los subtipos climáticos debido a las condiciones que determinan lo accidentado del terreno y a la variación altitudinal. Existen un total de 17 estaciones meteorológicas que han realizado registros de precipitación y temperatura por más de 20 años, distribuidas desde 1,840 hasta 2,158

metros sobre el nivel del mar (msnm); sin embargo la mayoría de estas se encuentran por debajo de los 2,000 msnm; esto es debido probablemente a que en la parte baja se lleva a cabo una intensa actividad agrícola. En la figura 2.3, se puede observar la distribución de las estaciones en la cuenca, a partir de la cual se puede notar que la representatividad de estas en zonas con altitudes mayores a los 2,000 msnm es limitada (Figura 2.3).

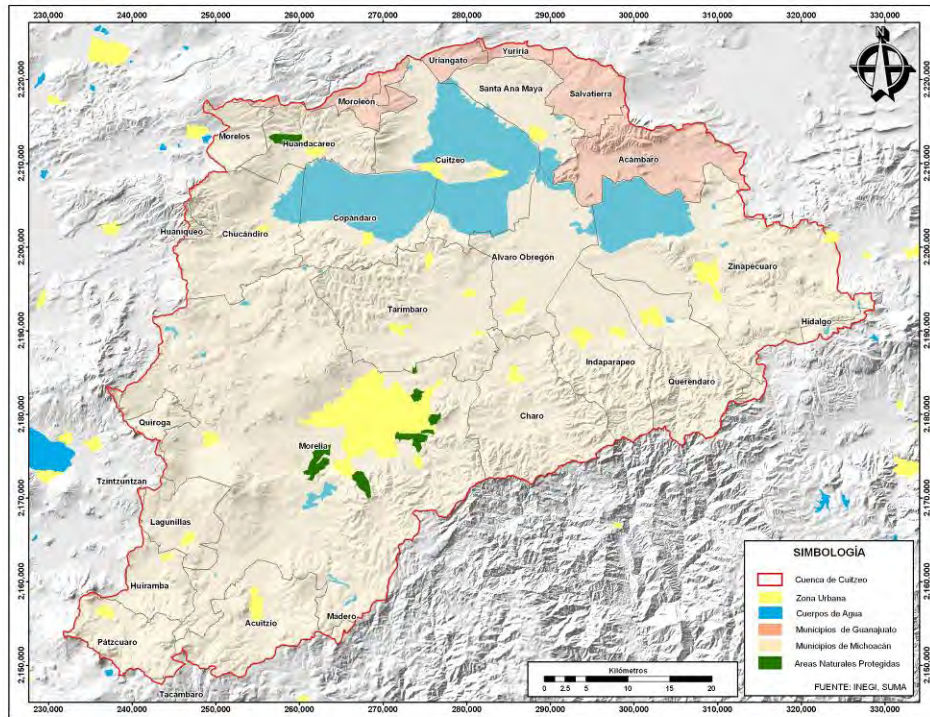


Figura 2.1. Cuenca de Cuitzeo.

La precipitación anual promedio en la cuenca está calculada en 847.4 mm (Mendoza 2002) y la temperatura media anual es de 16 -18°C para casi toda el área, con excepción de las tierras altas en donde se presentan temperaturas de 14-16°C (Robles 2006). Con base en los criterios establecidos por García (2004), se estimaron los tipos y subtipos climáticos de las estaciones para este trabajo, utilizando los datos de precipitación y temperatura mensuales (Cuadro 2.3).

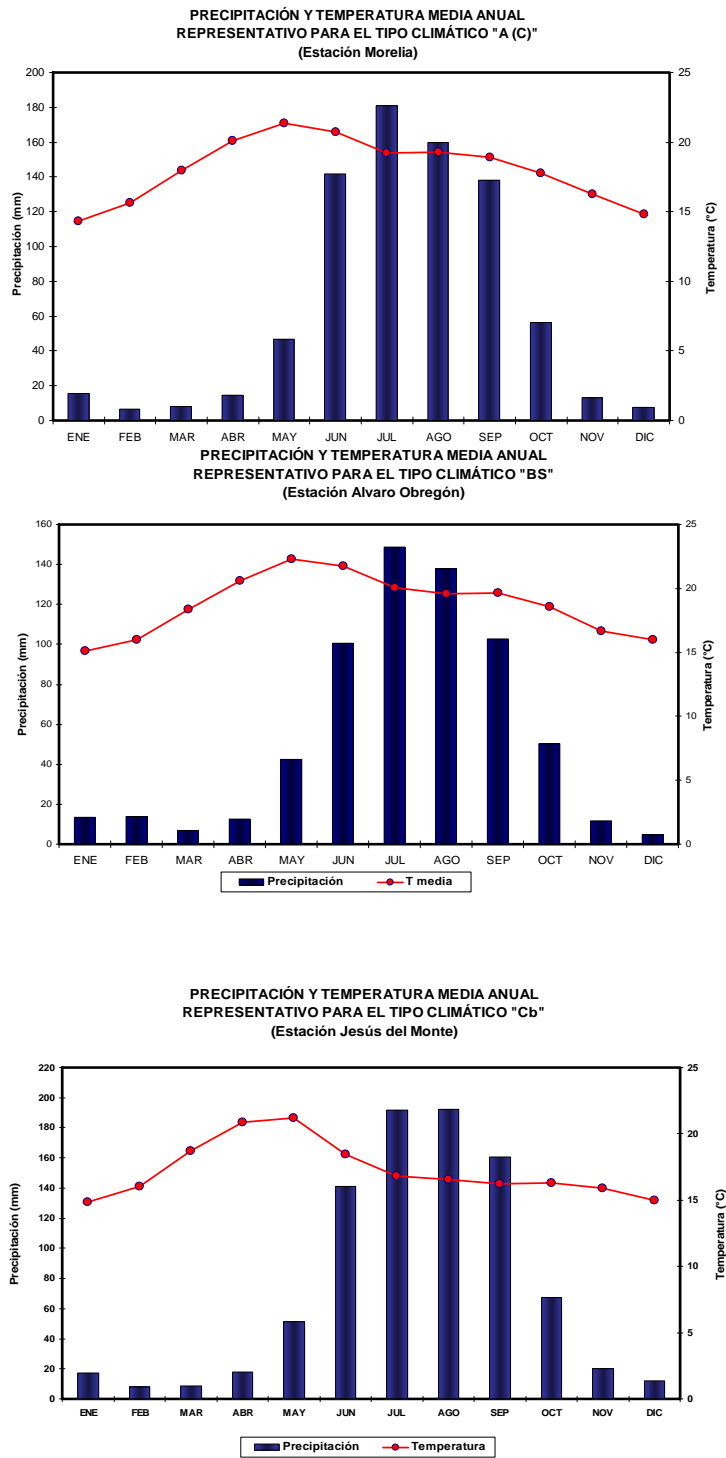


Figura 2.2. Climogramas representativos de los tres tipos climáticos registrados por las estaciones meteorológicas en la Cuenca de Cuitzeo.

Cuadro 2.3. Estaciones meteorológicas localizadas en el interior de la cuenca de Cuitzeo, con más de 20 años registrando datos de temperatura y precipitación.

ESTACION METEOROLÓGICA	ALTITUD	AÑOS	CLIMA
Acuitzio del Canje	2076	44	Cb(w2)(i)gw"
Álvaro Obregón	1851	21	BS1hw(e)g
Carrillo Puerto	1840	36	Cb(wo)(w)(i)g
Cointzio	2010	65	Cb(w1)(w)(i)g
Copándaro de Jiménez	1848	31	Cb(w1)(w)(i)g
Cuitzeo	1840	82	(A)Cb(wo)(w)(i)g
Cuitzillo Grande	1851	35	Cb(wo)(w)(i)g
Huingo	1860	63	Cb(wo)(w)(e)g
Jesús del Monte	2151	69	Cb(w1)(w)(i)g
Morelia (Centro)	1900	58	(A)Cb(w1)(w)(e)g
Presa Malpaís	1880	64	Cb(wo)(w)(e)g
Quirio	1859	41	Cb(wo)(w)(i)g
San Miguel del Monte	2158	38	Cb(w2)(w)(i)g
San Sebastián Queréndaro	1916	22	Cb(wo)(w)(e)g
Santa Rita	1840	41	(A)Ca(wo)(w)(i)g
Santiago Undameo	2013	50	Cb(w1)(w)(e)g
Zinapécuaro	1893	82	Cb(w1)(w)(i)g

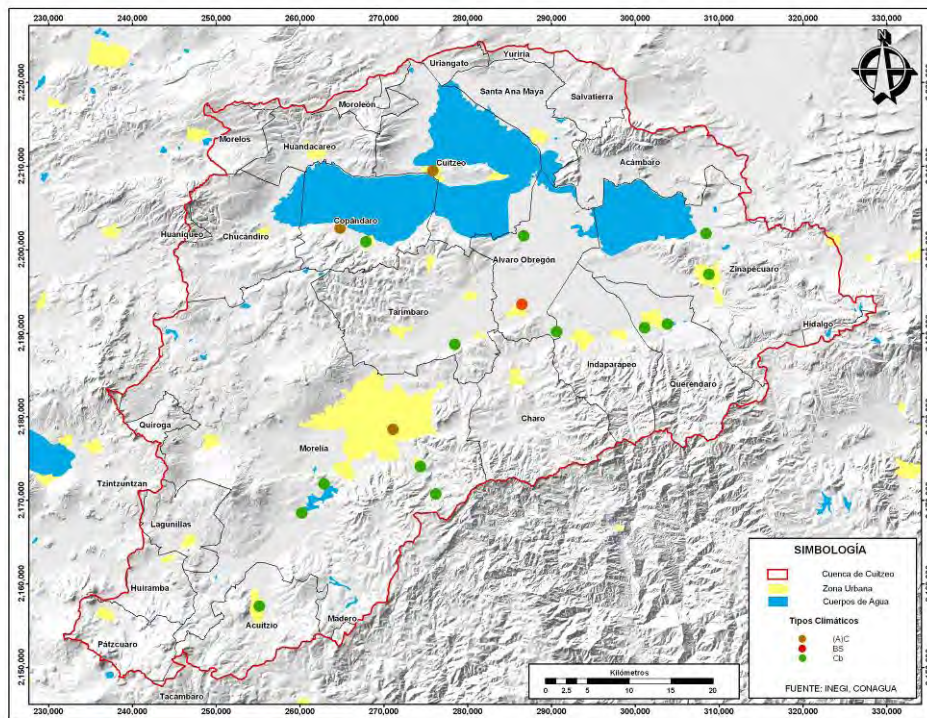


Figura 2.3. Ubicación de las estaciones meteorológicas con más de 20 años de registros de temperatura y precipitación localizadas al interior de la cuenca, y el tipo climático registrado en cada una de ellas según García (2004).

De acuerdo a García (2004) las características en generales de los climas anteriormente mencionados son:

(A)Cb(wo)(w)(i')g. Semicálido, con temperatura anual sobre 18°C, la temperatura del mes más frío esta por encima de 18°C y más de 22°C del mes más cálido, con un verano fresco largo y con poca oscilación, la marcha de la temperatura es de tipo ganges.

(A)Ca(wo)(w)(i')g. Semicálido, con temperatura anual entre 12 y 18°C, la temperatura del mes más frío está entre -3 y 18°C y menos de 18°C del mes más cálido, con un verano fresco largo y con poca oscilación, la marcha de la temperatura es de tipo ganges.

Cb(wo)(w)(i')g. Templado semifrío, con verano fresco largo, temperatura anual entre 5 y 12°C, la temperatura del mes más frío está entre -3 y 18°C y menos de 18°C del mes más cálido, con poca oscilación, la marcha de la temperatura es de tipo ganges.

Cb(wo)(w)(e)g. Templado semifrío, con verano fresco largo, temperatura anual entre 5 y 12°C, la temperatura del mes más frío esta entre -3 y 18°C y menos de 18°C del mes más cálido, extremoso, la marcha de la temperatura es de tipo ganges.

BS1hw(e)g. Semiseco- semicálido, temperatura anual por encima de 22°C, el mes más frío debajo de 18°C, y la temperatura del mes más cálido no tiene límite, es extremoso y la marcha de la temperatura es de tipo ganges.

2.3.2. Hidrología

La cuenca de Cuitzeo es de tipo endorreica en donde la evolución y configuración de la dinámica hidrológica superficial está dada principalmente por la estructura geológica regional. Los principales escurrimientos de la cuenca provienen de la porción sur y sur-oriente que constituye la región con mayores elevaciones con drenaje dendrítico a subdendrítico, mientras que en el sector oriental y norte con vulcanismo reciente posee un patrón poco desarrollado, mientras que en la parte

central de la cuenca se encuentra fuertemente alterado por la actividad agrícola de riego (Figura 2.4). De acuerdo a la cartografía de aguas superficiales del INEGI, presente en Mendoza y colaboradores 2001, el 76% de la cuenca tiene un coeficiente de escurrimiento de 10 a 20%, mientras que el 71% de la cuenca presenta posibilidades bajas de almacenamiento de agua subterránea. El principal escurrimiento en la cuenca es el Río Grande de Morelia, el cual escurre de SW a NE, y al llegar a la planicie de riego se rectifica convirtiéndose en un canal de riego, en el cual se vierten los desechos agrícolas, industriales y urbanos, que finalmente desembocan en el Lago de Cuitzeo.

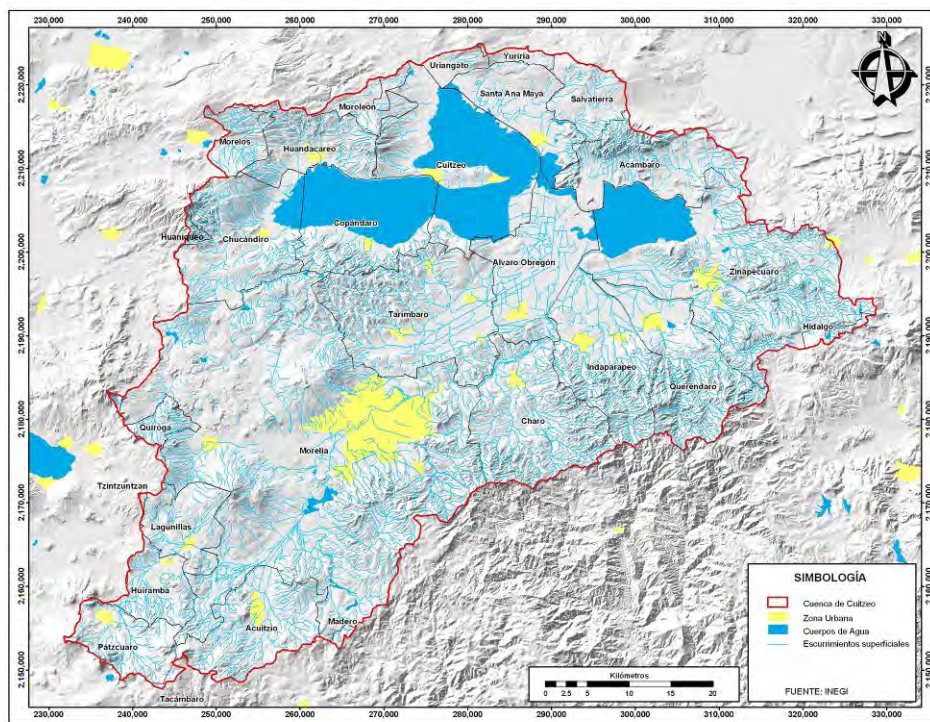


Figura 2.4. Hidrología superficial de la cuenca de Cuitzeo.

Con base en el sistema de clasificación de humedales de DUMAC (Carrera y de la Fuente 2003), los cuerpos de agua superficiales en la cuenca constituyen principalmente sistemas lacustres, mientras que en menor proporción se encuentran palustres y riverinos, mismos que han sido modificados en su mayoría por la acción del hombre.

En cuanto a los usos del agua, en la cuenca se han detectado por el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) un total de 575 fuentes de origen superficial con siguientes usos: doméstico, agrícola, industrial, agropecuario, público urbano y para el desarrollo de la acuicultura. En cuanto a los aprovechamientos subterráneos se encuentran un total de 1,068 utilizados principalmente como fuente de abastecimiento para los asentamientos humanos en la cuenca, lo cual ha ocasionado que los niveles estáticos del acuífero estén sufriendo un abatimiento (CONAGUA 2009).

2.3.3. Fisiografía

Basado en dominios morfoestructurales la cuenca se encuentra relacionada a tres regiones fisiográficas (Garduño 2005): Dominio del Complejo Volcánico Interior, Dominio del Cinturón Volcánico Mexicano y Dominio de Cuenas Lacustres.

El Dominio del Complejo Volcánico Interior, está constituido por la Sierra de Mil Cumbres que se encuentra principalmente ocupada por rocas magmáticas, en su parte Norte esta delimitada por la falla de Morelia- Acambay, la cual da inicio a la depresión lacustre del Lago de Cuitzeo, y también al magmatismo del Cinturón Volcánico Mexicano. Dentro de la Sierra de Mil Cumbres se encuentran las Calderas de Atécuaro y La Escalera y que generaron la Mesa de Santa María. En la región Este en la zona correspondiente a Queréndaro, la cuenca está delimitada por productos basálticos calco- alcalinos Pliocuaternarios y el sistema geotérmico que conforma la caldera de los Azufres, el cual generó grandes depósitos piroclásticos (Garduño 1987, Pradal y Robin 1994).

El vulcanismo del Cinturón Volcánico Mexicano se localiza en la parte Oeste de la cuenca y es el que mayor impacto ha tenido en las formas de relieve, dando lugar a volcanes semiescudo que están dentro de la Cuenca como son El Águila y El Quinceo- Las Tetillas, los cuales tienen en su base más de 10 kilómetros de diámetro. La mayoría de los aparatos volcánicos pertenecientes a este dominio están desarrollados sobre fracturas NE-SO y E-O. La composición de estas estructuras en su mayoría es de andesitas y basaltos (Garduño 2005).

El Dominio de Cuencas Lacustres, está localizado en una serie de depresiones que conviven con el vulcanismo del Cuaternario. El Lago de Cuitzeo se encuentra labrado por una serie de fallas ENE- OSO y bloques inclinados hacia el sur. Al interior de este mismo, se ha registrado la acumulación de más de 200 metros de sedimentos fluviolacustres y volcánicos. Los límites de este dominio se encuentran al sur con la Sierra de Mil Cumbres a través de la falla Morelia –Acambay y el límite norte de esta depresión (graben) lo constituye la Sierra de Moroleón- Santa Ana Maya (Garduño 2005).

El Dominio de Cuencas Lacustres está formado a partir de una serie de fallas en dirección ENE- O y bloques que se inclinan hacia el sur, en el cual se han acumulado más de 200 m de sedimentos fluviolacustres y volcánicos (Garduño 2005).

2.3.4. Geología

El sistema lacustre de la Cuenca de Cuitzeo cuyo origen es endorreico, se localiza sobre un sustrato de tipo volcánico (Israde 1995). Desde el punto de vista tectónico, la sucesión de Mil Cumbres (también denominada Sierra Madre del Sur) es considerada su basamento.

En el interior de la cuenca, se encuentran dos grandes regiones geológicas, en el sur La Sierra de Mil Cumbres, la cual ha dado origen a una serie volcánica que fue formada por centros volcánicos andesíticos que evolucionaron a calderas y que dieron lugar a una serie de derrames andesíticos, ignimbríticos y basálticos; en esta zona se puede reconocer una morfología constituida por estructuras caldéricas (Calderas de Atécuaro y la Escalera), y mesas de ignimbritas basculadas hacia el Norte y Sur, que proceden del Oligoceno- Mioceno (Garduño *et al.* 2001, Israde y Garduño 2004).

En la parte occidental de la cuenca, el Cinturón Volcánico Mexicano está conformado por una serie de secuencias fluvio lacustres y aparatos monogenéticos del Pliocuatnario, caracterizado por una serie de procesos tectónicos y volcánicos relacionados con los mecanismos de subducción y transtensión de la placa pacífica

bajo la norteamericana, que han dado origen a fosas tectónicas y que permitieron la formación del valle de la cuenca desde el Mioceno Medio (Israde y Garduño 2004).

La Cuenca de Cuitzeo está delimitada al Este por la Caldera de Los Azufres y al Oeste por vulcanitas pliocuaternarias cuyos productos formaron los volcanes en escudo Quinceo- Las tetillas. La secuencia aflorante localizada en el sector Norte de la depresión de Cuitzeo, corresponde a un bloque que provocó la formación de la depresión de Charo y Morelia (Israde y Garduño 2004).

En la cuenca se pueden encontrar rocas de origen ígneo extrusivo como son derrames de lava, escorias, aglomerados, tobas y flujos de tobas soldadas de composiciones ácidas y básicas procedentes del Mioceno inferior hasta el reciente, también se pueden encontrar rocas de origen sedimentario continental formadas por sedimentos lacustres (arenas, gravas y conglomerados), intercalados con tobas, las cuales cubren las porciones bajas de las ignimbritas y tobas riolíticas, que a su vez son cubiertos por basaltos del Plioceno superior (Anexo2.1). Sin embargo, los depósitos más recientes están constituidos por limos y arcillas de origen lacustre, gravas y arenas de tipo residual y aluviones entre las que se encuentran gravas, arenas y limos (Israde 2005, Ortega 2003).

Con base en la carta geológica de Garduño (*en prensa*), se puede destacar el área que cubren los depósitos superficiales, ocupando las partes con poca pendiente de la cuenca; le siguen en importancia los conos de lava, destacando las estructuras del Cerro del Águila y el Quinceo- Las tetillas que se encuentran a los alrededores de la ciudad de Morelia. El sustrato que menor representatividad tiene son los domos dacíticos, los cuales pueden ser encontrados en la zona oriente (Cuadro 2.4.).

2.3.5. Geomorfología

Mendoza (2002) describe la existencia de seis zonas geomorfológicas mayores: planicies, piedemontes, colinas, lomeríos bajos, lomeríos altos y montañas (Anexo 2.2). Delimitándolas con base en la uniformidad de sus elementos, o en su caso la

agrupación de varios de ellos que permitan explicar la estructura o arreglo espacial de los componentes del terreno.

Cuadro 2.4. Superficie de cobertura por sustrato geológico en la Cuenca de Cuitzeo.

SUSTRATO	SUPERFICIE (Km ²)	%
Depósitos superficiales	983.1	24.6
Conos de lava	447.1	11.2
Ignimbritas	353.0	8.8
Conos andesíticos	331.5	8.3
Cuerpos de agua	318.8	7.9
Volcanes monogenéticos	300.6	7.5
Basaltos y dacitas	294.0	7.4
Basaltos	202.9	5.1
Depósitos de caída	201.5	5.0
Depósitos lacustres	200.5	5.0
Basaltos y andesitas	146.6	3.7
Domos dacíticos y riolíticos	103.0	2.6
Domos riolíticos	69.3	1.7
Domos andesíticos	40.9	1.0
Cuerpos subvolcánicos dioríticos	5.9	0.2
Domos dacíticos	4.9	0.1

Los análisis morfométricos realizados, indican que la cuenca es de baja amplitud de relieve que se desarrolla desde los 1,830 hasta los 3,420 msnm y que el 90% de ésta se encuentra por debajo de los 2,500 msnm (Anexo 2.3). El 90% de la superficie posee una pendiente por debajo de los 25° (Figura 2.5) (Anexo 2.4), por lo que la mayor parte de su extensión posee una densidad de disección horizontal de nula a moderada, lo que tiene importantes implicaciones en los procesos de erosión, ya que en consecuencia no existe suficiente material para ser depositado en las porciones bajas de la misma (Mendoza *et al.* 200,1Mendoza 2002).

Para la zonificación geomorfológica se consideraron los siguientes aspectos: forma del relieve, litología, hidrología superficial y subterránea, suelos, pendientes y la hipsometría (Bocco *et al.*, 2001). A continuación se describen las características de las zonas geomorfológicas mayores con base al trabajo realizado por Mendoza (2002) en la Cuenca de Cuitzeo (Cuadro 2.5).

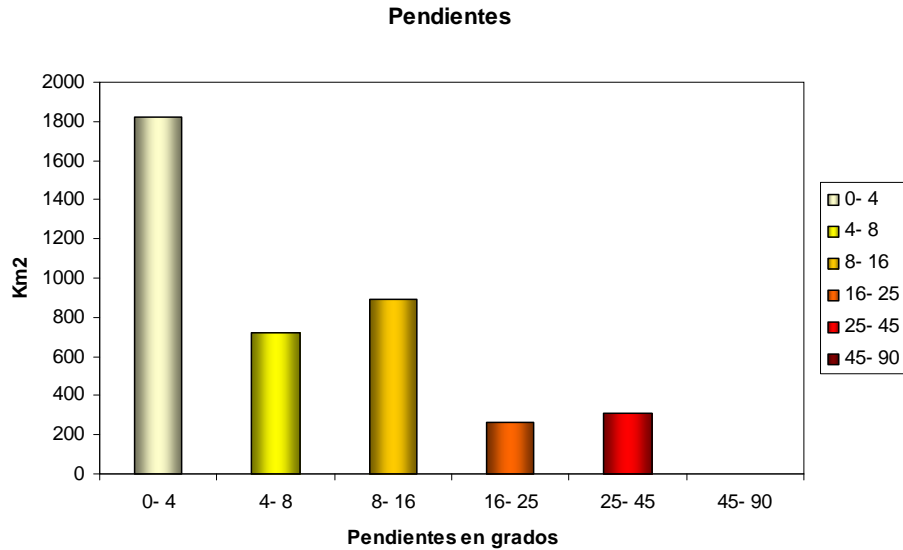


Figura 2.5. Distribución de las pendientes en la Cuenca de Cuitzeo.

Las planicies cubren el 18.2% de la superficie de la cuenca con casi 727 Km², se les encuentra frecuentemente en altitudes menores a los 1,900 msnm presentando pendientes menores de 3°, están conformadas por depósitos superficiales y lacustres recientes, en suelos Vertisol, Feozem y Zolonchak. El coeficiente de escurrimiento se encuentra entre 10 y 20% con materiales no consolidados.

Los piedemontes cubren una superficie mayor de 449 Km² (11.2%), la altitud es variable desde los 1,900 a los 2,500 msnm, caracterizándose por tener pendientes menores a 10°. Estas regiones se conforman en la cuenca por conos de lava y cenizas del Pleistoceno y por depósitos superficiales recientes, conformados por suelos de tipo Luvisoles, Vertisoles y Andosoles. Su coeficiente de escurrimiento es de 10 a 20%, en materiales consolidados.

Las colinas representan el 23.6% de la cuenca con una superficie de más de 943 Km², se les encuentra desde altitudes menores a los 1,900 hasta 2,300 msnm, con pendientes que van desde los 3 a los 20°. Se desarrollan sobre depósitos superficiales del Reciente, volcanes monogenéticos del Holoceno-Pleistoceno y depósitos de caída de diferentes épocas del Cuaternario. Los suelos que predominan en esta zona son Vertisol, Feozem, Luvisol, Acrisol y Andosol. El coeficiente de

escurrimiento al igual que en los piedemontes es de 10 a 20% en materiales consolidados.

Cuadro 2.5. Superficie de cobertura por zonas geomorfológicas mayores en la Cuenca de Cuitzeo.

RELIEVE	SUPERFICIE (Km ²)	%
Colinas	943.3	23.6
Lomeríos altos	898.9	22.5
Planicies	726.8	18.2
Rampa de piedemonte	449.4	11.2
Lomeríos bajos	392.9	9.8
Cuerpos de agua	304.9	7.6
Montañas	287.0	7.2

Con una superficie cercana a 393 Km² que representa el 9.8% de la cuenca se encuentran los lomeríos bajos, en altitudes que van desde los 1,900 hasta los 2,700 msnm, con pendientes que varían desde los 6 hasta los 20°, se le encuentra sobre conos andesíticos, de lava y cenizas, derrames de basaltos, domos dacíticos y riolíticos y depósitos superficiales, en suelos de tipo Vertisol, Andosol, Luvisol y Acrisol. El coeficiente de escurrimiento se calcula que varía desde 5 hasta 20%.

Los lomeríos altos se ubican desde los 2,100 hasta los 2,500 msnm con pendientes que varían desde los 6 a los 20°, cubriendo una superficie de casi 899 Km² (22.4%). Se desarrollan sobre ignimbritas, conos andesíticos y de lava, cenizas, derrames de andesitas y basaltos, los suelos que predominan son Vertisol, Luvisol, Andosol y Acrisol. El coeficiente de escurrimiento varía de 5 a 20% en materiales consolidados.

Las montañas cubren 287 Km² (7.2%), la altitud varía de los 2,100 hasta los 2,900 msnm, la pendiente varía desde los 6 hasta más de 45° en algunas zonas. Se encuentran sobre basaltos y andesitas, conos de lava, cenizas y derrames andesíticos en suelos de tipo andosol y acrisol. El coeficiente es de 10 a 20% sobre materiales consolidados con posibilidades bajas.

2.3.6. Suelos

Existen en la cuenca once unidades de suelo de acuerdo al sistema clasificatorio FAO 1990, sin embargo la mayor parte esta cubierta por Vertisoles, Luvisoles y Acrisoles, caracterizados por ser suelos con texturas predominantemente finas (Cuadro 2.6) (Mendoza *et al.* 2001, Pulido *et al.* 2001).

Cuadro 2.6. Superficie de cobertura por unidad de suelo en la Cuenca de Cuitzeo.

SUELOS	SUPERFICIE (Km ²)	%
Vertisoles	1354.9	33.9
Luvisoles	694.2	17.3
Andosoles	462.5	11.6
Acrisoles	412.2	10.3
Phaeozems	401.4	10.0
Leptosoles	195.1	4.9
Solonchaks	85.6	2.1
Planosoles	34.9	0.9
Gleysoles	25.4	0.6
Cambisoles	16.8	0.4
Regosoles	1.4	0.1

Los Vertisoles constituyen el tipo de suelo que mayor representatividad tiene en la cuenca, existen principalmente en la zona centro y norte de la misma, caracterizándose por tener una menor amplitud de relieve, en donde el movimiento de agua es lento y se favorece el depósito de partículas. Los Luvisoles se localizan en la porción Este sobre los domos volcánicos; mientras que los Acrisoles y Andosoles se presentan generalmente en las zonas montañosas, donde la inclinación del terreno es mayor (Anexo 2.5). Los Regosoles y Leptosoles se les encuentra en lugares asociados a rocas acidas, que forman suelos ricos en cuarzo y de partículas gruesas, debido a que son difíciles de intemperizar (Mendoza *et al.* 2001). La fase física predominante en la cuenca es la pedregosa.

Pulido y colaboradores (2001), mencionan que existe un gran deterioro en los suelos de la cuenca, los cuales son divididos en deterioro superficial e interior. La mayor parte de los suelos muestran evidencias de erosión y en algunas zonas cercanas al vaso de la cuenca tienen alto grado de ensalitramiento (principalmente en

Vertisoles), lo cual está asociado principalmente con un mal manejo del agua y al uso de agroquímicos (Mendoza *et al.* 2001). Es también frecuente encontrar una alta pedregosidad en áreas con pendientes distintas principalmente en los piedemontes, como resultado de la pérdida de capas superficiales, lo anterior ha ocasionado pérdida en la fertilidad y favorecido la presencia de rocas que dificultan las actividades agrícolas. Otro de los principales problemas es la pérdida de materia orgánica superficial, relacionada en ocasiones a la remoción de la cubierta vegetal natural.

2.3.7. Cobertura y uso del suelo

La clasificación de la cobertura y uso del suelo fue realizada para los años 1975 y 2000 por López y Bocco (2001), con base en fotografías aéreas. Inicialmente se identificaron diez categorías generales, las cuales posteriormente fueron subdivididas en 35 subclases. La cartografía de la cobertura vegetal y uso del suelo fue realizada bajo criterios de clasificación fisonómica-estructural, en donde cada categoría es una unidad mixta dominada por el elemento que le proporciona su nombre (López y Bocco 2001) (Cuadro 2.7).

Sin embargo, para el presente trabajo se realizaron modificaciones a la leyenda propuesta por López y Bocco (2001). La categoría de suelo desnudo fue considerada como una clase debido a que no necesariamente constituye un pastizal como tal, y los bordos fueron considerados dentro de la clase de cuerpos de agua. Las clases adaptadas para el presente trabajo son las siguientes (Cuadro 2.8).

La clase dominante son los matorrales con el 24.2% (958.4 Km²) de la superficie total, seguido por los bosques con el 20% (793 Km²), posteriormente los cultivos de temporal 19.9% (782.2 Km²) y los cultivos de riego con el 13.31% (526.6 Km²). Estas clases cubren en su totalidad el 77.3% del total de la cuenca (Anexo 2.6).

A continuación se realiza una descripción general de la vegetación desde el enfoque florístico según los criterios de Rzedowski (1978) y Carranza (2005), realizando una asociación a las coberturas cartografiadas por López y Bocco (2001),

quienes utilizaron un enfoque fisonómico. Debido a esto, existen diferencias conceptuales entre ambos sistemas clasificatorios.

Cuadro 2.7. Leyenda generalizada de la cobertura y uso del suelo (López y Bocco 2001).

COBERTURA GENERALIZADA	GENERALIZACIÓN
Bosques	Encino Pino Abies Mixto
Matorral	Matorral- pastizal abierto Matorral- pastizal semiabierto Matorral cerrado
Pastizal	Pastizal Pastizal halófilo Suelo desnudo
Cultivos temporales	Estacionales temporales Estacionales temporales en terrazas
Cultivos de riego	Estacionales de riego Riego en zonas de inundación Huertas
Plantaciones	Árboles Eucaliptos Pinos
Vegetación acuática	Vegetación acuática
Lago	Lago Acuicultura Zonas de inundación del lago
Bordos	Bordos Zonas de inundación de bordos
Asentamientos humanos	Asentamientos humanos Terrenos baldíos

Se debe tomar en cuenta, que los bosques tropicales caducifolios son considerados por Rzedowski (1978) y Carranza (2005) dentro de la categoría de los bosques, sin embargo debido a su fisonomía y su altura fueron considerados por López y Bocco (2001) como matorrales, por lo que en el presente trabajo serán descritos como parte de la categoría de los matorrales.

Cuadro 2.8. Leyenda de la cobertura y uso del suelo adaptada.

COBERTURA	SUPERFICIE (Km ²)	%
Matorrales	958.4	24.2
Bosques	793.1	20.1
Cultivos de temporal	782.2	19.8
Cultivos de riego	526.6	13.3
Cuerpos de agua	337.9	8.5
Pastizales	262.6	6.6
Asentamientos humanos	184.1	4.7
Vegetación acuática	56.8	1.4
Plantaciones forestales	41.8	1.1
Suelos desnudos	11.9	0.3

2.3.7.1. Matorrales

Con base en los criterios establecidos por López y Bocco (2001), los matorrales en la cuenca corresponden al matorral subtropical, el bosque tropical caducifolio y los matorrales secundarios derivados de la perturbación de ecosistemas templados (Robles 2006).

El matorral subtropical es considerado como un estado sucesional del bosque tropical caducifolio, desarrollándose en laderas que no han sido utilizadas para fines agrícolas, la distribución altitudinal varía de 1,800 a 2,300 m; es una comunidad más o menos abierta en la que dominan los arbustos altos o árboles pequeños de 3 a 5m y se desarrolla principalmente en suelos de tipo Leptosol y Vertisol.; sus componentes arbóreos son: *Acacia angustissima*, *A. farnesiana*, *Bursera cuneata*, *B. fagaroides*, *Casimiroa adulis*, *Cedrela dugesii*, *Erythrina coralloides*, *Eysendhartia polystachya*, *Forestiera phillyreoides*, *Ipomoea murucoides*, *Mimosa aculeaticarpa*, *Morus celtidifolia*, *Opuntia spp.*, *Quercus deserticola* y *Yucca filifera* (Huerta 1990).

Los manchones de bosque tropical caducifolio, se encuentran en áreas pequeñas alrededor del Lago de Cuitzeo, aunque se considera que son fases sucesionales avanzadas del matorral subtropical; esta comunidad es más densa que el matorral subtropical y llega a alcanzar alturas de 6 a 8 m. Las especies representativas de este tipo de vegetación en el estrato arbóreo son: *Bursera*

bipinnata, *B. fagaroides*, *B. cuneata*, *Ipomoea murucoides*, *Pithecellobium lephophyllum*, *Ciba aesculifolia*, *Euphorbia tanquehuete*, *Albizzia plurijuga*, *Zanthoxylum affine*, en el estrato arbustivo se puede encontrar a *Calliandria spp.*, *Acacia farnesiana*, *Desmodium pringlei* y *Opuntia spp* (Robles 2006).

2.3.7.2. Bosques

En la Cuenca de Cuitzeo se pueden encontrar bosques de coníferas (pino, oyamel y cedro blanco), también se encuentran bien representados los bosques de encino, conformando comunidades mixtas con especies de pinos (bosques mixtos). Por último, el bosque mesófilo de montaña se localiza en manchones pequeños, principalmente en cañadas donde las condiciones microclimáticas permiten el establecimiento de esta comunidad.

Los bosques de pino se encuentran desde altitudes de 2,100 hasta más de 3,000 msnm, la altura de los árboles varía de 8 a 25 metros aunque se pueden encontrar individuos de más de 30 m en algunas localidades al interior de la cuenca. Se encuentran principalmente en suelos de tipo Andosol, aunque también se desarrollan en Luvisol y Acrisol. Estas comunidades se encuentran ampliamente distribuidas en la región montañosa, desde la zona de Los Azufres en el sureste hasta la parte sur de la misma. Las especies de pino de más amplia distribución en el área en orden de importancia son *Pinus leiophylla*, *P. pseudostrobus*, *P. devoniana*, *P. michoacana*, *P. lawsonii*, *P. teocote* y *P. rudis* (Robles 2006). Con una distribución más restringida se puede encontrar a *P. martinezii* formando asociaciones con otros pinos y también conformando bosques mixtos con encinos.

El bosque de *Abies religiosa* se encuentra en las zonas más altas de la cuenca a partir de los 2,700 msnm, los individuos alcanzan alturas de 40 metros o más, y se desarrollan principalmente en suelos de tipo Andosol. En el área de estudio tiene una distribución restringida a las partes altas de los cerros El Tzirate, El Burro, Las Nieves y El Frijol en la porción suroeste y en el sureste en la región de Los Azufres (Carranza 1987 y 2005, López 1989).

La especie representativa de los bosques de cedro blanco es *Cupressus lusitanica*, el cual se asocia generalmente con *P. pseudostrobus*, o con encinos como *Quercus laurina* y/o *Q. obtusata*, estas comunidades alcanzan entre los 15 y 20 metros de altura. Su localización se restringe a pequeñas extensiones dentro del Municipio de Queréndaro, entre los 2,700 y 2,900 msnm, en suelos de tipo Andosol principalmente (Carranza 2005, Robles 2006).

Los bosques de encino constituyen una comunidad muy perturbada en la cuenca debido a las actividades del hombre, son característicos de las zonas montañosas, se les puede encontrar en altitudes desde los 2,000 hasta 2,600 msnm, desarrollándose suelos de tipo Leptosol, Acrisol y Luvisol. Sus alturas varían de 5 a 30 m, dependiendo del grado de conservación y las características del lugar. A menudo conforman bosques mixtos con *Pinus*, con los cuales comparte afinidades ecológicas, sin embargo también pueden asociarse con *Abies* y con el bosque mesófilo de montaña. Las especies más comunes en la cuenca son *Quercus castanea*, *Q. crassipes*, *Q. candicans*, *Q. magnolifolia*, y *Q. rugosa*. Otras especies arbóreas asociadas a esta comunidad son *Alnus arguta*, *Arbutus xalapensis*, *Clethra mexicana*, *Garrya laurifolia*, *Styrax ramirezii* (Guevara 1995, Carranza 2005, Robles 2006).

El bosque mesófilo de montaña es una comunidad reducida que se caracteriza por tener una alta riqueza florística formando pequeños manchones aislados, se distribuye entre los 1,800 y los 2,600 msnm, en barrancas que la protegen de la fuerte insolación y de los vientos, lo que permite que la humedad del aire y del suelo sea relativamente elevada. Se desarrolla principalmente en suelos de tipo Luvisol y Andosol. Las especies arbóreas representativas son *Carpinus caroliniana*, *Tilia mexicana*, *Clethra mexicana*, *Cornus disciflora*, *Ternstroemia lineata*, también se puede observar la presencia de individuos de los géneros *Pinus* y *Quercus* (Guevara 1995, Carranza 2005, Robles 2006).

2.3.7.3. Pastizales

Es una comunidad que está formada por gramíneas de baja estatura, se localizan en pequeñas extensiones debido a que en gran parte corresponden a asociaciones

secundarias. En la cuenca tienen una distribución que va desde los 1,800 hasta más de 3,000 m, desarrollándose en zonas planas o ligeramente onduladas, aunque en ocasiones se les puede encontrar también en zonas con pendientes pronunciadas. La gran mayoría de estas comunidades de pastos, están relacionadas con la remoción de la cubierta vegetal original, ocasionada por actividades antropogénicas (Carranza 2005, Robles 2006).

En las partes altas de la cuenca por encima de los 3,000 m de altitud, se encuentran pastos altos y amacollados de los géneros *Aepogon*, *Bromus*, *Festuca* y *Muhlenbergia*, los cuales son denominados zacatales. En la ribera del Lago de Cuitzeo, en los terrenos inundables y salinos se puede encontrar a *Distichlis spicata*, un pasto endurecido por su alta concentración de sales (Ortega 2003).

Los pastizales que se encuentran asociados a bosques de pino y encino en la cuenca, frecuentemente son favorecidos por disturbios como los incendios ocasionales y el pastoreo, en los cuales se presentan especies como *Bouteloua curtipendula*, *Hilaria cenchroides*, *Muhlenbergia macroura*, *M. robusta* y *Paspalum lividum*. Otro tipo de pastizales se presenta en las cercanías de las poblaciones donde se observan *Digitaria ternata*, *Panicum bulbosum*, *Setaria geniculata* y *Sporobolus indicus*, entre otras especies (Robles 2006).

2.3.7.4. Vegetación acuática

La distribución de estas comunidades está restringida a los cuerpos de agua, los tipos más frecuentes son el tular y el carrizal. En el Lago de Cuitzeo, se ha desarrollado este tipo de vegetación, debido a la poca profundidad del lago de cuitzeo y el gran número de manantiales existentes. Rojas y Novelo (1995) mencionan que este tipo de vegetación se presenta fundamentalmente en forma de individuos aislados, restringidos a los manantiales o a las áreas que estos inundan. Sin embargo existen poblaciones de extensión considerable en el Lago de Cuitzeo que por su tamaño pueden ser cartografiadas a escala 1:35,000.

La comunidad mejor representada es el tular, que se distribuye en la región oriental, el extremo occidental y de manera dispersa en las zonas sur y norte del Lago de Cuitzeo, las especies más representativas son *Typha dominguensis*, *Scirpus sp.*, *Cyperus sp.* y *Eleocharis sp.* (Rojas y Novelo 1995). Los carrizales están constituidos por *Arundo donax* y *Phragmites australis*, aunque frecuentemente se presentan otras especies. Se distribuyen principalmente en las zonas inundables alrededor del Lago de Cuitzeo (Robles 2006).

El bosque de galería constituye una comunidad ecológicamente importante con una alta sensibilidad a la degradación, que se localiza a orillas de arroyos y ríos con distribución discontinua, y en áreas limitadas por lo que su cartografía se restringe a escalas grandes (Rzedowski 1994). Debido a esto, el bosque de galería no es representado cartográficamente en el trabajo realizado por López y Bocco (2001), sin embargo en el presente trabajo se hace mención por la importancia del mismo. Las especies representativas de estos bosques son *Taxodium mucronatum*, *Salix bonplandiana*, *Fraxinus uhdei* y *Alnus acuminata*.

2.4. Literatura citada

- Bocco, G., M.E. Mendoza y A. Velásquez.** 2001. Remote sensing and GIS- based regional geomorphological mapping – A tool for land use planning in developing countries. *Geomorphology*. 39: 211- 219.
- Carranza G., E.** 1987. Aspectos botánico- ecológicos del campo geotérmico Los Azufres, Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Escuela de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 60 pp.
- Carranza G., E.** 2005. Vegetación. En: La Biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Villaseñor G., L.E. y O.A. Leal- Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México. 266 pp.
- Carrera G., E. y G. de la Fuente de L.** 2003. Inventario y Clasificación de Humedales en México. Ducks Unlimited de México A.C. Garza García, Nuevo León.
- CONAGUA.** 2009. Plan de gestión Integral de los recursos Naturales para la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Morelia, Michoacán.

- García, E.** 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köepen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Libros. Num. 6. 90 pp.
- Garduño M.,V.H.** 1987. Estudio geológico preliminar del área de Tlalpujahua. Senguio, Michoacán. Comisión Federal de Electricidad. Reporte Interno. GG 2/87.
- Garduño M.,V.H.** 2005. El relieve. En: La Biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Villaseñor G., L.E. y O.A. Leal- Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México. 266 pp.
- Garduño- Monroy, V.H., E. Arreygue- Rocha, I. Israde- Alcántara y G.M. Rodríguez-Torres.** 2001. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 18, núm. 1. p 37-54.
- Guevara F., F.** 1995. Vegetación del Valle de Morelia, Michoacán. Biológicas. Revista de la Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Número 3. Noviembre pp 20- 54.
- Huerta B., V.** 1990. Estudio florístico del Cerro Quinceo, Municipio de Morelia, Mich. México. Tesis de Licenciatura. Escuela de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 79 pp.
- Israde A., I.** 1995. Bacin lacustri dal settore centrale dall'arco vulcanico mexicano. Stratigrafia ed evoluzione vulcanotettonica basata sulle diatomme. Tesis Doctoral Universia degli Sudi di Milano. 254 pp.
- Israde A., I.** 2005. Los cuerpos de Agua. En: La Biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Villaseñor G., L.E. y O.A. Leal- Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México. 266 pp.
- Israde A., I. y V.H. Garduño M.** 2004. La geología de la región de Morelia. En: Garduño, V. (Editor). Contribuciones a la Geología e impacto ambiental de Morelia y sus alrededores. Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. pp 1- 13.
- López C., M.E.** 1989. Estudio florístico del Cerro Tzirate, Municipio de Quiroga, Mich. México. Tesis de Licenciatura. Escuela de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 90 pp.
- López, E y G. Bocco.** 2001. Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo. En: Mendoza, M., E. López y G. Bocco. Regionalización ecológica, conservación de recursos naturales y ordenamiento territorial en la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa SIMORELOS- CONACYT. Michoacán.
- Mendoza C., M.E.** 2002. Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Tesis de Doctorado. Instituto de geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 188 pp.
- Mendoza, M., E. López y G. Bocco.** 2001. Regionalización ecológica, conservación de recursos naturales y ordenamiento territorial en la cuenca del Lago de Cuitzeo,

Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa SIMORELOS-CONACYT. Michoacán.

- Ortega R., J.M.** 2003. Evaluación multicriterio y sistemas espaciales de toma de decisiones aplicados a la planeación del uso del suelo en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de maestría. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 146 pp.
- Pradal, E. y Robin, C.** 1994. Long-lived magmatic phases at Los azufres volcanic center, México. *Journal of volcanology and geothermal research*. 63: 201- 215.
- Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo.** 2006. Tomo CXXXVIII No. 97 Morelia, Michoacán., 13 de Junio del 2006.
- Pulido, J., J. Pérez y S. Martínez.** 2001. Los suelos de la Cuenca de Cuitzeo. En: Mendoza, M., E. López y G. Bocco. Regionalización ecológica, conservación de recursos naturales y ordenamiento territorial en la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa SIMORELOS-CONACYT. Michoacán.
- Robles del V. ,J.S.** 2006. Diversidad de la Familia Cactaceae en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán y Guanajuato, México. Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México.124 pp.
- Rojas M., J y A. Novelo R.** 1995. Flora y vegetación acuática del Lago de Cuitzeo, Michoacán, México. *Acta Botánica Mexicana*. Departamento de Botánica. Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. 31:1-17.
- Rzedowski, J.** 1978. *Vegetación de México*. Limusa. México. 432 pp.
- Rzedowski, J.** 1994. Geographical affinities of the riparian trees of Mexico. *Mémoires de la Société de Biogéographie*. IV: 37-44.
- SEDUE- UMSNH.** 2000. *Catálogo Selecto de la Biodiversidad de Michoacán*. Gobierno del Estado- Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología- Michoacán. 390 pp.
- Velázquez M., A., N. Sosa G., J.A. Navarrete P. y A. Torres G.** 2005. Bases para la conformación del Sistema de Áreas de Conservación del Estado de Michoacán. SUMA- UNAM. Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente del Gobierno del Estado de Michoacán y Universidad Nacional Autónoma de México. Primera edición. 90pp

CAPITULO 3

Análisis y modelamiento de las variables climáticas

3.1. Antecedentes

La disponibilidad de información climática de calidad es importante para el desarrollo de investigación en distintas disciplinas como la agronomía, climatología, biología y ecología. En México se tienen registros de temperatura, precipitación, tipos y subtipos climáticos para 3,266 estaciones meteorológicas distribuidas en todo el país (García 2004). Sin embargo, existe falta de calidad en la información climática debido a factores relacionados con la cobertura espacial y temporal de los datos, así como la falta de homogeneidad en los métodos para registrar la información. La disponibilidad espacial de los datos es la más problemática debido a que la información es registrada en las estaciones meteorológicas de manera dispersa, obedeciendo principalmente a criterios agrícolas por lo que la mayoría de las veces no hay información climática disponible en áreas requeridas (Vicente- Serrano *et al.* 2003).

De acuerdo a un análisis de calidad de los datos climáticos disponibles para la cuenca de Cuitzeo realizado por Mendoza (2002), la información proveniente de los monitoreos de precipitación y temperatura son moderadamente buenos, pero presentan deficiencias en la distribución altitudinal, debido a que fueron establecidas de acuerdo a criterios agroclimáticos.

En la actualidad se han desarrollado técnicas que permiten la aplicación de métodos estadísticos combinados con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para la obtención de información climática continua en áreas donde no existen estaciones meteorológicas. Estos métodos son agrupados en cuatro grupos (Cuadro 3.1) (Hartkamp *et al.* 1999, Vicente- Serrano *et al.* 2003).

Cuadro 3.1. Métodos estadísticos utilizados para la predicción de la distribución de variables climáticas.

Interpoladores globales	Interpoladores locales	Métodos geoestadísticos	Métodos mixtos
- Superficie de tendencia (Trend Surface) - Modelos de regresión lineal	- Poligonos de Thiessen - Inverso ponderado de distancia (IDW) - Splines	- Kriging simple - Kriging ordinario - Kriging en bloque - Kriging direccional - Kriging universal - Co- kriging	Combinación de 2 ó más interpoladores

Los interpoladores globales utilizan información externa (e.g. datos geográficos y topográficos), como las coordenadas geográficas de las estaciones climáticas, la elevación, la exposición y la pendiente, como variables predictivas para desarrollar los mapas de temperatura y precipitación. Estos métodos son considerados inexactos debido a que los valores predichos no coinciden con los valores reales registrados en las estaciones climáticas. Los modelos más comúnmente utilizados son los de regresión simple o múltiple (Marquínez *et al.* 2003, Ninyerola *et al.* 2005, Attorre *et al.* 2007).

Los métodos locales son considerados interpoladores espaciales exactos debido a que los valores predichos coinciden con los valores medidos en las estaciones meteorológicas. Estas técnicas solo utilizan los datos de las estaciones meteorológicas cercanas para realizar los mapas climáticos, a partir de los cuales se formula una función matemática alrededor de un punto sin datos $z(x)$ para predecir su valor climático, el proceso es repetido para calcular los valores para cada celda del raster (Thiessen 1911 *en* Vicente- Serrano *et al.* 2003, Hutchinson 1995).

Los métodos de interpolación geoestadística (kriging), tienen resultados óptimos cuando se tiene una buena distribución espacial de los datos, también algunos de estos métodos pueden utilizar información topográfica o geográfica (e.g. co- kriging o el kriging universal). El kriging es modelado mediante una función matemática en la cual es calculada la varianza espacial de la variable climática, mediante un modelo ajustado con un semi-variograma, el cual ajusta las semi-

varianzas entre los valores climáticos a diferentes distancias en el espacio (Krige 1966, Oliver y Webster 1990, Borrough y McDonnell 1998, Diodato 2005).

Los métodos mixtos pueden combinar los métodos globales, locales y geoestadísticos. Son considerados interpoladores globales inexactos debido a que el valor predicho para $z(x)$ no coincide con el dato real registrado. Generalmente los métodos mixtos son utilizados para mejorar el resultado de la interpolación mediante la corrección por residuales, utilizando interpoladores locales como los *splines* o el Inverso ponderado de distancia (IDW), que no requieren de información geográfica (Vicente- Serrano *et al.* 2003, Ninyerola *et al.* 2005).

3.2. Objetivo

- Analizar y crear una base de datos con la información de las estaciones meteorológicas de la cuenca de Cuitzeo
- Obtener un modelo de precipitación y temperatura a partir de métodos de interpolación que utilizan variables climáticas y geográficas.

3.3 Hipótesis

1. Mediante la aplicación de técnicas de interpolación es posible generar matrices raster con información climática detallada para la cuenca de Cuitzeo, a partir de los registros diarios de precipitación y temperatura en las estaciones meteorológicas.

3.4. Metodología

3.4.1. Análisis y sistematización de la información climática

Se analizó la información de 44 estaciones meteorológicas, que se encuentran al interior de la cuenca y en un área de influencia de 30 km. La organización Meteorológica Mundial, recomienda utilizar para el análisis de datos climáticos, las estaciones con más de 30 años de información disponible; sin embargo, se han obtenido resultados satisfactorios en modelamiento de precipitación y temperatura con

series de 15 a 25 años (Marquínez *et al.* 2003, Ninyerola *et al.* 2005). En el presente trabajo se utilizaron los valores brutos de los datos mensuales de las estaciones que tienen registros mayores a 20 años de temperatura y precipitación proporcionados por la CNA (Comisión Nacional del Agua). (Cuadro 3.2). A partir de éstos se calcularon los valores anuales de precipitación y temperatura, la oscilación de la temperatura y los tipos climáticos para cada una de las estaciones (García 2004).

3.4.2. Selección de las variables climáticas de interés

Para realizar el análisis estadístico, se elaboró una matriz de datos en el programa JMP utilizando la información de las estaciones climáticas con más de 20 años de registros de precipitación y temperatura y siete diferentes variables climáticas (temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación, relación precipitación/temperatura, porcentaje de lluvias de invierno y oscilación de la temperatura) (García 2004).

Se realizó un análisis de correlación múltiple, el cual es una medida de la relación que existe entre dos o más variables, mediante el uso de los coeficientes de correlación (R^2) de acuerdo a la ecuación 1. El más comúnmente usado es el coeficiente de correlación de Pearson, el cual es una medida del ajuste del modelo y representa la porción de la variación, por lo que es útil para detectar redundancias en la información (Marquínez *et al.* 2003, Yang 2004).

Mediante este análisis se realizó una prueba de normalidad multivariada y se excluyeron las estaciones que poseen datos atípicos (*outliers*). Los coeficientes de correlación fueron calculados con la siguiente función:

$$1) \quad R^2 = \frac{\sum XY - \frac{\sum X \sum Y}{n}}{\sqrt{\left(\sum X^2 - \frac{(\sum X)^2}{n} \right) \left(\sum Y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right)}}$$

Cuadro 3.2. Estaciones meteorológicas utilizadas en el análisis climático; información proporcionada por la CNA.

ESTACIONES	FECHAS DE REGISTRO		AÑOS DE REGISTRO
	INICIO	TERMINO	
Acámbaro	n/a	n/a	n/a
Acuitzio del Canje*	1961	2005	44
Álvaro Obregón*	1964	1985	21
Carrillo Puerto*	1969	2005	36
Chiquimitío	n/a	n/a	n/a
Chucándiro	1969	1987	18
Ciudad Hidalgo*	1961	2004	43
Coíntzio*	1940	2005	65
Copándaro de Jiménez*	1970	2001	31
Cuitzeo*	1923	2005	82
Cuitzillo Grande*	1970	2005	35
El Castillo	n/a	n/a	n/a
El Puente San Isidro*	1948	2003	55
El Temascal de Morelia*	1965	2004	39
Huaniqueo*	1974	2004	30
Huingo*	1941	2004	63
Iramuco	n/a	n/a	n/a
Jaripeo	1992	2004	12
Jesús del Monte*	1935	2004	69
Maravatío*	1923	1984	61
Milpillas	n/a	n/a	n/a
Morelia (Centro)	1947	2005	58
Morelia (SMN)	n/a	n/a	n/a
Moroleón	n/a	n/a	n/a
Pátzcuaro*	1973	2005	32
Planta de Bombeo Zinziméo	n/a	n/a	n/a
Presa Malpaís*	1940	2004	64
Pucuáto*	1980	2004	24
Puruándiro*	1950	2004	54
Quirio*	1964	2005	41
Quiroga (Santa Fe Quiroga)*	1964	2005	41
Salvatierra	n/a	n/a	n/a
San Miguel Curahuango*	1975	2002	27
San Miguel del Monte*	1967	2005	38
San Sebastián Queréndaro*	1969	1991	22
Santa Rita*	1964	2005	41
Santiago Undaméo*	1954	2004	50
Senguio*	1969	2004	35
Teremendo Morelia*	1982	2005	23
Tzitzio*	1971	2004	33
Ucareo	2000	2003	3
Umécuaro	n/a	n/a	n/a
Yuriria	n/a	n/a	n/a
Zinapécuaro*	1923	2005	82

* Estaciones meteorológicas con más de 20 años de registros de temperatura y precipitación.
n/a – Estaciones sin información de años de registro

En donde X y Y son las variables a correlacionar y n son las observaciones. Existe una relación lineal exacta entre las dos variables cuando la relación es 1 ó -1, dependiendo si las variables están relacionadas positiva o negativamente; en caso de que no exista relación lineal la correlación tiende a 0.

3.4.3. Modelamiento de las variables climáticas

Entre los métodos estadísticos más utilizados para predecir la distribución geográfica de las variables climáticas están los modelos de regresión simple y regresión múltiple (Hartkamp *et al.* 1999, Bennartz y Michelson 2003). Estos interpoladores globales, utilizan la información de todas las estaciones meteorológicas para la elaboración de mapas de variables climáticas, estableciendo relaciones entre los datos climáticos y otras variables independientes que pueden tener una importante influencia como las coordenadas geográficas de las estaciones (latitud y longitud), variables topográficas como la elevación, exposición de ladera y pendientes, en diversos trabajos también son utilizadas las distancias a cuerpos de agua epicontinentales y las líneas de costa. Sin embargo, la elevación es usualmente el principal factor que determina la distribución espacial de la precipitación y la temperatura (Felicísimo 2001, Marquínez *et al.* 2003, Touazi *et al.* 2004, Diodato 2005, Ninyerola *et al.* 2005).

Los métodos mixtos son también comúnmente utilizados para la elaboración de cartografía climática, valiéndose de métodos globales (considerados inexactos) e interpoladores locales. Estos últimos, utilizados como método de corrección para interpolar los residuales para obtener una aproximación exacta de la información climática (Vicente- Serrano *et al.* 2003).

3.4.3.1. Modelo de regresión

Los coeficientes de correlación de Pearson son utilizados para estimar las relaciones entre las variables climáticas y las variables geográficas independientes (Touazi *et al.* 2004). La base de datos de las estaciones meteorológicas se complementó con la información de las variables geográficas necesarias para desarrollar el análisis de regresión múltiple (nombre de la estación, coordenadas geográficas, altitud, temperatura media, precipitación anual, oscilación de la temperatura y exposición de

ladera), posteriormente los datos fueron analizados en el programa estadístico JMP (Bennartz y Michelson 2001, Attorre *et al.* 2007).

Se realizaron tres distintos modelos de regresión, para evaluar en cuál de ellos se obtienen los mejores resultados (Ninyerola *et al.* 2005); el primero con las estaciones que se encuentran al interior de la cuenca (17 estaciones), el segundo incluyendo las estaciones a una distancia de 10 km (24 estaciones) y el tercero a una distancia de 20 km (30 estaciones), la distancia fue calculada con base en buffers elaborados en un SIG. De éstas, el 70% de las estaciones fueron utilizadas para la elaboración del modelo y el 30% para su validación (Ninyerola *et al.* 2005). La regresión fue calculada con base en la siguiente función:

$$2) \quad Z(X) = b_0 + b_1P_1 + b_2P_2 + \dots + b_nP_n$$

n donde **Z** es el valor a predecir en un punto **X**, **b₀... b_n** los coeficientes de regresión, y **P₁... P_n** son los valores de las diferentes variables independientes en el punto **X** (Johnson 2000).

Para la evaluación de la confiabilidad de los distintos modelos de regresión, se utilizó el coeficiente de determinación (R^2), el cual estima la validez del modelo. Una vez obtenidos los coeficientes de regresión múltiple (Marquínez *et al.* 2003), se aplicó la ecuación mediante algebra de mapas en ILWIS para la elaboración de las matrices raster, utilizando las variables climáticas y geográficas mencionadas anteriormente.

3.4.3.2. Ajuste del modelo de regresión por corrección residual

Los residuales del ajuste de regresión, reflejan la variación inexplicada para cada estación. La obtención de residuos se realizó en el paquete estadístico JMP, para el cual se restaron los valores observados (información registrada en las estaciones climáticas) de los valores predichos por el modelo de regresión lineal.

$$3) \quad \textit{Residuales} = \textit{datos observados} - \textit{datos predichos}$$

Los residuales fueron interpolados espacialmente en ARCVIEW 3.2, utilizando *splines* ($\phi=400$), el cual es un interpolador de tipo local que no utiliza información geográfica auxiliar (Vicente- Serrano *et al.* 2003). Posteriormente, los mapas de anomalías se integraron a los generados mediante regresión múltiple utilizando algebra de mapas en ILWIS, para la obtención de los mapas finales, mediante la siguiente ecuación.

$$4) \quad \textit{Mapa final} = \textit{Mapa de regresión} + \textit{Mapa de anomalías}$$

Este proceso de corrección es utilizado para mejorar el resultado obtenido a partir de un interpolador global inexacto (regresión múltiple) (Ninyerola *et al.* 2005, Attorre *et al.* 2007).

3.4.3.3. Estimación de la confiabilidad del modelo

Este proceso de validación se realizó en el paquete estadístico JMP, el cual consiste en la comparación de los valores predichos por los mapas reales con los valores observados en las estaciones meteorológicas que no fueron designadas para la calibración del modelo (ajuste de regresión), ni en el proceso de corrección de residuales. Se realizó un análisis de regresión entre los valores predichos y observados para el 30% de las estaciones que fueron elegidas para el proceso de validación de manera preliminar (Ninyerola *et al.* 2005, Attorre *et al.* 2007).

Los resultados de la validación se expresan a través del coeficiente de determinación (R^2) obtenido a partir de efectuar la regresión. Este índice de fiabilidad tiene la particularidad de ser independiente de las unidades de medida de las variables y por lo tanto es posible comparar distintos modelos. Sin embargo, tiene una magnitud adimensional por lo que dificulta la evaluación de calidad del mapa. Sin embargo, el Error Medio Cuadrático *RMSE* (*Root Mean Square Error*, por sus siglas en ingles), es una de las mejores medidas del error de un modelo debido a que permite conocer el error asociado en términos de unidades reales (Willmott1982).

3.5. Resultados y discusión

3.5.1. Análisis y sistematización de la información climática

De las estaciones que se tiene registro de información, se eligieron 30 que cumplen con la condición de tener más de 20 años registrando datos de precipitación y temperatura. La estación que tiene más años de registro es la de Zinapécuaro (82) y la de menor es Álvaro Obregón (21), las estaciones se encuentran distribuidas desde los 1,565 m hasta los 2,509 m de altitud (Figura 3.1). La información de precipitación y temperatura de las estaciones fue analizada y estructurada con base en los criterios de García (2004) para conformar una base de datos para el análisis estadístico (Cuadro 3.3).

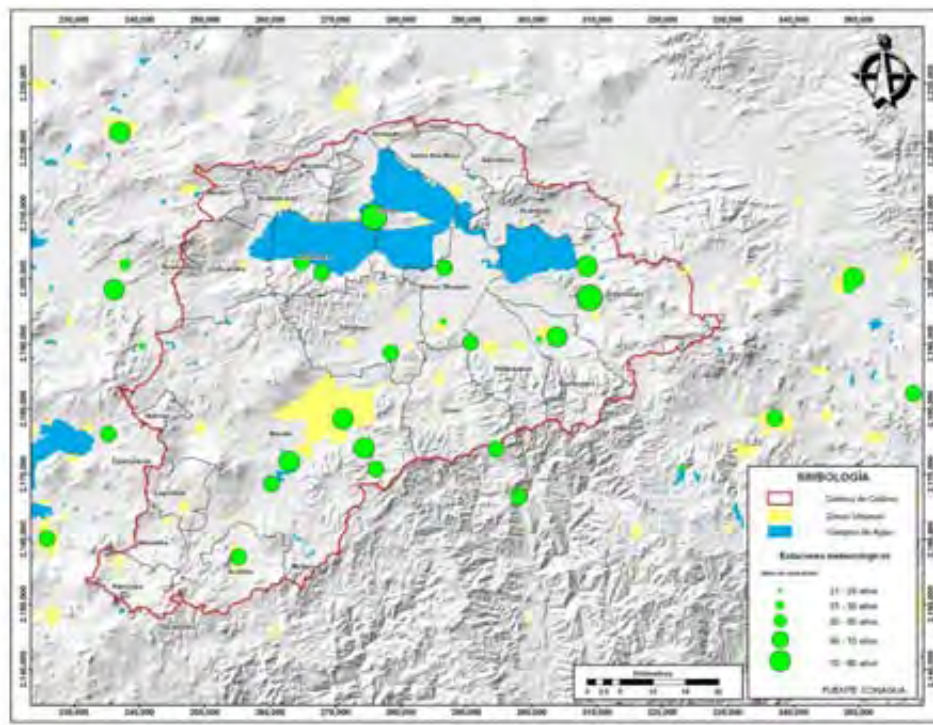


Figura 3. 1. Distribución espacial de las estaciones meteorológicas con registros de temperatura y precipitación superiores a 20 años.

Cuadro 3.3. Resumen de información climática de las estaciones meteorológicas proporcionadas por CNA con más de 20 años de registro.

ESTACION	ALTITUD	T° MEDIA	T° MAX	T° MIN	PREC	PREC / T°C	% PREC INVERNAL	OSCILACION	CLIMA
Acúitzio del Canje	2076	16.70	27.88	4.94	992.34	59.41	5.30	6.00	Cb(w2)(i)'gw"
Álvaro Obregón	1851	18.72	30.23	6.02	646.09	34.51	5.30	7.20	BS1hw(e)g
Carrillo Puerto	1840	16.57	26.83	5.56	698.46	42.16	3.90	6.90	Cb(wo)(w)(i)'g
Ciudad Hidalgo	2069	16.56	29.77	4.27	823.04	49.70	5.00	6.10	Cb(w1)(i)'g
Coíntzio	2010	17.60	29.54	6.60	810.03	46.03	3.50	6.20	Cb(w1)(w)(i)'g
Copándaro de Jiménez	1848	15.52	26.93	3.03	850.10	54.77	3.50	6.90	Cb(w1)(w)(i)'g
Cuitzeo	1840	18.04	29.43	6.91	682.83	37.84	4.70	6.90	(A)Cb(wo)(w)(i)'g
Cuitzillo Grande	1851	17.07	28.98	4.43	647.34	37.92	3.80	6.60	Cb(wo)(w)(i)'g
El Puerto San Isidro	2000	16.18	27.72	3.66	825.76	51.03	5.40	6.80	Cb(w1)(i)'
El Temascal de Morelia	2240	16.99	26.41	8.26	1402.59	82.54	3.40	5.10	Cb(w2)(w)(i)'g
Huaniqueo	2043	17.90	28.48	7.50	887.63	49.60	3.50	6.60	Cb(w1)(w)(i)'g
Huingo	1860	17.51	29.03	5.15	741.27	42.33	3.50	7.00	Cb(wo)(w)(e)g
Jesús del Monte	2151	17.24	28.80	7.26	887.90	51.49	3.80	6.30	Cb(w1)(w)(i)'g
Maravatío	2018	17.86	30.00	5.78	899.38	50.36	4.10	6.60	Cb(w1)(w)(i)'g
Morelia (Centro)	1899	18.03	30.02	6.41	788.69	43.74	3.80	7.00	(A)Cb(w1)(w)(e)g
Pátzcuaro	2144	16.45	28.06	4.81	926.02	56.28	4.10	6.50	Cb(w2)(w)(i)'
Presa Malpaís	1880	17.44	29.30	4.77	728.83	41.79	3.60	7.20	Cb(wo)(w)(e)g
Pucúáto	2509	14.30	25.43	3.10	1184.90	83.00	4.70	6.00	Cb(w2)(w)(i)'
puruándiro	1921	19.09	30.92	7.39	817.88	42.84	2.90	7.50	(A)Ca(wo)(w)(e)g
Quiro	1859	17.81	29.15	6.26	725.19	40.73	4.90	7.00	Cb(wo)(w)(i)'g
Quiroga (Santa Fe Quiroga)	2071	16.38	28.45	5.12	827.16	50.48	4.10	5.60	Cb(w1)(w)(i)'g
San Miguel Curahuango	2019	16.98	29.10	5.34	794.31	46.77	3.50	6.50	Cb(w1)(w)(i)'
San Miguel del Monte	2158	15.92	27.35	4.71	1040.17	65.36	3.30	6.70	Cb(w2)(w)(i)'g
San Sebastián Queréndaro	1916	16.48	27.73	4.54	669.23	40.61	3.70	7.10	Cb(wo)(w)(e)g
Santa Rita	1840	20.00	32.17	8.49	723.87	36.19	3.70	5.50	(A)Ca(wo)(w)(i)'g
Santiago undaméo	2013	16.13	27.87	3.84	837.77	51.95	3.90	7.00	Cb(w1)(w)(e)g
Senguio	2278	15.61	27.31	4.97	906.94	58.11	4.20	6.40	Cb(w2)(w)(i)'g
Teremendo Morelia	2146	16.57	27.90	5.99	724.24	43.70	3.10	6.30	Cb(w1)(w)(i)'g
Tzitzio	1565	20.54	30.12	10.99	1225.25	59.65	3.00	5.60	(A)Ca(w2)(w)(i)'g
Zinapécuaro	1893	17.85	28.41	7.51	840.12	47.07	3.00	6.80	Cb(w1)(w)(i)'g

T°MEDIA= Temperatura media anual (°C); T°MAX= Promedio de la Temperatura máxima anual (°C); T°MIN=Promedio de la Temperatura mínima anual (°C); PREC= Precipitación anual (mm); P/T= Relación precipitación / temperatura; %PI=Porcentaje de lluvias invernales; OSC= oscilación de la temperatura (°C).

El promedio de precipitación registrado en las estaciones es de 851.9 mm, el registro mínimo corresponde a la estación Álvaro Obregón (646 mm), la cual se encuentra a una altitud de 1,851 m, y la precipitación más alta se registra en El Temascal de Morelia (1,402 mm), la cual se encuentra a los 2,240 m (Figura 3.2). Mientras que el promedio de la temperatura media para las estaciones es de 17.2°C, el registro mínimo corresponde a Pucuáto (14.3 °C), con una altitud de 2,508 m, la máxima pertenece a Tzítzio (20.5 °C) ubicada a los 1,565 m (Figura 3.3).

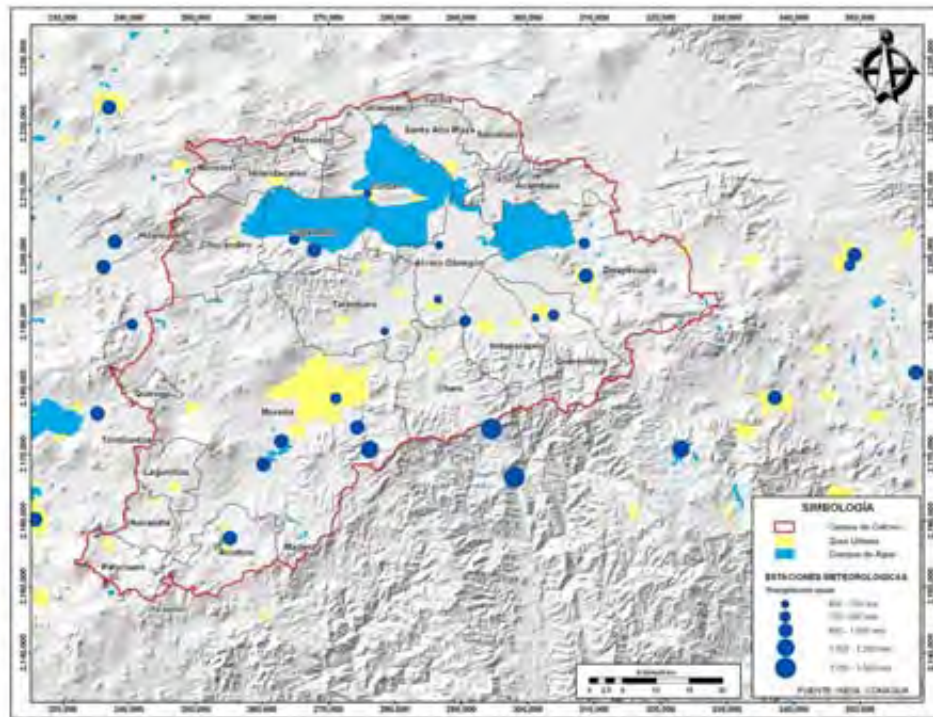


Figura 3. 2. Distribución espacial de los registros de precipitación por clases en las estaciones meteorológicas.

La distribución de las estaciones se encuentra en su mayoría por debajo de los 1,900 m (Mendoza 2002), por lo que no se cuentan con datos representativos de precipitación y temperatura para las partes más altas de la cuenca que alcanzan los 2,936 m. Por otro lado, la presencia de las mismas obedece a criterios agrícolas, así como a los principales centros urbanos (Figura 3.1).

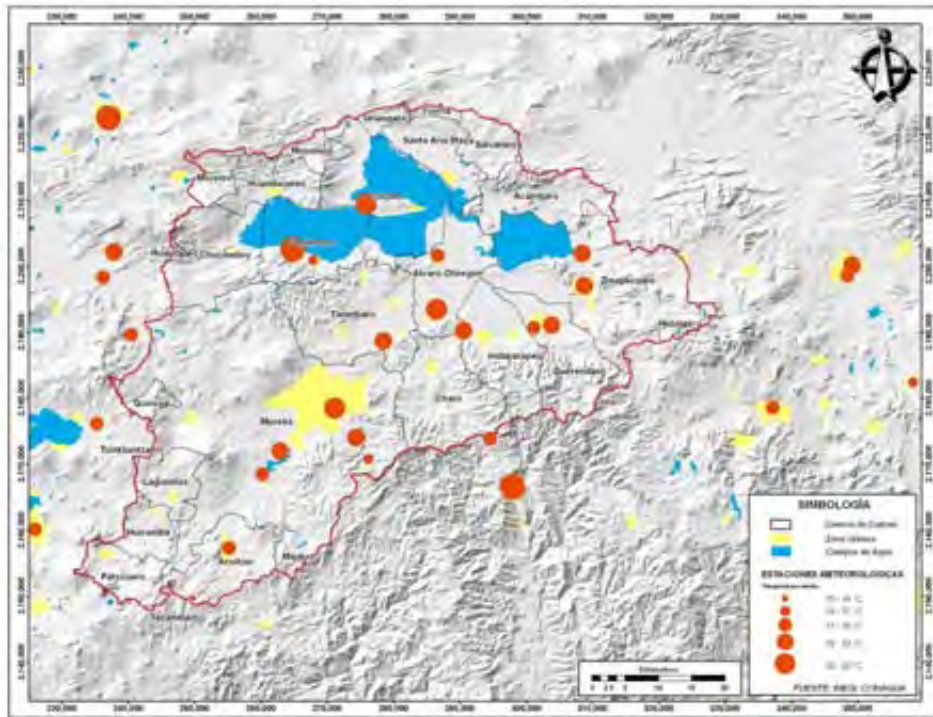


Figura 3. 3. Distribución espacial de los registros de temperatura por clases en las estaciones meteorológicas.

3.5.2. Selección de las variables climáticas de interés

La información climática se analizó para detectar la consistencia de los datos e implementando técnicas para la detección de estaciones que poseen datos atípicos (*outliers*), utilizando las variables (temperatura media, temperatura mínima, temperatura máxima, precipitación, relación precipitación/temperatura, porcentaje de lluvias de invierno y oscilación de la temperatura).

Los *outliers* son datos extremos que no deben incluirse en el análisis, debido a que su presencia puede alterar en forma notable los resultados de los coeficientes de correlación; por lo tanto, la detección de este tipo de datos hace posible la disminución de errores. Se utilizó la técnica de distancia de Mahalanobis, la cual es un algoritmo que toma en cuenta la estructura de correlación de todos los datos en conjunto así como también a escalas individuales y tiene la ventaja de identificar rápidamente los *outliers* (Williams *et al.* 2002, Finch *et al.* 2005, Rossiter 2006).

La distancia de Mahalanobis muestra la distancia de cada punto (estación) hacia la media o centroide multivariado (línea naranja, ver figura 3.4); estas distancias multivariadas son útiles para colocar los *outliers* en diferentes dimensiones. Sin embargo, si las variables están altamente correlacionadas en un sentido multivariado entonces un punto puede ser considerado como un *outlier* en el espacio multivariado. Las estaciones que fueron detectadas con datos atípicos corresponden a El Temascal, Pucúato, Santa Rita y Tzitzio, por lo cual no fueron consideradas para el análisis de correlación múltiple (Figura 3.4).

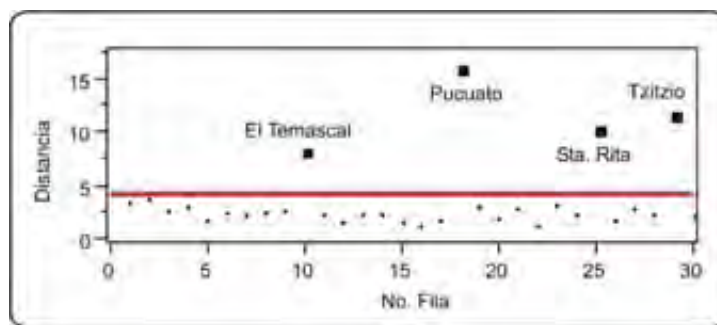


Figura 3. 4. Gráfica de distribución de *outliers*, utilizando el algoritmo de distancia de Mahalanobis.

El análisis de correlación múltiple muestra los coeficientes de correlación de Pearson, estructurados en una matriz donde se relacionan cada par de las variables climáticas al mismo tiempo (Rossiter 2006). Estableciendo las relaciones lineales que existen entre cada variable y detectando aquellas que presentan una estrecha relación si el coeficiente es cercano a 1 y cuando la correlación es baja si es próximo a 0 (Marquínez *et al.* 2003).

Las variables de temperatura máxima y mínima no fueron consideradas debido a que tienen una estrecha relación con la temperatura media anual (0.84 y 0.77 respectivamente). Asimismo, la variable de precipitación/temperatura (P/T) tiene un coeficiente de correlación de 0.94 con la precipitación y debido a esto fue también descartada. Por lo que la variabilidad de este conjunto de datos puede ser explicado con las variables de la temperatura media anual y precipitación anual.

El conjunto de datos correspondiente al porcentaje de precipitación invernal, no fue considerado debido a que el grado de correlación con las demás variables es cercano a 0 y no presentaba normalidad multivariada.

Con base en el análisis de correlación múltiple, las variables elegidas para el modelamiento climático fueron la temperatura media anual, precipitación anual y oscilación de la temperatura (Cuadro 3.4). Este análisis constituye una herramienta muy importante para reducir el número de variables a utilizar en el modelamiento climático.

Cuadro 3. 4. Matriz de correlación múltiple para la selección de las variables climáticas.

VARIABLE	T° MEDIA	T° MAX	T°MIN	PREC	P/T	%PI	OSC
T° MEDIA	1.0000	0.8430	0.7663	-0.3517	-0.6352	-0.0580	0.4162
T°MAX	0.8430	1.0000	0.4979	-0.2819	-0.5225	0.0509	0.2166
T°MIN	0.7663	0.4979	1.0000	-0.0701	-0.3306	-0.2704	0.0782
PREC	-0.3517	-0.2819	-0.0701	1.0000	0.9448	-0.0549	-0.4125
P/T	-0.6352	-0.5225	-0.3306	0.9448	1.0000	-0.0129	-0.4660
%PI	-0.0580	0.0509	-0.2704	-0.0549	-0.0129	1.0000	-0.1715
OSC	0.4162	0.2166	0.0782	-0.4125	-0.4660	-0.1715	1.0000

T°MEDIA= Temperatura media anual (°C); T°MAX= Promedio de la Temperatura máxima anual (°C); T°MIN=Promedio de la Temperatura mínima anual (°C); PREC= Precipitación anual (mm); P/T= Relación precipitación / temperatura; %PI=Porcentaje de lluvias invernales; OSC= oscilación de la temperatura (°C).

3.5.3. Modelamiento de las variables climáticas

Para la elaboración de los modelos, se conformó una base de datos con las variables climáticas seleccionadas mediante el análisis de correlación múltiple; ésta se complementó con los valores de las variables geográficas de los puntos donde se encuentran las estaciones. Para los cuales se utilizó la altitud, la exposición de ladera, las coordenadas geográficas de las estaciones (expresadas en coordenadas UTM) (Cuadro 3.5) (Ninyerola *et al.* 2005).

Obteniendo dichos valores mediante el cruce de los mapas (MDE y Exposición) con la información puntual de las estaciones. El mapa de altitud fue elaborado con base en un Modelo Digital de Elevación (MDE), obtenido a partir de la interpolación en ILWIS de las cartas vectoriales 1:50,000 de INEGI con una resolución espacial de 20

metros; el mapa de exposición de la ladera fue derivado a partir del MDE utilizando algoritmos para su generación en este mismo SIG.

3.5.3.1. Modelo de regresión

Se elaboraron tres diferentes bases de datos, la primera con las estaciones que se encuentran en la cuenca (*Modelo cuenca*), la segunda con un buffer de 10 Km (*Modelo buffer 10*) y la tercera a 20 km de distancia (*Modelo buffer 20*); los buffers fueron realizados en ARCVIEW 3 con la extensión *Buffer wizard*. Posteriormente, se seleccionaron las estaciones de manera aleatoria para la elaboración del modelo (70%) y para la validación del mismo (30%), con la extensión *Geoestatistical Analyst* de ARCGIS 9 (Ninyerola *et al.* 2005).

La base de datos que contenía únicamente la información de las estaciones al interior de la cuenca está conformada por un total de 17, de las cuales 11 fueron seleccionadas para el modelo y 6 para su validación (Anexo 3.1). Para las estaciones localizadas dentro del *Buffer* de 10 km se incluyeron 24, de estas 16 fueron usadas en el modelo y 8 para la estimación de la fiabilidad (Anexo 3.2). En el caso del *Buffer* de 20 km se consideraron las 30 estaciones, utilizando 21 en el modelo y 9 para la validación (Anexo 3.3).

Se realizó un análisis de regresión lineal en cada una de las bases de datos, utilizando como variables independientes X la información geográfica (latitud, longitud, altitud y exposición) para expresar la variabilidad climática, y a las variables dependientes Y (T° Media, Precipitación y Oscilación), para obtener los valores de correlación y los coeficientes de determinación para establecer las relaciones entre las variables (Touazi *et al.* 2004).

En el análisis de correlación y regresión realizado para el *Modelo cuenca*, se observó una correlación significativa ($\text{Prob}>F= 0.01$) de la precipitación con la altitud, obteniendo un coeficiente de correlación del 0.85, lo cual significa que el 73% de la variación está explicada por la altitud. La T° Media mostró un coeficiente de correlación del 0.84, explicando un 71% de la variación con el modelo, sin embargo

este no fue tomado en cuenta debido a que la variación de la temperatura media no esta relacionada directamente a esta variable, aunque sí puede influir indirectamente en ésta (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.5. Variables seleccionadas para el análisis de correlación.

ESTACIÓN	X	Y	ALTITUD	T° MEDIA	PREC	OSC	EXPOSICIÓN
Acuítzio del Canje	255183	2157305	2076	16.70	992.34	6.00	90
Álvaro Obregón	286491	2193431	1851	18.72	646.09	7.20	356
Carrillo Puerto	286697	2201647	1840	16.57	698.46	6.90	225
Ciudad Hidalgo	337232	2178565	2069	16.56	823.04	6.10	135
Coíntzio	262914	2171975	2010	17.60	810.03	6.20	45
Copándaro de Jiménez	267913	2200911	1848	15.52	850.10	6.90	22
Cuitzeo	275882	2209425	1840	18.04	682.83	6.90	361
Cuitzillo Grande	278507	2188644	1851	17.07	647.34	6.60	0
El Puerto San Isidro	236163	2198337	2000	16.18	825.76	6.80	225
El Temascal de Morelia	294527	2173855	2240	16.99	1402.59	5.10	156
Huaniqueo	237856	2202151	2043	17.90	887.63	6.60	245
Huingo	308461	2201935	1860	17.51	741.27	7.00	270
Jesús del Monte	274374	2174056	2151	17.24	887.90	6.30	270
Maravatío	349164	2200123	2018	17.86	899.38	6.60	135
Morelia (Centro)	271120	2178493	1899	18.03	788.69	7.00	270
Pátzcuaro	225909	2160147	2144	16.45	926.02	6.50	274
Presa Malpaís	303859	2191063	1880	17.44	728.83	7.20	183
Pucúáto	323039	2170833	2509	14.30	1184.90	6.00	205
Puruándiro	237048	2222521	1921	19.09	817.88	7.50	331
Quirio	290614	2190199	1859	17.81	725.19	7.00	180
Quiroga (Santa Fe Quiroga)	235282	2176161	2071	16.38	827.16	5.60	209
San Miguel Curahuango	348428	2198569	2019	16.98	794.31	6.50	90
San Miguel del Monte	276227	2170751	2158	15.92	1040.17	6.70	6
San Sebastián Queréndaro	301131	2190657	1916	16.48	669.23	7.10	316
Santa Rita	264835	2202543	1840	20.00	723.87	5.50	361
Santiago Undaméo	260246	2168486	2013	16.13	837.77	7.00	0
Senguio	358373	2182369	2278	15.61	906.94	6.40	315
Tereméndo Morelia	240471	2189658	2146	16.57	724.24	6.30	57
Tzitzio	297986	2166545	1565	20.54	1225.25	5.60	45
Zinapécuaro	308801	2197019	1893	17.85	840.12	6.80	285

T°MEDIA= Temperatura media anual (°C); PREC= Precipitación anual (mm); OSC= oscilación de la temperatura (°C); EXPOSICIÓN= orientación de la ladera (°).

Como producto del análisis en el *Modelo buffer 10*, hay una correlación significativa únicamente para la oscilación de la temperatura con la latitud con un

coeficiente de 0.63 que explica el 40% de la variabilidad en el modelo; sin embargo, no fue tomado en cuenta debido a que al interpolarlo con una variable lineal se presentaría una redundancia en la información (Cuadro 3.7).

Cuadro 3.6. Análisis de correlación y regresión de las estaciones del *Modelo cuenca*.

	T° MEDIA		PRECIPITACIÓN		OSCILACIÓN	
	Correlación	R ²	Correlación	R ²	Correlación	R ²
Longitud	0.1010	0.0102	-0.4816	0.2319	0.6968	0.4855
Latitud	0.4102	0.1683	-0.6454	0.4555	0.2188	0.0478
Altitud	-0.4600	0.2116	0.8594	0.7387*	-0.2954	0.0873
Exposición	0.8458	0.7154*	-0.4847	0.2349	-0.0609	0.0037

* Prob >F= 0.01

Cuadro 3.7. Análisis de correlación y regresión de las estaciones del *Modelo buffer 10*.

	T° MEDIA		PRECIPITACIÓN		OSCILACIÓN	
	Correlación	R ²	Correlación	R ²	Correlación	R ²
Longitud	0.4484	0.2012	0.1818	0.0330	0.0757	0.0057
Latitud	-0.1549	0.0240	-0.5984	0.3580	0.6325	0.4000*
Altitud	-0.5940	0.3528	0.2048	0.4195	-0.2604	0.0678
Exposición	0.0162	0.0003	-0.2575	0.0663	0.2763	0.0763

* Prob >F= 0.01

En el *Modelo buffer 20*, se obtuvieron correlaciones significativas (Prob>F= 0.01) de la T°Media con las variable altitud con un coeficiente de correlación de -0.6518, la cual significa que el 42% de la variabilidad es explicada por la altitud, también se presentó un coeficiente de correlación significativo con la exposición de ladera (0.61) el cual explica un 37% de la variabilidad en el modelo de regresión. Para la precipitación se obtuvo un coeficiente de correlación con la altitud de 0.81, mediante el cual explica el 65% de la variabilidad en el modelo (Cuadro 3.8).

3.5.3.2. Modelos de regresión de la temperatura

Se realizó el análisis de regresión múltiple en JMP para conocer los coeficientes que indican el peso que debe tener cada variable y explicar su relación con la temperatura, para predecir el valor climático en un determinado punto del territorio, mediante la aplicación de la ecuación obtenida de la relación de la variable climática con las

geográficas en un SIG (Hartkamp *et al.* 1999, Spellman 2000, Xu y Singh 2001, Marquínez *et al.* 2003, Diodato 2005, Ninyerola *et al.* 2005).

Cuadro 3.8. Análisis de correlación y regresión de las estaciones del *Modelo buffer 20*.

	T° MEDIA		PRECIPITACIÓN		OSCILACIÓN	
	Correlación	R ²	Correlación	R ²	Correlación	R ²
Longitud	-0.1931	0.0373	0.0610	0.0037	0.5312	0.0028
Latitud	0.5183	0.2686	-0.5321	0.2831	0.4639	0.2152
Altitud	-0.6518	0.4248*	0.8110	0.6578*	-0.4719	0.2227
Exposición	0.6148	0.3781*	-0.4412	0.1946	0.1948	0.0380

* Prob >F= 0.01

Mediante el análisis de regresión múltiple con la información de la base de datos del *Modelo buffer 20*, se obtuvo la ecuación de la relación de la temperatura con las variables independientes altitud y exposición (Figura 3.5), la cual fue utilizada para integrar el análisis estadístico en un SIG mediante el programa ILWIS (Figura 3.6).

5) $T^{\circ}\text{media} = 24.041148 + (-0.003934) (\text{MDE}) + (10.0045038) (\text{Exposición})$

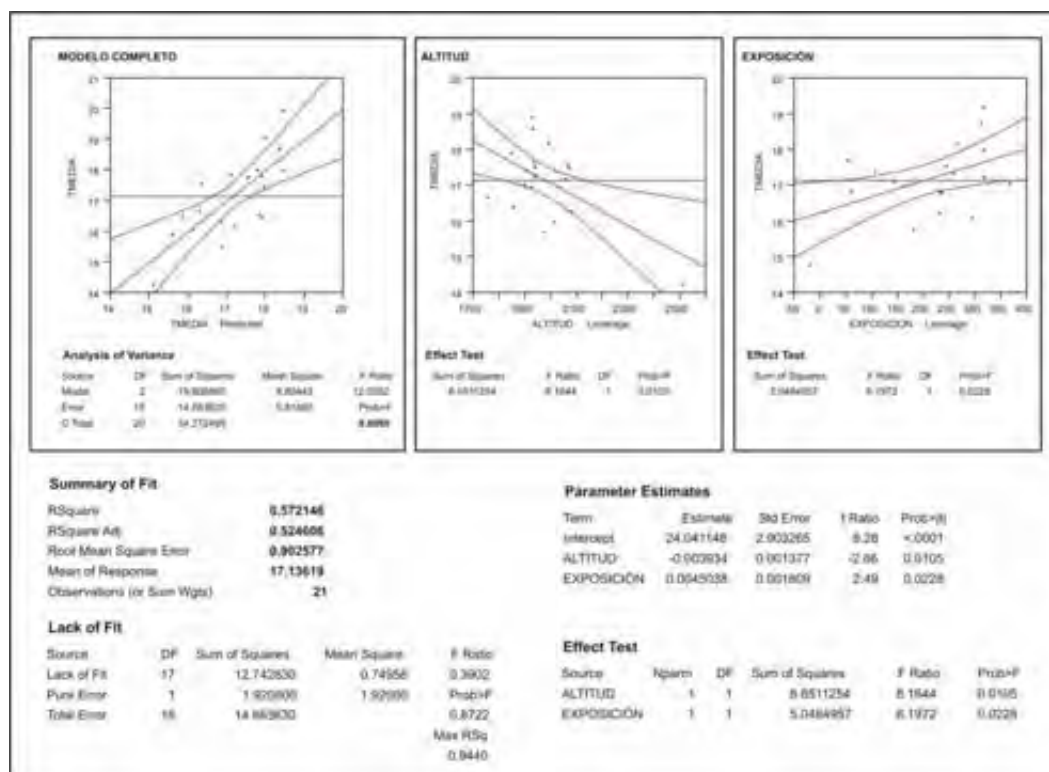


Figura 3.5. Análisis de regresión múltiple de la temperatura del *Modelo buffer 20*, utilizando como variables independientes la altitud y la exposición.

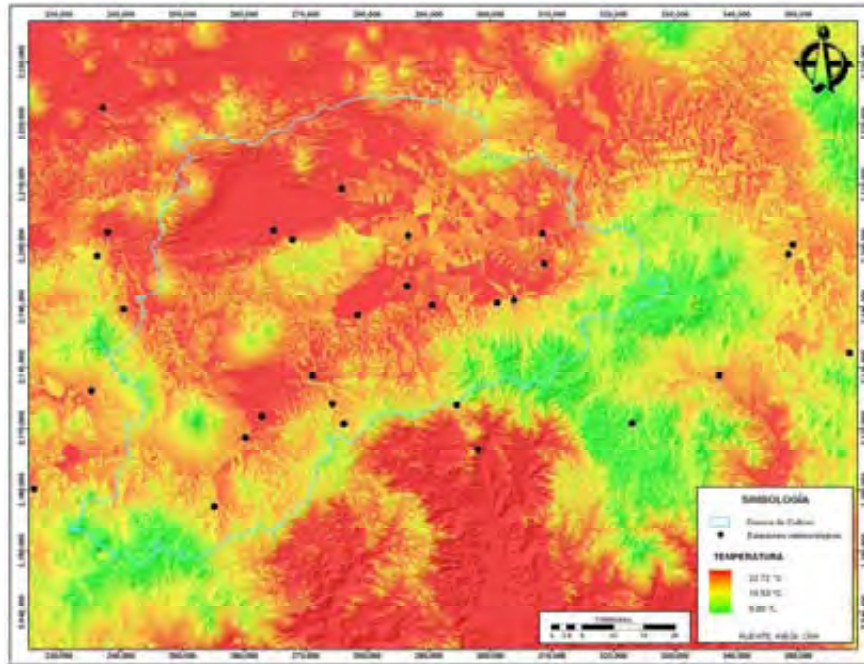


Figura 3.6. Mapa de temperatura media anual, obtenido mediante el análisis de regresión múltiple con información del Modelo buffer 20.

Se realizó también, una regresión simple de la temperatura con la altitud como variable independiente utilizando la información del *Modelo buffer 20*, mediante el cual se obtuvo la ecuación con los coeficientes de ambas variables, espacializada posteriormente en el SIG (Figuras 3.7 y 3.8).

6)
$$T^{\circ}media = 27.6942 - (0.00532) (MDE)$$

3.5.3.3. Modelos de regresión de la precipitación

El modelamiento de la precipitación se realizó mediante un análisis de regresión simple, utilizando únicamente como variable independiente la altitud (Figura 3.9). Para el *Modelo cuenca*, se obtuvo la siguiente ecuación que indica la relación que guarda la precipitación con la altitud, la cual fue utilizada para la elaboración del mapa de precipitación en ILWIS (Figura 3.10).

7)
$$Precipitación = -999.87 + (0.89898) (MDE)$$

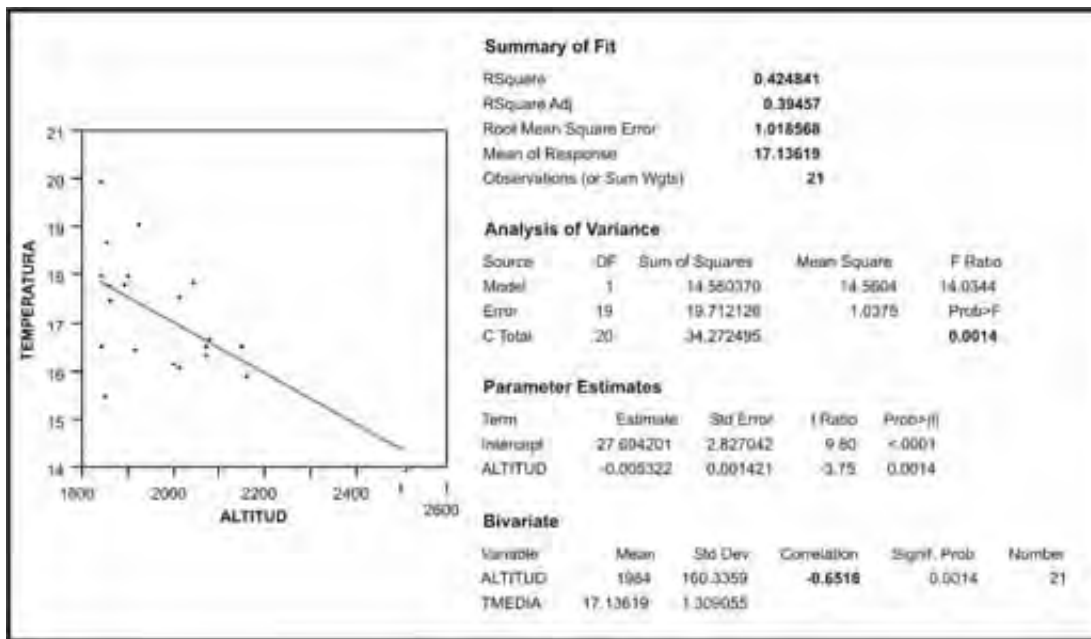


Figura 3.7. Análisis de regresión simple de la temperatura del Modelo buffer 20, utilizando como variable independiente la altitud.

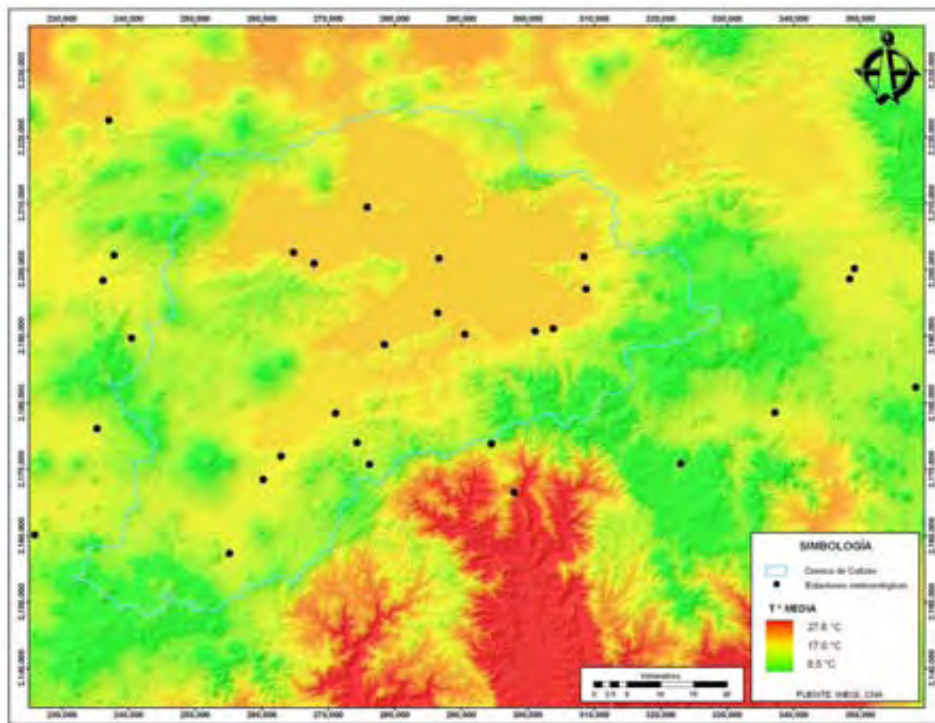


Figura 3.8. Mapa de temperatura media anual, obtenido mediante el análisis de regresión simple con información del Modelo buffer 20.

Cabe señalar que como un efecto de esta interpolación, se obtienen valores negativos de precipitación, sin embargo para la zona de estudio no se presentan estos valores, por lo que estos mapas aplican únicamente para la cuenca.

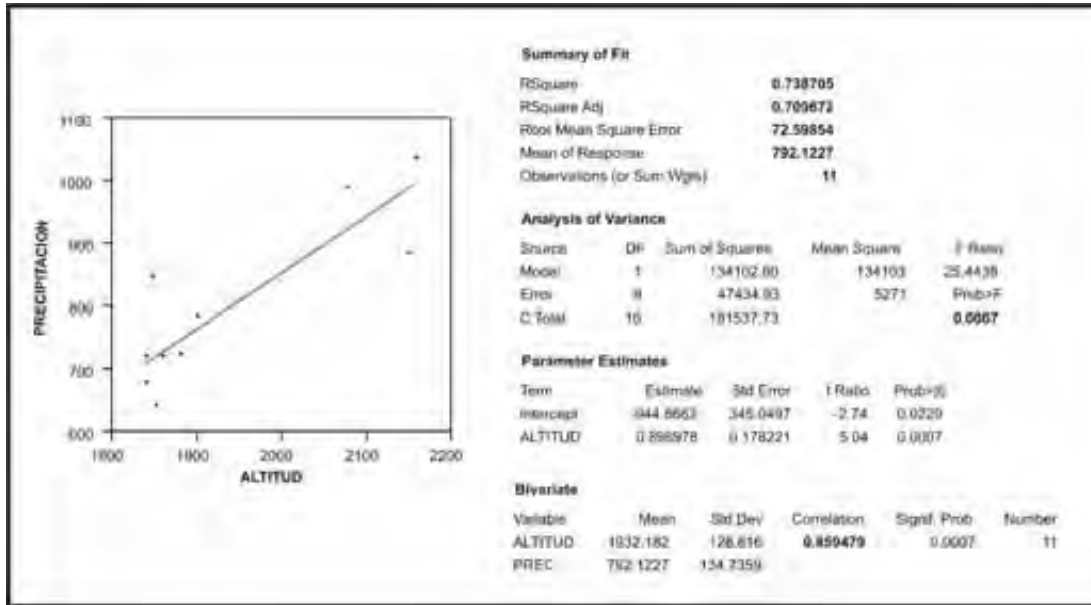


Figura 3.9. Análisis de regresión simple de la precipitación del *Modelo cuenca*, utilizando como variable independiente la altitud.

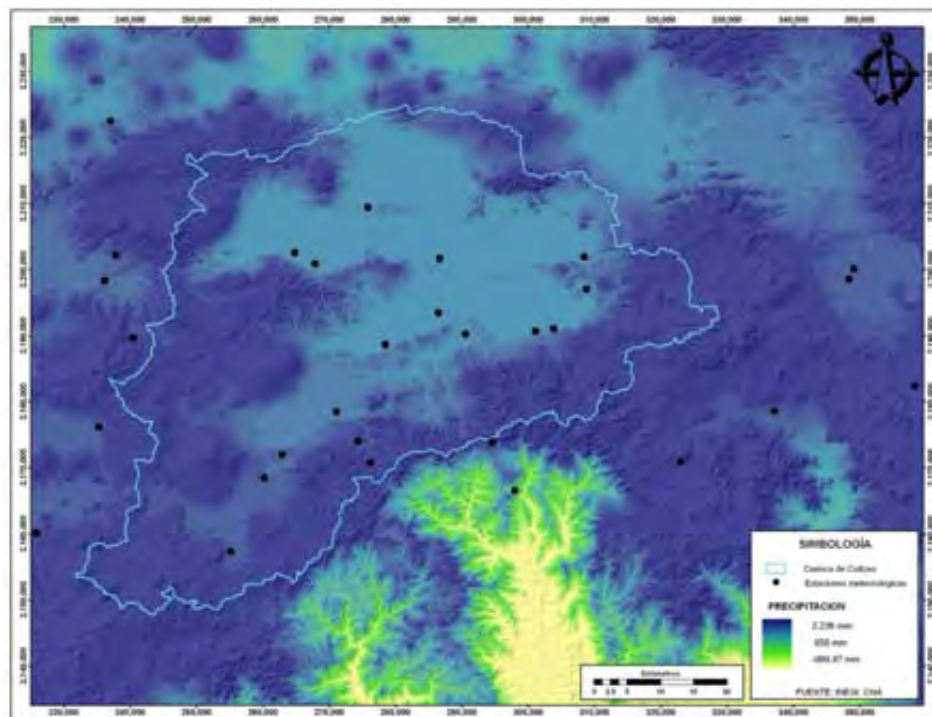


Figura 3.10. Mapa de precipitación anual, obtenido mediante el análisis de regresión simple con información del *Modelo cuenca*.

Este mismo análisis de regresión simple fue realizado para el *Modelo buffer 20* para obtener la relación entre la precipitación y la altitud (Figura 3.11). La ecuación obtenida a partir del modelo de regresión, se espacializó también mediante la aplicación de algebra de mapas en el SIG (Figura 3.12).

8)
$$\text{Precipitación} = -489.69 + (0.65813) (\text{MDE})$$

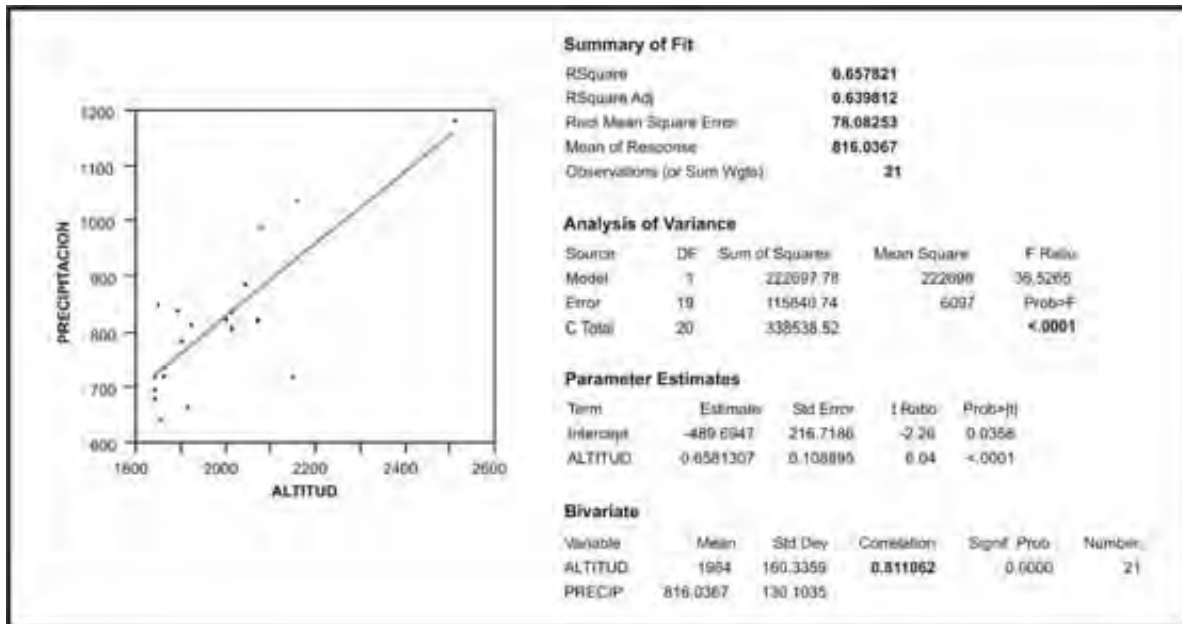


Figura 3.11. Análisis de regresión simple de la precipitación del *Modelo buffer 20*, utilizando como variable independiente la altitud.

3.5.4. Ajuste del modelo de regresión por corrección residual

Para la obtención de residuos en los modelos, se restaron los valores observados en las estaciones meteorológicas de los valores predichos por el modelo de regresión en JMP. Los residuales de la regresión en cada estación, reflejan la variación inexplicada por otras variables no consideradas como los errores metodológicos acumulados (Vicente- Serrano *et al.* 2003, Ninyerola *et al.* 2005).

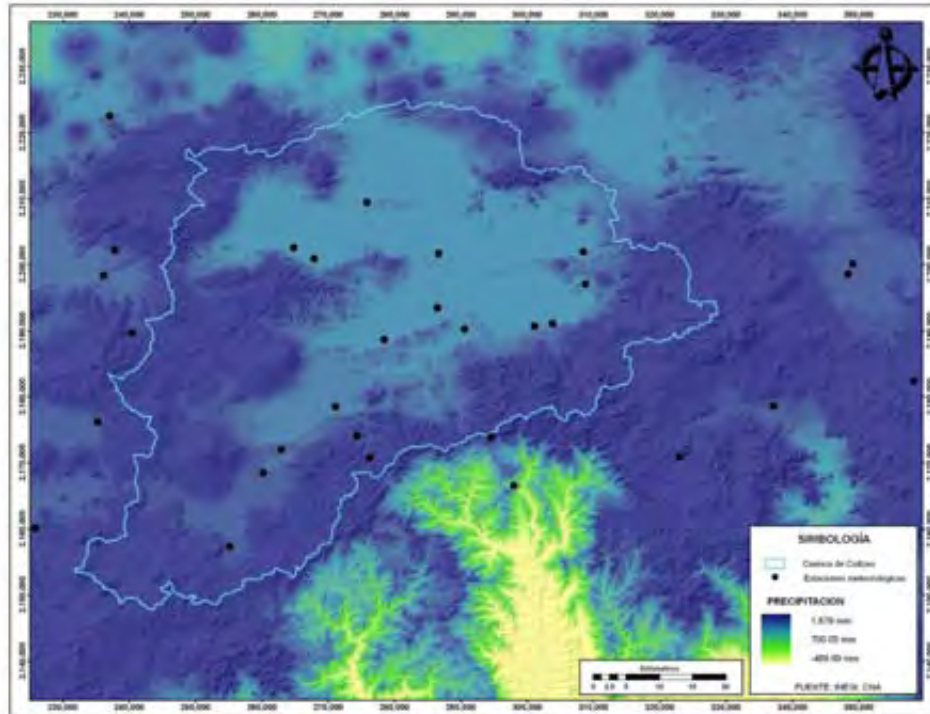


Figura 3.12. Mapa de precipitación anual, obtenido mediante el análisis de regresión simple con información del *Modelo buffer 20*.

A partir de este análisis de regresión múltiple de la temperatura con las variables geográficas altitud y exposición de ladera, y de la regresión simple de la temperatura con la altitud, se obtuvieron los residuales, en los cuales se puede observar que las estaciones que poseen las diferencias más altas entre el valor predicho por la regresión y el dato observado son Copándaro de Jiménez (-2.34) y Santa Rita (2.10) (Cuadro 3.9). Con los residuos, se construyeron nuevas bases de datos para la elaboración de nuevos datos vectoriales en ARCVIEW 3, y para posteriormente efectuar una interpolación mediante *splines* usando la extensión *Spatial Analyst*, los resultados de esta operación fueron nombrados mapas de anomalías (Figura 3.13 y 3.14).

Para la precipitación se realizó el mismo procedimiento, obteniendo los residuales de las dos regresiones simples (*Modelo cuenca* y *Modelo buffer 20*) obteniendo los mayores residuales para las estaciones de Copándaro de Jiménez (133.65) y Jesús del Monte (-100.94) para el *Modelo Cuenca* y para el *Modelo buffer 20* la de Copándaro de Jiménez (128.32) y la de San Sebastián Queréndaro (-106.81),

posteriormente con esta información se conformaron las bases de datos con los cuales se elaboró la información vectorial (Cuadro 3.10 y 3.11). A partir de ésta se elaboraron los mapas de anomalías mediante la interpolación por *splines* en ARCVIEW 3 (Figura 3.15 y 3.16).

Cuadro 3.9. Datos residuales obtenidos para los modelos de regresión múltiple y regresión simple para el modelamiento de la temperatura.

ESTACIÓN	DATO	REGRESIÓN MÚLTIPLE		REGRESIÓN SIMPLE	
	OBSERVADO	PREDICHO	RESIDUAL	PREDICHO	RESIDUAL
Acúitzio del Canje	16.70	16.28	0.42	16.65	0.05
Álvaro Obregón	18.72	18.36	0.36	17.84	0.88
Carrillo Puerto	16.57	17.82	-1.25	17.90	-1.33
Ciudad Hidalgo	16.56	16.51	0.05	16.68	-0.12
Coíntzio	17.60	16.34	1.26	17.00	0.60
Copándaro de Jiménez	15.52	16.87	-1.35	17.86	-2.34
Cuitzeo	18.04	18.43	-0.39	17.90	0.14
El Puerto San Isidro	16.18	17.19	-1.01	17.05	-0.87
Huaniqueo	17.90	17.11	0.79	16.82	1.08
Huingo	17.51	17.94	-0.43	17.80	-0.29
Morelia (Centro)	18.03	17.78	0.25	17.58	0.45
Pucúáto	14.30	15.09	-0.79	14.34	-0.04
Puruándiro	19.09	17.98	1.11	17.47	1.62
Quirio	17.81	17.54	0.27	17.80	0.01
Quiroga (Santa Fe Quiroga)	16.38	16.84	-0.46	16.67	-0.29
San Miguel del Monte	15.92	15.58	0.34	16.21	-0.29
San Sebastián Queréndaro	16.48	17.93	-1.45	17.50	-1.02
Santa Rita	20.00	18.43	1.57	17.90	2.10
Santiago Undaméo	16.13	16.12	0.01	16.98	-0.85
Teremendo Morelia	16.57	15.86	0.71	16.27	0.30
Zinapécuaro	17.85	17.88	-0.03	17.62	0.23

Por último, los mapas de anomalías obtenidos a partir de la interpolación de residuales, se agregaron a los mapas de regresión mediante algebra de mapas en ILWIS (Attorre *et al.* 2007). Ninyerola y colaboradores (2005), mencionan que existe una mejora sustancial en los resultados, ya que se convierte a un interpolador inexacto (regresión múltiple) en un interpolador exacto, modificando los resultados iniciales del modelo de regresión. Este procedimiento se efectuó para los modelos de regresión elaborados para la precipitación y la temperatura, y sus respectivos mapas de anomalías, para la obtención de los mapas climáticos corregidos (Figuras 3.17 a la 3.20)

Cuadro 3.10. Datos residuales obtenidos para el modelo de regresión simple para el modelamiento de la precipitación (*Modelo cuenca*).

ESTACIÓN	DATO OBSERVADO	PREDICHO	RESIDUAL
Acúitzio del Canje	992.34	921.41	70.93
Álvaro Obregón	646.09	719.14	-73.05
Copándaro de Jiménez	850.10	716.45	133.65
Cuitzeo	682.83	709.25	-26.42
Cuitzillo Grande	647.34	719.14	-71.80
Jesús del Monte	887.90	988.84	-100.94
Morelia (Centro)	788.69	763.19	25.50
Presa Malpaís	728.83	745.21	-16.38
Quirio	725.19	726.33	-1.14
San Miguel del Monte	1040.17	995.13	45.04
Santa Rita	723.87	709.25	14.62

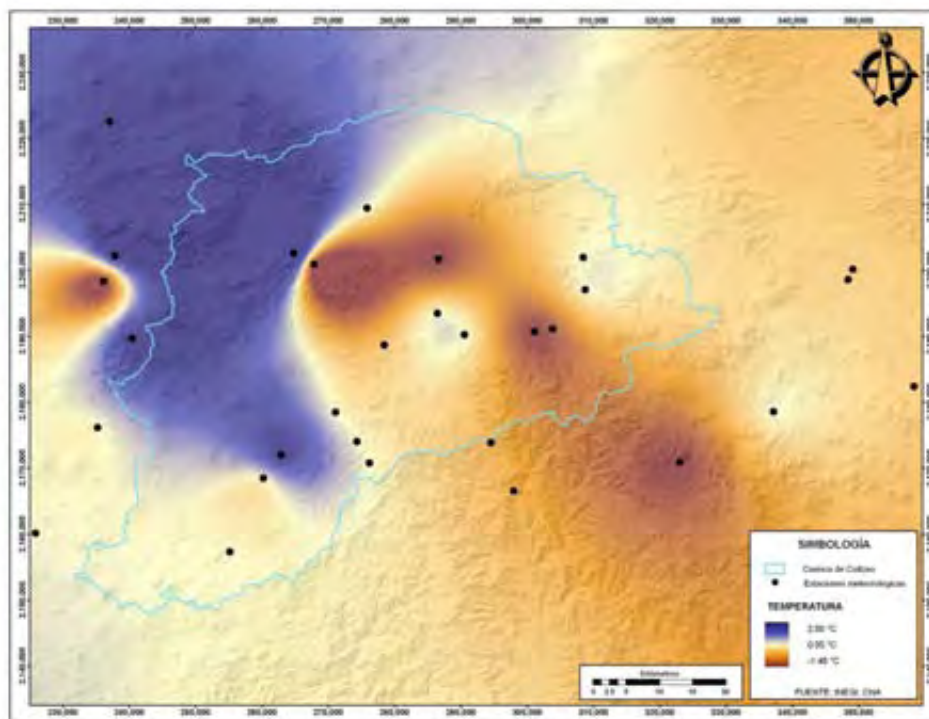


Figura 3.13. Mapa de anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación múltiple de la temperatura.

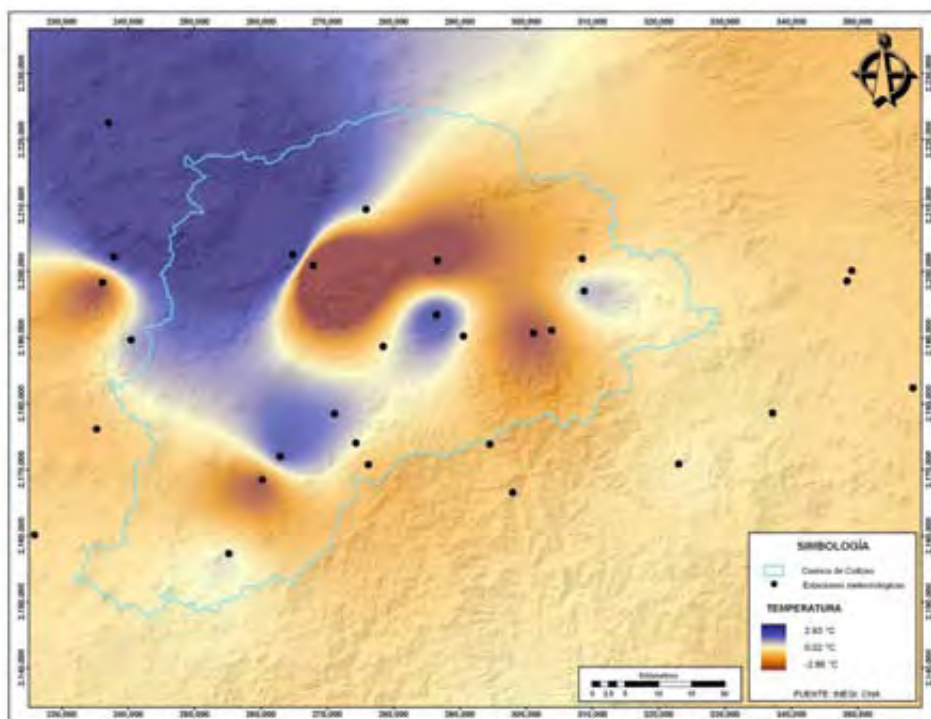


Figura 3.14. Mapa de anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación simple de la temperatura.

Cuadro 3.11. Datos residuales obtenidos para el modelo de regresión simple para el modelamiento de la precipitación (*Modelo buffer 20*).

ESTACIÓN	OBSERVADO	PREDICHO	RESIDUAL
Acúitzio del Canje	992.34	903.72	88.62
Álvaro Obregón	646.09	724.17	-78.08
Carrillo Puerto	698.46	715.40	-16.94
Ciudad Hidalgo	823.04	898.94	-75.90
Coíntzio	810.03	851.06	-41.03
Copándaro de Jiménez	850.10	721.78	128.32
Cuitzeo	682.83	715.40	-32.57
El Puerto San Isidro	825.76	843.08	-17.32
Huaniqueo	887.63	877.39	10.24
Huingo	741.27	731.36	9.91
Morelia (Centro)	788.69	763.28	25.41
Pucúaó	1184.90	1249.26	-64.36
Puruándiro	817.88	780.03	37.85
Quirio	725.19	730.56	-5.37
Quiroga (Santa Fe Quiroga)	827.16	899.73	-72.57
San Miguel del Monte	1040.17	969.16	71.01
San Sebastián Queréndaro	669.23	776.04	-106.81
Santa Rita	723.87	715.40	8.47
Santiago Undaméo	837.77	853.45	-15.68
Zinapécuaro	840.12	757.69	82.43

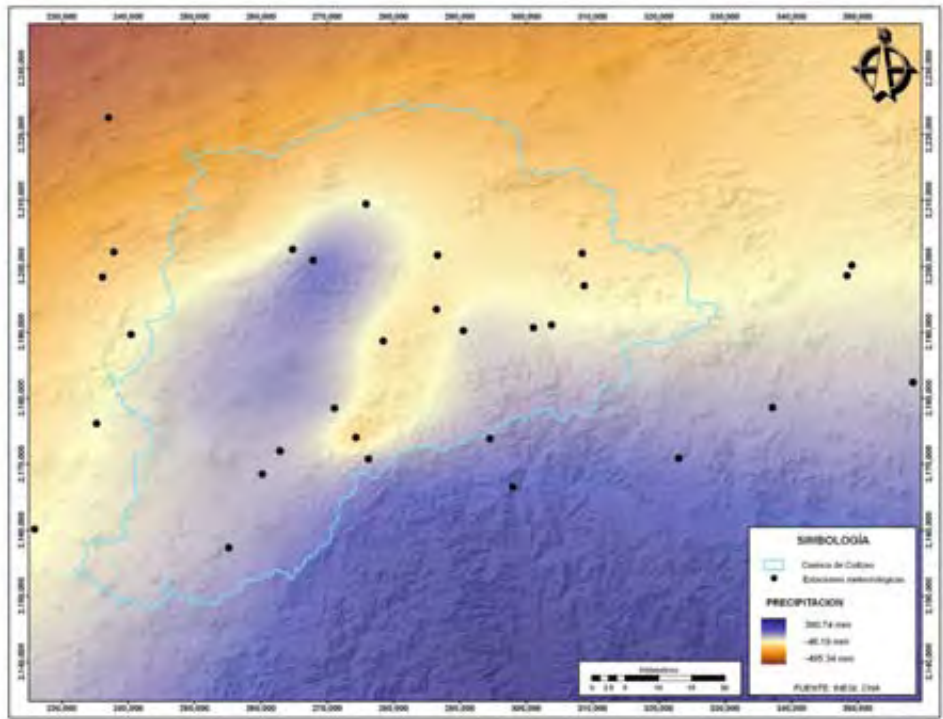


Figura 3.15. Mapa de anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación simple de la precipitación (*Modelo cuenca*).

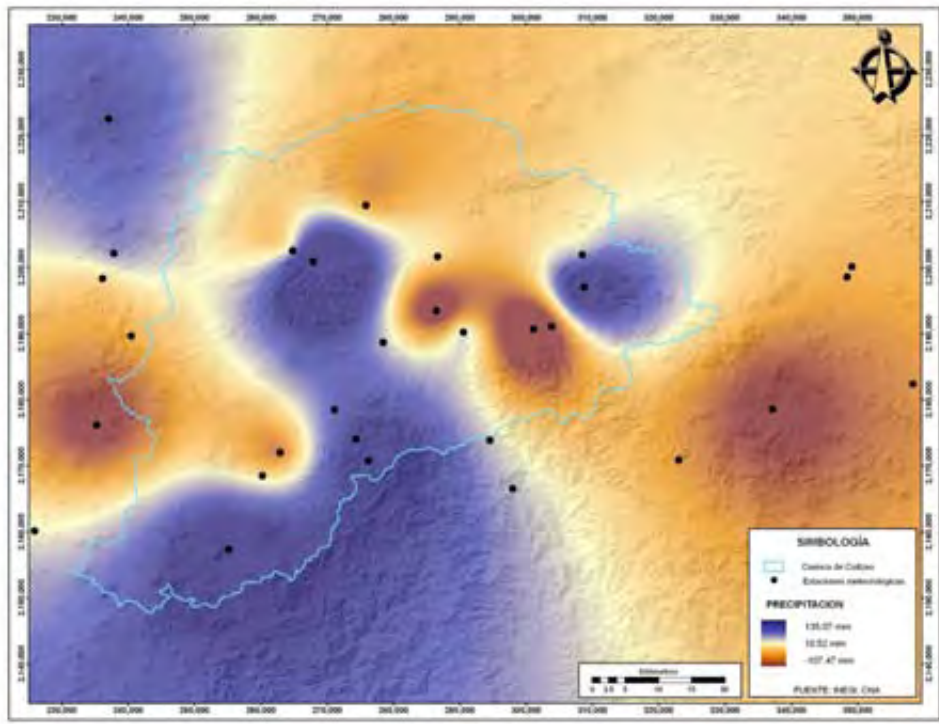


Figura 3.16. Mapa de anomalías, obtenido mediante la interpolación de residuales de la correlación simple de la precipitación (*Modelo buffer 20*).

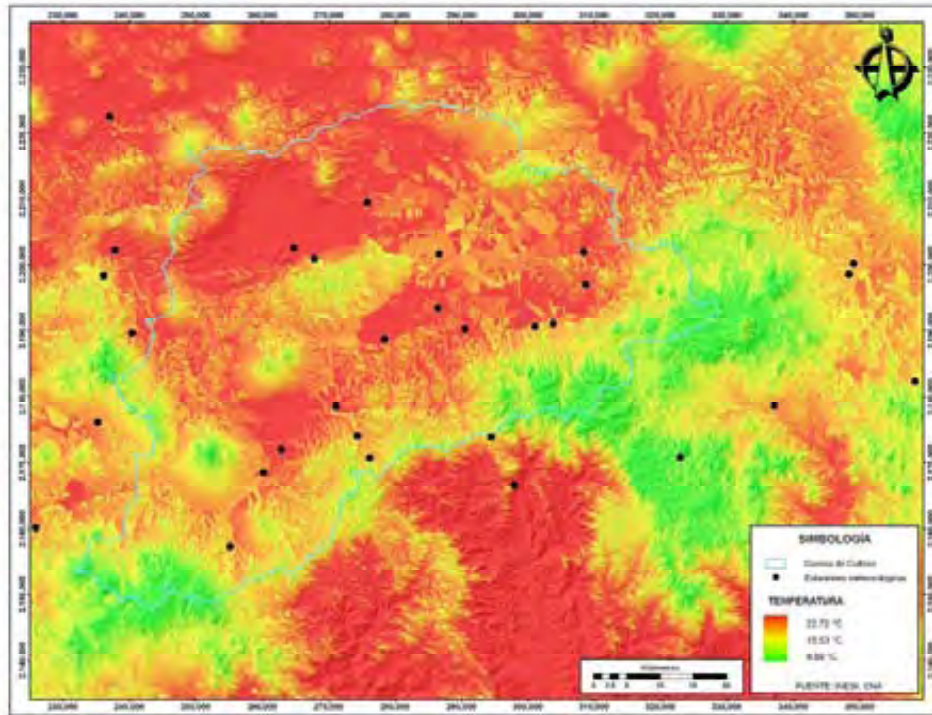


Figura 3.17. Mapa de temperatura media anual corregido, obtenido mediante el análisis de regresión múltiple corregido con residuales con información del *Modelo buffer 20*.

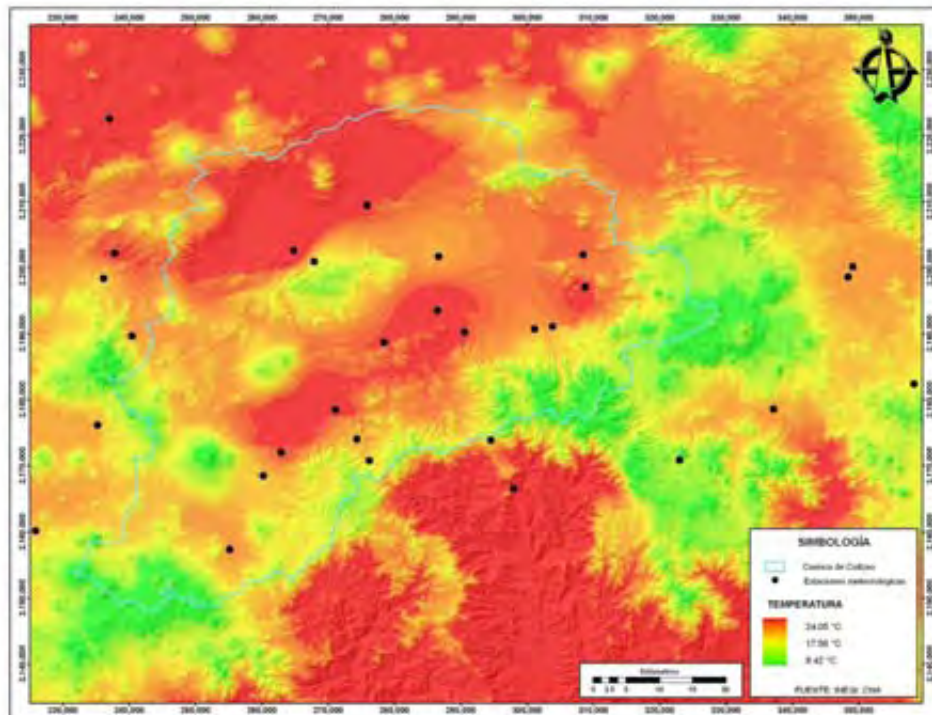


Figura3.18. Mapa de temperatura media anual corregido, obtenido mediante análisis de regresión simple corregido con residuales con información del *Modelo buffer 20*.

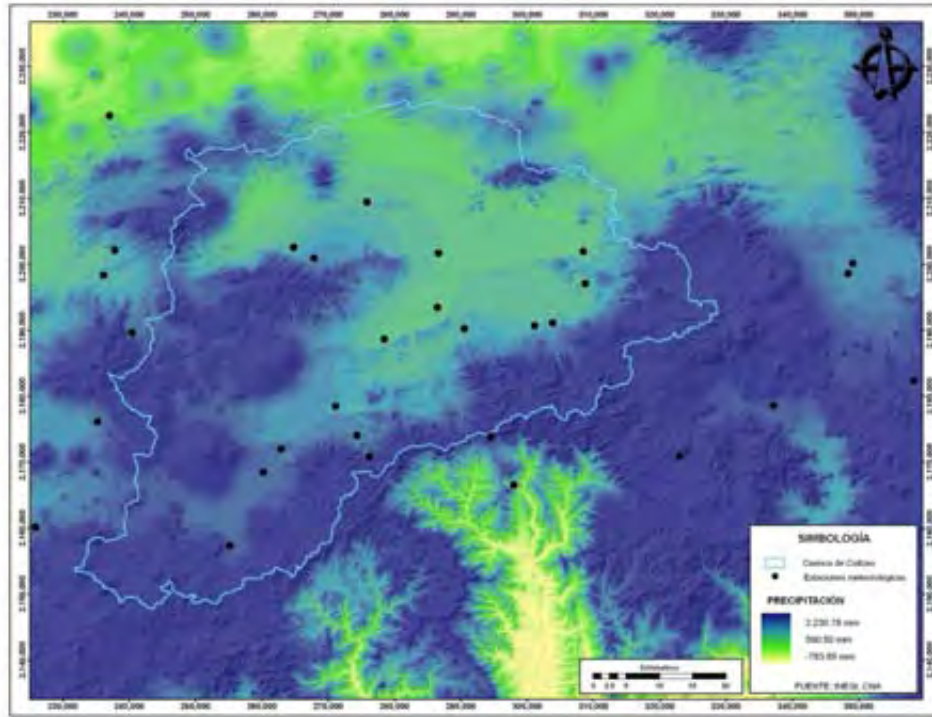


Figura 3.19. Mapa de precipitación anual corregido, obtenido mediante corrección por residuales con información del *Modelo cuenca*.

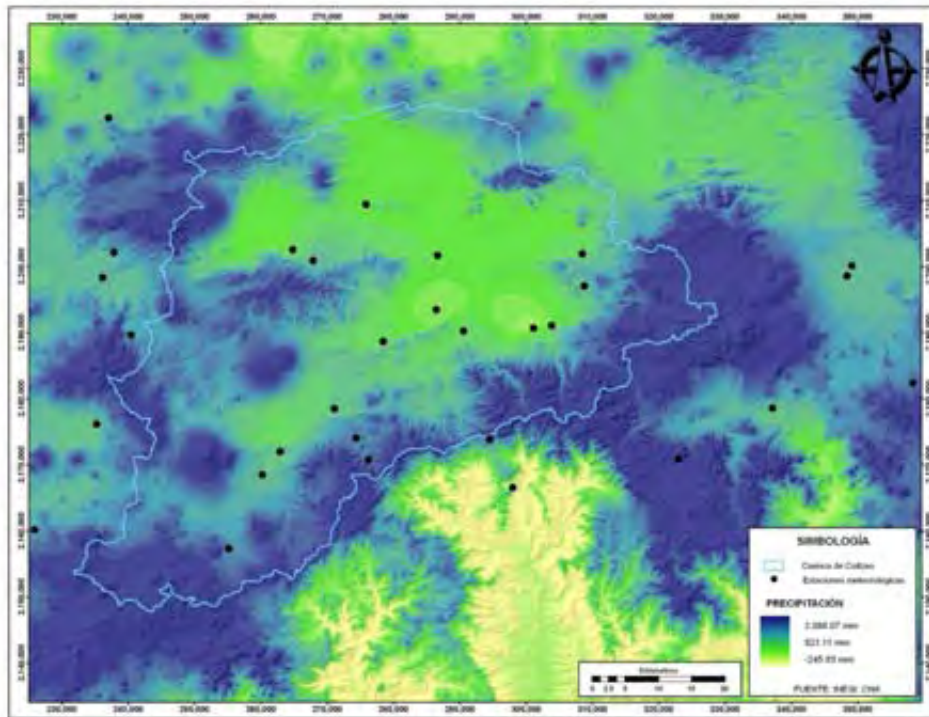


Figura 3.20. Mapa de precipitación anual corregido, obtenido mediante corrección por residuales con información del *Modelo buffer 20*.

3.5.5. Confiabilidad del modelo

Es necesario conocer la confiabilidad de los modelos realizados con la finalidad de determinar si alguno es mejor que otro y comparar el comportamiento de las variables climáticas con respecto a las técnicas de interpolación empleadas.

Los resultados fueron validados mediante métodos estadísticos que indican el grado de concordancia entre los modelos y la realidad. Este proceso consiste en la comparación de los valores predichos por los mapas elaborados vs. los valores de las estaciones climáticas, correspondientes al conjunto de datos que no intervinieron en la calibración del modelo de regresión (30%).

Los resultados han sido expresados a través del coeficiente de determinación (R^2), el cual es el indicador más recomendado para medir la fiabilidad (Vicente-Serrano *et al.* 2003, Ninyerola *et al.* 2005), y que se obtuvo a partir de una regresión de los datos reales y predichos. Este índice es adimensional por lo que permite la comparación de distintos mapas; sin embargo, esto también dificulta tener una idea clara de la exactitud de la predicción. Por lo que también se empleó el RMSE (*Root mean square error*) ya que permite conocer el error en términos de las unidades del mapa (Willmott 1982).

Los coeficientes de determinación (R^2) más altos para la temperatura se obtuvieron en el modelo de regresión simple del *Modelo buffer 20*. Con base en los resultados de confiabilidad, el mapa final de temperatura media de la cuenca de Cuitzeo, fue el mapa de regresión corregido por la adición del mapa de anomalías el cual presentó un valor de $R^2 = 0.73$ y un $RMSE = 0.64$ °C. Para el mapa de regresión simple sin corrección por residuales, se observaron los mismos valores en la prueba de confiabilidad exceptuando por la R^2 , con un valor de 0.72 (Cuadro 3.12). Con base en el mapa obtenido, se presentan temperaturas medias anuales de 14.41 °C para la cuenca, obteniendo una mínima de 9.5 °C para las partes con mayor altitud de la cuenca, y una máxima de 17.95 °C para la zona aledaña al vaso de la cuenca (Anexo 3.5).

Cuadro 3.12. Medidas de exactitud para la validación de la cartografía de la temperatura, mediante la obtención de coeficientes de determinación (R^2) y RMSE.

	REGRESIÓN MÚLTIPLE MODELO BUFFER 20		REGRESIÓN SIMPLE MODELO BUFFER 20	
	MODELO	CORREGIDO	MODELO	CORREGIDO
R^2	0.57	0.47	0.72	0.73
RMSE	0.42	0.44	0.64	0.64
CORR	0.76	0.68	0.85	0.86
PROB F	0.018	0.04	0.003	0.003

En los mapas de precipitación se observaron mejores resultados de confiabilidad para los modelos elaborados con la información *Modelo buffer 20*. El mapa final de precipitación anual fue el obtenido a partir del mapa de regresión sin corrección por residuales, presentando un coeficiente de determinación $R^2 = 0.746$ y un RMSE de 55.51 (Cuadro 3.13.). El valor medio de precipitación para la cuenca, fue de 900 mm, el cual fue calculado con base en estadísticas del SIG, los valores de precipitación máxima son de 1,761.1 mm los cuales se presentan en la zona correspondiente a Los Azufres en el oriente de la cuenca, así como en las principales elevaciones al sur de la misma, en cuanto a los valores mínimos (714 mm) se presentan en las partes cercanas al vaso del lago de Cuitzeo (Anexo3.6).

Cuadro 3.13. Medidas de exactitud para la validación de la cartografía de la precipitación, mediante la obtención de coeficientes de determinación (R^2) y RMSE.

	MODELO CUENCA		MODELO BUFFER 20	
	REGRESIÓN	CORREGIDO	REGRESIÓN	CORREGIDO
R^2	0.34	0.246	0.746	0.6
RMSE	60.46	121.59	55.51	66.18
CORR	0.58	0.496	0.86	0.77
PROB F	0.22	0.316	0.012	0.04

Con base en las pruebas de confiabilidad, los mejores resultados en el modelamiento de las variables climáticas se obtuvieron en los modelos realizados con las estaciones del *Modelo buffer 20*.

No se obtuvieron mejoras significativas en la confiabilidad de los mapas mediante el proceso de corrección por residuales, caso similar al reportado por Vicente- Serrano y colaboradores (2003). Por el contrario, se observó un decremento

en los coeficientes de determinación mediante la aplicación de esta técnica a los modelos de precipitación.

3.6. Conclusiones

El conocimiento de los aspectos meteorológicos, es importante para realizar estudios básicos en diversas disciplinas como la biología, ecología y la agronomía, entre otras. Por lo que la conformación de una base de datos climática estandarizada, es elemental para realizar estudios de las variaciones de la precipitación y temperatura en el espacio y tiempo. Las variables climáticas elegidas para el modelamiento, mediante un análisis de correlación múltiple fueron precipitación, temperatura y oscilación.

Los datos climáticos, en ocasiones pueden ser requeridos para puntos determinados en el espacio o para algún área en específico, para lo cual existe la necesidad de disponer de datos climáticos continuos. Con este objetivo se han desarrollado técnicas de interpolación para el modelamiento de la precipitación y la temperatura, con la finalidad de conocer los datos climáticos en lugares donde no existe información. Sin embargo, para el caso de la cuenca de Cuitzeo, es deseable que se instalen nuevas estaciones meteorológicas que garanticen la continuidad en la toma de datos, así como la calidad de la información, ubicadas con base en estudios previos que tomen en cuenta criterios físicos, orográficos y ecológicos.

Las variables geográficas como la latitud y la longitud no mostraron tener una correlación significativa con la temperatura, la precipitación y la oscilación, por lo que no fueron tomadas en cuenta al realizar un modelo de regresión múltiple. La exposición de ladera, aunque tuvo una correlación significativa con la temperatura no mejoró los resultados de la confiabilidad del modelo.

Los resultados de la regresión simple de las variables climáticas con la altitud, mostraron los coeficientes más altos de determinación (R^2) en las pruebas de confiabilidad. El uso de técnicas de corrección de residuales no proporcionó mejoras significativas en los modelos, de manera contrario a lo esperado los coeficientes de

determinación (R^2) disminuyeron y los *RMSE* aumentaron, exceptuando para el mapa de temperatura de regresión simple.

Con base en estos modelos para la cuenca de Cuitzeo, la variabilidad climática puede ser explicada en un alto porcentaje por la altitud. En el caso de la precipitación el 74% de la variabilidad del modelo esta explicada por la altitud y para la temperatura en un 73%. Las proporciones no explicadas están relacionadas con factores extrínsecos al modelo o pueden ser parte del error del modelo mismo. El análisis estadístico del mapa de temperatura mostró una media anual de 14.41 °C, mientras que los cálculos de precipitación anual son de 900 mm.

Con base en el análisis de confiabilidad, ambos modelos tienen coeficientes de determinación aceptables ($\text{Prob}>F= 0.05$); sin embargo, los modelos podrían mejorarse de contar con una mayor cantidad de estaciones al interior de la cuenca, ya que la cantidad y calidad de los datos es una variable que afecta los resultados de un modelamiento.

Los mapas climáticos finales, son de importancia para modelar la vegetación, ya que el clima es un factor fundamental que junto con otras variables como la altitud, suelos, pendientes, exposición, entre otros, determinan la distribución de las comunidades vegetales y sus especies.

3.7. Literatura citada

Attorre F., Alfo, M., De Sanctis, M., Francesconi F. y Bruno, F. 2007. Comparison of interpolation methods for mapping climatic and bioclimatic variables at regional scale *Int. J. Climatol.* 27: 1825–1843.

Bennartz, D. y B. Michelson. 2003. Correlation of precipitation estimates from spaceborne passive microwave sensors and weather radar imagery for BALTEX PIDCAP. *Int. J. Remote Sensing.* Vol. 24, No. 4, 723- 739.

Borrough, P.A. y R.A. McDonnell. 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University Press, Oxford.

- Diodato, N.** 2005. The influence of topographic variables on the spatial variability of precipitation over small regions of complex terrain. *International Journal of Climatology* 25: 351–363.
- Felicísimo P. , A. M.** 2001. Elaboración del Atlas climático de Extremadura mediante un sistema de información geográfica. *GeoFocus*, nº 1, p. 17-23.
- Finch, J.M., Samways, M.J., Hill, T.R., Piper, S.E. y Taylor, S.** 2005. Application of predictive distribution modeling to invertebrates: Odonata in South Africa. *Biodiversity and Conservation* (2005) 00:1–13.
- García, E.** 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köepen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Libros. Num. 6. 90 pp.
- Hartkamp, A.D., K. De Beurs, A. Stein, y J.W. White.** 1999. Interpolation Techniques for Climate Variables. NRG-GIS Series 99-01. Mexico, D.F. CIMMYT.
- Hutchinson, M.F.** 1995. Interpolating mean rainfall using thin plate smoothing splines. *Int J Geogr Inf Syst* 9:385–403.
- Johnson, E. D.** 2000. Métodos Multivariados Aplicados al Análisis de Datos. International Thomson Publishing. México.
- Krige, D.G.** 1966. Two-dimensional weighted moving average trend surfaces for ore-valuation, in Proc. Symposium on Mathematical Statistics and Computer Applications in Ore Valuation: Journ. South African Inst. Mining and Metallurgy, Johannesburg, Mar. 7-8, pp. 13-38.
- Marquínez J., Lastra J. y García P.** 2003, Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology* 270. 1–11.
- Mendoza C., M.E.** 2002. Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Tesis de Doctorado. Instituto de geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 188 pp.
- Ninyerola M., Pons, X.y Roure, J.M.** 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- Oliver, M.A. y R., Webster.** 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *Int J. Geogr. Inform. Syst.* 4 (3), 313–332.
- Rossiter, D.G.** 2006. Preparation for MSc Thesis Research. International Institute for Geo-information Science and Earth Observation (ITC). Enschede, NL. 124 pp.
- Spellman, G.** 2000. The use of an index-based regression model for precipitation analysis on the Iberian peninsula. *Theor, Appl. Climatol.* 66, 229- 239.

- Touazi, M., Pierre L.,J. y Bhiry, N.** 2004. Modelling rainfall-discharge at a mean inter-yearly scale in northern Algeria. *Journal of Hydrology* 296 (2004) 179–191 .
- Vicente Serrano, S.M., Saz, M.A. y Cuadrat, J.M.** 2003. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research* 24: 161-180.
- Williams, P. H., Margules, .C R. y Hilbert, D.W.** 2002. Data requirements and data sources for biodiversity priority area selection; *J. Biosci. (Suppl. 2)* 27 327–338.
- Willmott C., J.** 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bull Am Meteorol Soc* 63:1309–1313.
- Xu, C.Y., y V.P. Singh.** 2001. Evaluation and generalization of temperature-based methods for calculating evaporation. *Hydrol. Process.* 15, 305–319.
- Yang, X.** 2004. Modelling the Spatial Distribution of *Tricholoma matsuta*. Tesis de Maestría. *Geo-information Science and Earth Observation (Environmental Systems Analyses and Management)*. 43 pp.

CAPITULO 4

Caracterización de las localidades de *Pinus martinezii* Larsen en la Cuenca de Cuitzeo

4.1. Antecedentes

Los bosques templados albergan a dos de los géneros económicamente más importantes, los pinos (*Pinus* spp.) y los encinos (*Quercus* spp.); las principales áreas de distribución de estos géneros en México, ocurren principalmente en las cadenas montañosas, formando bosques puros o mixtos. Estos ecosistemas ocupan el segundo lugar en extensión en el país con 32,850,691 Ha (16.92%) según el análisis realizado en el Inventario Forestal Nacional (2000). Desde el punto de vista forestal la mayoría de las especies de *Pinus* son relevantes porque además de contribuir al mantenimiento de las condiciones climáticas locales y globales, también juegan un papel trascendental para el desarrollo de las actividades productivas (Madrigal-Sánchez 1997).

El género *Pinus* es el más ampliamente distribuido de la Familia Pinaceae y está constituido por unas 90 a 120 especies; que se localizan esencialmente en el hemisferio norte, en México se pueden encontrar desde el nivel del mar como *P. caribaea* en el Estado de Quintana Roo, hasta alrededor de los 4,500 msnm como *P. hartwegii* (Farjon y Styles 1997, Styles 1998).

Los pinos alcanzan generalmente alturas de entre 8 y 25 m, sin embargo, dependiendo de las condiciones climáticas y de las especies que componen las comunidades vegetales en las que se desarrollan, pueden alcanzar alturas de hasta 40 m (Challenger 1998).

México es considerado por muchos autores como un centro de diversidad que ha favorecido procesos de hibridación, radiación adaptativa y especiación, originando una gran cantidad de endemismos. Existen dos regiones al interior de la República

consideradas como centros de diversidad que han dado lugar a procesos evolutivos en los pinos: el noreste de México y el Sistema Volcánico Transversal. En este último se encuentra la mayor diversidad de pinos, principalmente distribuidos en montañas y lomeríos y es considerada como una zona de importancia en la historia evolutiva del género, ya que conecta la Sierra Madre Occidental con la Sierra Madre Oriental. Algunos especialistas calculan que el país cuenta con el 45% de las especies de pinos conocidos en el mundo (Russell 1909, Farjon y Styles 1997, Styles 1998).

A nivel nacional, Michoacán ocupa el tercer lugar en producción forestal, con un estimado de un millón de metros cúbicos anuales en el periodo (1995 - 2000), de los cuales el 79.5% de los productos son obtenidos a partir de madera proveniente de pinos (Acevedo- Herrera *et al.* 2001).

En Michoacán se han registrado 16 especies de pinos (sin incluir los que han sido introducidos), con base en colectas del herbario de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Rodríguez y Carrillo 2005), dos de ellas se encuentran listadas en la Norma Oficial Mexicana-059-2001 en el estatus **Pr** “sujetas a protección especial”, *Pinus rzedowskii* (pinabete o pino de Coalcomán) y *Pinus martinezii* (pino coyote), los cuales son altamente valorados en la industria forestal por las características de su madera (Madrigal- Sánchez y Guridi- Gómez 2005).

4.1.1. Taxonomía de *Pinus martinezii*

El género *Pinus* fue establecido por primera vez en (1753, 1754) por Lineo, y estaba constituido por 10 especies; sin embargo solo cinco de ellas pertenecían a este género como se conoce hoy en día, ya que los demás se acomodan actualmente dentro de los géneros *Abies*, *Cedrus*, *Larix* y *Picea* (Farjon y Styles 1997).

La subdivisión de este género en grupos naturales ha sido difícil y sigue siendo motivo de diferentes discusiones que han dado lugar a numerosas propuestas de clasificación (Farjon y Styles 1997, Styles 1998). De tal forma que de las clasificaciones existentes, la propuesta por Little y Critchfield (1969) es la que goza de una mayor aceptación. Ésta, toma en cuenta las diferencias morfológicas entre las

especies y el entrecruzamiento e hibridación; sin embargo según Styles (1998), hay aspectos de la clasificación que son poco prácticos. *Pinus martinezii*, es considerado dentro del Subgrupo Diploxylon (pinos duros), de acuerdo a la clasificación de Koehne (1893).

De acuerdo con la clasificación propuesta por Cronquist (1977) para las Gimnospermas, *Pinus martinezii* Larsen se ubica de la siguiente manera:

Reino: Vegetal

Subreino: Embryobionta

División: Pinophyta

Subdivisión: Pinicae

Clase: Pinopsida

Orden: Pinales

Familia: Pinaceae

Género: *Pinus*

Especie *Pinus martinezii*

4.1.2. Descripción morfológica

P. martinezii, es considerado por Madrigal- Sánchez (1982), como parte del grupo de los pinos michoacanos, se caracteriza por tener una altura media de 20 m, aunque puede alcanzar los 40 m, el tronco es recto y monopódico, las medidas normales del diámetro a la altura del pecho (DAP) van de 60 a 130 cm, sin embargo algunos individuos que fueron medidos pueden alcanzar más de 300 cm. La madera es dura, pesada y resinosa, de color blanco amarillento. La corteza es café oscura, rugosa y escamosa, irregular, con fisuras superficiales (Figura 4.1); en árboles jóvenes el tronco es café rojizo y puede presentarse como rugoso o escamozo liso.

La copa de los árboles en los individuos adultos es redonda y compacta, con las primeras ramas horizontales y un poco inclinadas, las ramas superiores algo ascendentes, y con forma cónica en los jóvenes (García y González 2003, Farjon y Styles 1997). Fascículos con 5 a 7 hojas, siendo más común encontrarlos en grupos

de 6; hojas de 10 a 30 cm de largo de 0.6 a 1 mm de ancho, flexibles, erectas o algo colgantes, con la superficie dorsal de color verde oscuro y la ventral verde claro, con cierto matiz azul grisáceo, márgenes finamente aserrados (Silva 2005).



Figura 4.1. Individuo de *Pinus martinezii* Larsen.

Conos ligeramente curvados, ovoides, de 6 a 10 cm de largo, de color café rojizo, en grupos de 2 a 3, a veces solitarios, semipersistentes por varios meses sobre pedúnculos cortos y firmes de 5 a 10 mm de largo, de apariencia sésil; las escamas del cono son tiesas, con ápice redondeado o subagudo, apófisis levantada, subpiramidal, el umbo dorsal levantado con una espina corta aguda a veces recurvada, decidua o persistente (Figura 4.2). Las semillas son pequeñas de color gris de 5 a 7 mm de largo, con ala de color amarillento (García y González 1998).

La especie *Pinus martinezii* Larsen, es considerada por Farjon y Styles (1997) como sinónimo de *P. duranguensis* Martínez, sin embargo en el presente trabajo se ha reconocido conforme a la clasificación de Larsen (1964).



Figura 4.2. Cono de *Pinus martinezii* Larsen.

4.1.3. Distribución de las poblaciones de *Pinus martinezii*

Las poblaciones de *P. martinezii* han sido reportadas por Larsen (1964) para Michoacán y Jalisco. El rango altitudinal es de 1,400 - 2,800 metros; el clima en el cual se desarrolla, es de templado a templado cálido y la precipitación puede variar de 100- 1,200 mm, con lluvias en verano. Esta especie puede crecer sobre suelos superficiales, pero se desarrolla mejor en suelos profundos, lo que le permite competir exitosamente con otros individuos del mismo género. La mayoría de los suelos en donde se ubican las poblaciones de este pino provienen de rocas volcánicas (Farjon y Styles 1997).

En Michoacán, se tienen registradas 31 poblaciones de *P. martinezii* en la provincia del Eje Volcánico Transversal. Las poblaciones se encuentran próximas al parteaguas que divide a dos importantes regiones hidrológicas en el Estado; 15 localidades se encuentran en la zona del Río Balsas, 10 en la del Río Lerma- Chapala y 6 compartiendo ambas regiones.

Las poblaciones de *P. martinezii* han sido registradas para los Municipios de Paracho, Morelia, Madero, Charo, Indaparapeo, Tzitzio, Queréndaro, Hidalgo, Zinapécuaro y Zitácuaro, las cuales se presentan formando agregados o manchones

de forma irregular. Las localidades más importantes en cuanto a superficie son la de Agua Zarca, localizada al sur de la ciudad de Morelia, Nueva Victoria ubicada en la Sierra de Mil Cumbres y las poblaciones de la Sierra de San Andrés en los Azufres (Figura 4.4) (Silva 2005).

La mayoría de las poblaciones de *P. martinezii* en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, se encuentran en bosques mixtos, conformando asociaciones con *Quercus crassifolia*, *Q. scytophylla*, *Q. laurina*, *Q. obtusata*, *Q. magnoliifolia*, *P. teocote*, *P. devoniana* y *P. pringlei* y en menor proporción en bosques de pino con *Pinus teocote* (Silva 2005).

Se tienen registros actualmente de 31 poblaciones de *P. martinezii* en Michoacán, localizadas en los municipios de Morelia, Parácho, Madero, Charo, Tzitzio, Hidalgo, Queréndaro, Indaparapeo, Zinapécuaro y Zitácuaro, las cuales se encuentran en zonas próximas al parteaguas que divide la zona del Río Balsas y el Río Lerma. Al interior de la cuenca de Cuitzeo seis localidades con poblaciones significativas (Silva 2005), la mayoría de éstas bajo una fuerte presión por las actividades de extracción clandestina de madera.

No obstante la importancia ecológica y comercial de *Pinus martinezii*, el gobierno de Michoacán por medio de la Comisión Forestal, no realiza acciones de propagación y colecta de semilla (COFOM 2005). Lo anterior probablemente se deba a la falta de información sobre la distribución, importancia ecológica y situación de esta especie.

Debido a la falta de información de la distribución e importancia ecológica, de las poblaciones de *Pinus martinezii*, con el presente estudio se espera cumplir los objetivos descritos a continuación:

4.2. Objetivo

- Obtener un índice de valor de importancia relativa generado a partir de datos fisonómicos y estructurales, que permita caracterizar y comparar el grado de conservación de las distintas localidades de *P. martinezii* de la cuenca de Cuitzeo.

4.3. Hipótesis

1. El Índice de valor de importancia relativa basado en parámetros fisonómicos y estructurales de los árboles, permite obtener un parámetro cuantitativo para comparar del grado de conservación entre distintas poblaciones de *P. martinezii* en la cuenca de Cuitzeo.

4.4. Materiales y métodos

4.4.1. Localidades de muestreo

El muestreo se realizó en las principales localidades con *Pinus martinezii* en la Cuenca de Cuitzeo, las cuales fueron definidas con base en el trabajo realizado por Silva (2005) y a la consulta con expertos del herbario de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (X. Madrigal y M. Silva *com pers.*). A partir de las cuales se delimitaron las poblaciones y se determinaron las principales rutas de acceso, para lo cual se elaboró un mapa base de la cuenca escala 1:120,000 el cual fue utilizado para el trabajo de campo.

Se identificaron doce localidades de *P. martinezii* en la cuenca, sin embargo seis de ellas poseen poblaciones poco significativas debido a que son menores de 22.5 Ha ($3 \times 3 \text{ km}^2$), ya que es la unidad mínima cartografiada considerada para el presente trabajo, por lo que no fueron incluidas en los muestreos (Cuadro 4.1).

Una vez determinados los sitios y el método de muestreo, se realizaron exploraciones preliminares a las localidades de La Joya, Ejido Atécuaro y Cerro Mozo, para detallar el formato de captura de información en campo (Anexo 4.1).

Cuadro 4.1. Localidades de *Pinus martinezii* en la Cuenca de Cuitzeo según Silva (2005).

LOCALIDAD	MUNICIPIO	COORDENADAS UTM		SUPERFICIE (Ha)
		X	Y	
El Zarate	Morelia	278016	2170564	<i>n/s</i>
Ejido Atécuaro	Morelia	269412	2163714	<i>n/s</i>
El Laurelito	Morelia	279193	2172669	<i>n/s</i>
Agua Zarca	Morelia	278045	2168542	545
La Joya	Morelia	267663	2156920	37
Ejido Irapeo	Charo	284392	2172954	<i>n/s</i>
Temascal	Charo	295914	2175611	46
Cañada de Otzumatlán	Queréndaro	304707	2182694	<i>n/s</i>
Milpillas	Queréndaro	303663	2181035	<i>n/s</i>
Nueva Victoria	Queréndaro	314618	2185456	912
Cerro Mozo	Zinapécuaro	318797	2196110	45
Laguna Verde	Zinapécuaro	328294	2194192	45

n/s. Poblaciones consideradas no significativas, debido a su tamaño.

4.4.2. Registro de información en campo

Los sitios de muestreo fueron ubicados utilizando el método de muestreo preferencial llamado comúnmente representativo, basado en suposiciones *a priori* acerca de las propiedades de la vegetación, reuniendo un número variable de unidades muestrales para cada localidad que posteriormente son promediados. Este modelo de muestreo es utilizado cuando el investigador requiere cubrir una variación ambiental compleja, tomando las muestras cuando se presentan condiciones de ambientes distintos (Matteucci y Colma 1982). Este método fue utilizado debido a que fue necesario que los datos representaran la mayor variación ambiental posible para la elaboración del modelo de distribución potencial; por lo anterior, el número de sitios a muestrear y la ubicación de los mismos fueron fijados en campo, tomando en cuenta como factores determinantes el tamaño de la población y las variaciones ambientales presentes en la zona.

En cada sitio de muestreo se marcaron círculos de 1,000m² (0.1 Ha) con un diámetro de 35.6 metros, dirigidos hacia los puntos cardinales y divididos en sectores numerados en sentido de las manecillas del reloj (Figura 4.3). Este tipo de cuadrante es comúnmente utilizado en los trabajos con fines forestales llevados a cabo en México (Madrigal- Sánchez 1994, Robles 2006), también utilizado por Silva (2005)

para evaluar las comunidades de *Pinus martinezii* en Michoacán. En el centro de cada cuadrante se obtuvo la coordenada UTM para generar una base de datos georeferenciada de las poblaciones muestreadas y facilitar su manejo en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la elaboración de un modelo de distribución potencial (Kearney y Porter 2004).

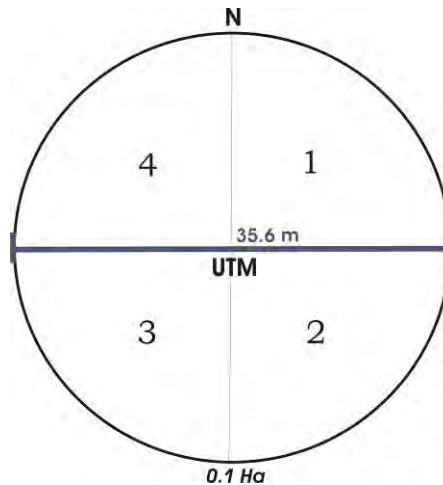


Figura 4.3. Cuadrante utilizado para el levantamiento de información ecológica en campo.

Para el levantamiento de la información ecológica se consideraron parámetros de tipo cuantitativo, que comprenden aspectos fisonómicos y estructurales y que no requieren de la identificación de especies (Chapman 1976). En general la fisonomía se refiere a la apariencia de la vegetación, su altura, color, el tamaño y forma de las hojas entre otros; es por esto que este tipo de métodos son considerados más adecuados en estudios a pequeña escala en los que se requiere la descripción del hábitat.

Los parámetros fisonómicos registrados en campo para la caracterización de las poblaciones de *P. martinezii* fueron:

- Número de individuos o densidad (abundancia)
- Cobertura de las copas de los árboles
- Altura de los individuos
- Diámetro a la altura del pecho (DAP)

4.4.2.1. Número de individuos o densidad (abundancia)

La densidad es definida como el número de individuos de una especie por unidad de área. Esta medida es independiente del tamaño de la unidad de muestreo y se dice que es “absoluta” (Chapman 1976).

1)

$$D_i = \frac{n_i}{A}$$

Donde D_i es la densidad de la especie i , n_i es el número total de individuos de la especie i y A es una superficie determinada.

4.4.2.2. Cobertura de las copas de los árboles

La cobertura es definida como la proporción del campo ocupada por una proyección perpendicular de las partes aéreas de individuos de la especie en consideración y es comúnmente expresada en porcentaje; es también una medida absoluta y puede ser registrada por estimación visual (Chapman 1976). En campo se registró la cobertura de las copas de los individuos que estaban al interior del cuadrante y posteriormente fue calculada con base en la siguiente fórmula:

2)

$$C_i = \frac{a_i}{A}$$

Donde C_i es la cobertura de los árboles, a_i es la superficie total de proyección de la parte aérea de la especie i , y A es el área muestreada.

4.4.2.3. Altura de los individuos

Existen diferentes métodos para obtener las alturas de los árboles, en el caso de los árboles pequeños las alturas pueden medirse con estacas graduadas. Generalmente se utilizan instrumentos llamados clinómetros, que se basan en principios trigonométricos. En el presente trabajo se determinó la altura (m) de los individuos mediante el uso de un clinómetro (Carranza 1987).

4.4.2.4. Diámetro a la altura del pecho (DAP)

La altura del pecho es de 1.3 m por encima del nivel promedio del terreno del lado cuesta arriba del árbol. El instrumento utilizado para medir los diámetros de los árboles, fue la cinta diamétrica. Con frecuencia los diámetros de los árboles se utilizan para determinar el área basal del árbol (Young 1991).

Con base en los parámetros registrados en campo, fueron calculados los datos de frecuencia, área basal y volumen de madera, los cuales constituyen información importante para describir en términos fisonómicos a cada población.

4.4.2.5. Frecuencia

La frecuencia se calculó tomando en cuenta el número de sectores dentro de cada sitio de muestreo en los cuales aparecieron individuos de *Pinus martinezii*, y el número total de sectores de la unidad muestral (Robles 2006).

3)

$$f_i = \frac{j_i}{k}$$

Donde f_i es la frecuencia de la especie, J_i es el número de sectores donde aparece la especie y k es el número total de sectores pertenecientes a los sitios de muestreo de la localidad.

4.4.2.6. Cálculo del Área Basal

El área basal, es el área en metros cuadrados del corte transversal de un árbol a la altura del pecho (Young 1991). El área basal por hectárea es la suma total de las áreas basales individuales de cada árbol, que es utilizada a menudo para medir la densidad del rodal. Este cálculo se obtiene a partir de la fórmula para el área de un círculo en metros cuadrados, y se expresa de la siguiente manera:

4)

$$AB = \pi r^2$$

Donde π (3.1416) y r es el radio del árbol tomado del DAP

4.4.2.7. Cálculo de Volumen de madera

El volumen de madera se estimó mediante la aplicación de tablas desarrolladas para el Inventario Forestal Estatal (1995) de Michoacán. Cabe señalar que no se han elaborado cuadros de volumen para *Pinus martinezii*, por lo que para el presente trabajo se realizó la estimación con base en cuadros que consideran a grupos de pinos para las distintas regiones del Estado. Las localidades de *P. martinezii* registradas en el presente trabajo, corresponden a las regiones Centro y Oriente (Anexo 4.2).

La obtención del volumen de madera se realizó con base en las tablas de volumen de fuste total y volumen total de las ramas (Anexo 4.2). Los aspectos considerados para realizar el cálculo son la región a la que pertenece la localidad muestreada, los datos de DAP y altura registrados para cada individuo; posteriormente se realiza la sumatoria del volumen del fuste total y del volumen de ramas para obtener el dato individual. El volumen total por hectárea en cada localidad es estimado con base en la siguiente relación:

$$5) \quad V_{tHa} = \frac{\sum V_i}{A_m}$$

En donde V_{tHa} es el volumen total por hectárea estimado para cada localidad, V_i es el volumen de madera por individuo obtenido de las tablas y A_m es el área muestreada expresada en hectáreas.

4.4.2.8. Cálculo del Valor de Importancia Relativa

El Valor de Importancia relativa (*VIR*) es considerado un parámetro adimensional (Teixeira y Sánchez 2006), que ha sido utilizado para evaluar y comparar la importancia de las especies. Según Whittaker (1972) se han empleado distintos parámetros para el cálculo de este índice, entre los que se encuentran la biomasa, la cobertura, el área basal, la densidad y la frecuencia. Para el cálculo del *VIR* se tomaron en cuenta en proporciones relativas (%), la densidad (D_r), la frecuencia (F_r) y el área basal o dominancia (A_{Br}), el VI puede ser expresado como porcentaje de

importancia al dividir entre 3 la sumatoria de estos tres parámetros (Curtis 1959, Matteucci y Colma 1982), como se muestra en la siguiente fórmula:

6)

$$VI = \frac{Dr + Fr + ABr}{3}$$

El valor de importancia como se menciono anteriormente, es utilizado para comparar la importancia de las especies en una población; sin embargo el objeto de análisis en el presente trabajo son las poblaciones por lo que este índice fue aplicado para establecer un parámetro de comparación entre estas, basado en la densidad, la frecuencia y el área basal de los individuos.

4.5. Resultados y Discusión

4.5.1. Localidades muestreadas

Los muestreos fueron realizados en las localidades con presencia de población significativa de *Pinus martinezii* de acuerdo a los criterios de Silva (2005), las cuales se encuentran distribuidas en la porción Sur de la Cuenca en el Dominio del Complejo Volcánico Interior en la zona correspondiente a la Sierra de Mil Cumbres (Figura 4.4). En total se visitaron seis localidades y se levantaron 18 sitios de muestreo correspondientes a los municipios de Morelia, Queréndaro, Charo y Zinapécuaro (Cuadro 4.2), registrando dicha información en los formatos de campo para la elaboración de una base de datos georeferenciada y de esta manera realizar una sistematización y análisis de los datos.

4.5.2. Descripción y análisis de los parámetros fisonómicos y el valor de importancia de las localidades de *Pinus martinezii*

Se efectuó la medición y el registro de las medidas de un total de 247 árboles, a partir de los cuales se realizaron los cálculos de los parámetros fisonómicos por individuo (Anexo 4.3), para establecer una comparación de las poblaciones muestreadas en la cuenca a partir del análisis de los datos (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.2. Sitios de muestreo de las localidades de *P. martinezii* en la cuenca de Cuitzeo.

LOCALIDAD	INDIVIDUOS	SITIO	COORDENADAS UTM		MUNICIPIO
			X	Y	
El Temascal	13	1	294300	2174331	Charo
		2	294471	2174448	
		3	294569	2174565	
La Joya	4	1	267663	2156692	Morelia
Agua Zarca	95	1	277188	2168608	
		2	277152	2167805	
		3	277205	2168061	
		4	278267	2169307	
		5	278579	2169262	
Cerro Mozo	14	1	318201	2195886	Zinapécuaro
		2	318231	2195672	
Laguna Verde	11	1	328424	2194098	
		2	328385	2194222	
		3	328294	2194192	
Nueva Victoria	105	1	315468	2185118	Queréndaro
		2	315448	2185544	
		3	314553	2185912	
		4	314622	2184835	

Cuadro 4.3. Estimación de parámetros fisonómicos por localidad de *Pinus martinezii*.

LOCALIDAD	DAP (cm)	ALTURA (m)	AREA BASAL (m ² /Ha)	VOLUMEN (m ³ /Ha)	COBERTURA (Ha)	DENSIDAD (Ind/Ha)	FRECUENCIA
Nueva Victoria	24.82	18.25	6.79	182.77	0.03	262.50	0.94
Agua Zarca	33.70	16.47	9.71	178.96	0.59	190.00	0.90
El Temascal	56.66	23.15	3.42	121.45	0.24	43.33	0.75
Cerro Mozo	27.47	12.86	0.95	31.49	0.15	70.00	0.63
Laguna verde	51.68	25.18	2.76	109.39	0.09	36.67	0.42
La Joya	47.19	31.75	0.72	93.97	0.14	40.00	0.50

Estimaciones por hectárea: *DAP*= Diámetro a la altura del pecho promedio (cm); *ALTURA*= Altura promedio de los individuos (m); *AREA BASAL*= área basal por hectárea (m²); *VOLUMEN*= Volumen de madera por hectárea (m³); *COBERTURA*= Cobertura promedio de copa por hectárea (Ha); *DENSIDAD*= Densidad promedio de individuos por hectárea; *FRECUENCIA*= Frecuencia en los cuadrantes de muestreo.

Se obtuvo el Índice de Valor de Importancia Relativa (VIR), como dato estimativo de las condiciones ecológicas de las poblaciones de *P. martinezii*, mediante el cual la localidad de Nueva Victoria presentó el valor más alto (30.48), seguido por Agua Zarca (30.40) y en última instancia La Joya (7.09). Los valores obtenidos

mediante el cálculo de este índice, reflejan las condiciones observadas en los recorridos de campo, siendo las localidades de Nueva Victoria y Agua Zarca las que muestran mayor grado de conservación, mientras que la población localizada en La Joya presentó disturbios por extracción de madera (Cuadro 4.4).

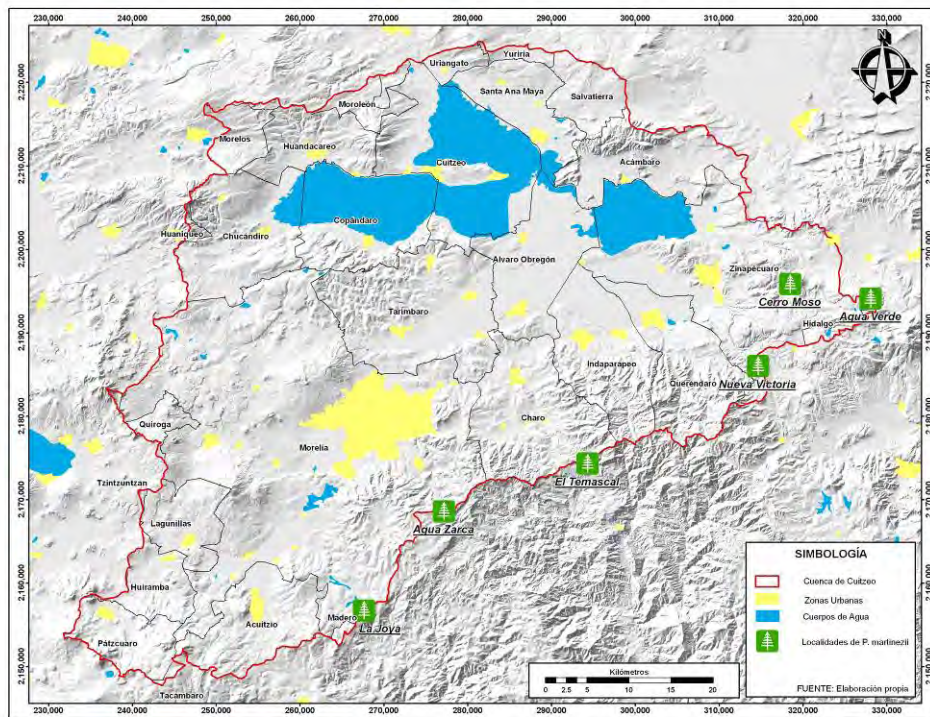


Figura 4.4. Distribución de las poblaciones de *Pinus martinezii* en la cuenca de Cuitzeo.

Cuadro 4.4. Índice de Valor de Importancia Relativa por localidad.

LOCALIDAD	ÁREA BASAL RELATIVA	DENSIDAD RELATIVA	FRECUENCIA RELATIVA	VALOR DE IMPORTANCIA RELATIVA
Nueva Victoria	27.89	40.86	22.71	30.48
Agua Zarca	39.88	29.57	21.74	30.40
Temascal	14.05	6.74	18.12	12.97
Cerro Mozo	3.90	10.89	15.22	10.00
Laguna verde	11.33	5.71	10.14	9.06
La Joya	2.96	6.23	12.08	7.09

4.5.3. Condiciones generales de las localidades de *Pinus martinezii*

Nueva Victoria. La población se localiza al Este de la cuenca conformando un bosque de pino-encino en asociación con *Pinus teocote*, *Quercus crassifolia* y *Arbutus*

glandulosa (Silva 2005), en pendientes ligeras que van desde los 0 a los 16° y en altitudes que varían de 2,440 a 2,600 metros, valores obtenidos a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE) generado a partir de las curvas de nivel de INEGI escala 1:50,000. La población de Nueva Victoria es la mejor conservada de las localidades presentes en la cuenca, con el valor más alto de VIR (30.48) y con la densidad promedio más alta correspondiente a 262.5 individuos por hectárea, así como los volúmenes de madera más importantes con 182.77 m³/ Ha (Figura 4.5), ver cuadros 4.3 y 4.4.



Figura 4.5. Población de *Pinus martinezii* de la localidad de Nueva Victoria.

Los registros de altura y DAP son bajas con relación a las demás poblaciones, lo cual es debido a la alta proporción de individuos jóvenes como se muestra en la figura 4.6.

En el área se realizan aprovechamientos forestales maderables en pequeñas proporciones por ejidatarios de la zona, las cuales no representan un peligro para la estabilidad de la población de *P. martinezii*, sin embargo dicha extracción de madera se lleva a cabo en algunas ocasiones de manera clandestina. Hay presencia de erosión laminar en algunas zonas de la localidad y evidencia de incendios en años

anteriores, por lo que muchos de los individuos jóvenes pueden ser producto de dicha regeneración.



Figura 4.6. Individuos jóvenes de *P. martinezii* de la localidad de Nueva Victoria.

Agua Zarca. Esta localidad está localizada al Sur de la Cuenca de Cuitzeo, conformando bosques de pino- encino en asociación con *P. teocote*, *Quercus crassifolia*, *Arbutus glandulosa* y *Ternstroemia lineata*. La localidad se distribuye desde una altitud de 2,295 hasta 2,336 metros, la pendiente en la zona es ligera, y los individuos de *P. martinezii* se distribuyen en general de 0 a 16°.

La localidad de Agua Zarca es la segunda población más importante de la Cuenca de Cuitzeo, de acuerdo con los Valores de Importancia Relativa obtenidos (30.40). Esta población fue la que obtuvo registros más altos de cobertura por hectárea con 0.59 Ha, así como un área basal de 9.71m² el cual representa un estimativo de la dominancia (Carranza 1987), la densidad estimada fue de 190 individuos por hectárea (Figura 4.7).

La población de *P. martinezii* en esta localidad es extensa, de tal forma que Silva (2005) estima una superficie aproximada de 545 Ha. En ella se pueden encontrar diversos grados de conservación; Esto debido a que la accesibilidad facilita el aprovechamiento de la especie en la zona, como la extracción de madera y resina que se realizan de manera clandestina (Figura 4.8). Estas actividades han ocasionado

severas condiciones de erosión por cárcavas, principalmente en la porción Oeste de la población, lo cual amenaza la regeneración natural de la misma (Figura 4.9).



Figura 4.7. Aspecto de la población de *Pinus martinezii* en la localidad de Agua Zarca.



Figura 4.8. La extracción de resina en individuos de *P. martinezii* en la localidad de Agua Zarca.

El Temascal. Esta localidad se encuentra ubicada en la porción Sur de la cuenca, distribuyéndose a una altitud desde 2,480 a 2,530 m, la pendiente en esta zona oscila de 25 a 45° siendo el registro más alto para *Pinus martinezii* en el presente trabajo. El tipo de vegetación corresponde a Bosque de Pino- Encino, y se encuentra en asociación con *P. teocote* y *Quercus crassifolia* (Figura 4. 10).



Figura 4.9. Condición de deterioro de la porción Oeste de la localidad de Agua Zarca por erosión del suelo.

Los individuos de esta localidad registraron el promedio de DAP más alto con 56.66 cm y una altura de 23.15 m (Cuadro 4.3). El VIR obtenido fue el tercero en importancia (12.97); sin embargo, el valor estimado estuvo muy por debajo de las localidades de Nueva Victoria y Agua Zarca (Cuadro 4.4).



Figura 4.10. Población de *Pinus martinezii* conformando un bosque mixto en la localidad El Temascal.

Los parámetros medidos en campo indican que existen las condiciones para el desarrollo de la especie *P. martinezii*, pero que debido a los disturbios ocasionados por la extracción intensiva de madera en la zona la densidad de los individuos es únicamente de 43.3 individuos por hectárea, por lo cual solo se contaron 13 árboles.

La tala de *P. martinezii* en la zona se realiza de manera selectiva con base en sus características maderables, situación que puede ocasionar problemas en el establecimiento de una regeneración natural ya que la presencia de individuos jóvenes es escasa (Figura 4.11).

Cerro Mozo. Esta localidad está situada en la porción Este de la cuenca a una altitud de 2,305 hasta 2,365 metros, conformando un bosque mixto en asociación con *P. teocote* y *Quercus crassifolia*, en pendientes ligeras que oscilan de los 8 a los 16°. Esta población es la cuarta en importancia de acuerdo al índice de VIR (10.0) registrando una densidad de 70 individuos por hectárea; sin embargo en relación a la altura de los individuos y el volumen de madera se registran los valores más bajos con 12.86 metros y 31.49 m³ por hectárea respectivamente (Cuadros 4.3 y 4.4).



Figura 4.11. Caminos utilizados para la extracción de madera en la localidad El Temascal.

En el área no se aprecian factores de disturbio como extracción de madera o resina, sin embargo existen evidencias de un incendio que afectó la población de

Pinus martinezii y que ha condicionado también su permanencia debido a la acelerada pérdida de suelo como consecuencia de este incidente (Figura 4.12). Debido a esto, se localizaron pocos individuos de la especie, los cuales se encuentran en grupos aislados al borde de la carretera Morelia – Ciudad Hidalgo (Figura 4.13).



Figura 4.12. Presencia de pedestales como evidencia de la erosión en Cerro Mozo.



Figura 4.13. Condición de deterioro de la localidad de Cerro Mozo ocasionada por el incendio y su posterior pérdida de suelo.

Laguna Verde. Esta localidad se encuentra en los límites de la zona geotérmica de Los Azufres en la parte Este de la cuenca a una altitud que va de los 2,983 a los 3,022 m en pendientes ligeras que van de los 8 a los 16°, conformando asociaciones de pino- encino con *Quercus laurina* y *Arbutus glandulosa*. Los individuos de esta

población registran promedios de DAP y altura de los árboles superiores al promedio, y corresponden a 51.68 centímetros y 25.18 metros respectivamente, con un volumen estimado de 109.39 m³ por hectárea, mientras que el cálculo para el índice de Valor de Importancia Relativa es de 9.06 (Cuadros 4.3 y 4.4). Silva (2005) menciona que la superficie que ocupa esta población no es significativa, sin embargo los registros de campo realizados para esta población, indican que existen las condiciones ideales para el desarrollo en diámetro y en altura de los individuos de *P. martinezii* (Figura 4.14), pero que debido a las actividades de extracción de madera en la zona la densidad se ha visto afectada registrando un promedio de solo 26.67 individuos por hectárea (Figura 4.15).

La Joya. Se localiza al Sur de la cuenca en la Sierra de Mil Cumbres en los 2,284 metros sobre el nivel del mar con una pendiente de 4 a 8°. Esta localidad registró el VIR más bajo con 7.09, la altura de los árboles fue la más alta en las poblaciones registradas con 31.74 y con un DAP promedio fue de 47.19; el volumen de madera calculado es de 93.9 m³ por hectárea (Cuadros 4.3 y 4.4).



Figura 4.14. Individuos de *Pinus martinezii* de la localidad de Laguna verde.



Figura 4.15. Evidencia de la extracción de madera realizada en la localidad de Laguna verde.

La densidad registrada en la zona es de 40 individuos por hectárea, lo cual probablemente se deba al aprovechamiento selectivo de los árboles que se llevaba a cabo en el momento de las exploraciones, lo que ha dejado pocos individuos para la regeneración de la población. Lo anterior condicionó las actividades de levantamiento de información, por lo que únicamente se realizó un solo sitio de muestreo, esto debido a la falta de accesibilidad al área por la gran cantidad de ramas depositada en el suelo y a los pocos individuos que permanecen en pie (Figura 4.16).



Figura 4.16. Condiciones de deterioro de la localidad de La Joya por la extracción de madera.

4.6. Conclusiones

Se conformó una base de datos georeferenciada de las seis poblaciones representativas (>22.5 Ha) de *Pinus martinezii* en la Cuenca de Cuitzeo, las cuales se encuentran localizadas en la Sierra de Mil Cumbres correspondiente al parteaguas de la porción el Sur de la cuenca, conformando en su mayoría bosques mixtos. La altitud más baja registrada en los muestreos fue de 2,284 m en la localidad de La Joya mientras que Laguna verde presentó el extremo opuesto con 3,022 m.

La aplicación del índice de Valor de Importancia Relativa (VIR) para comparar las condiciones ecológicas de las poblaciones *P. martinezii* en la cuenca de Cuitzeo a partir de medidas fisonómicas y estructurales de los individuos, constituye una herramienta útil y rápida para la evaluación y comparación de las localidades; por otro lado, los valores obtenidos mediante este índice reflejan las observaciones realizadas en el trabajo de campo y apoyan las conclusiones generadas a partir del mismo.

Se obtuvo un valor más alto para las poblaciones que tienen un mayor grado de conservación, lo que se refleja principalmente en un mayor número de individuos por hectárea, una mayor área basal y cobertura de la copa; en este sentido las localidades que han sido impactadas por factores ambientales como los incendios y enfermedades o por factores antropogénicos como la tala para extracción de madera o el cambio de uso del suelo, presentan valores de VIR más bajos. El uso de un índice que permita realizar comparaciones entre poblaciones de una misma especie, puede ser una importante herramienta para llevar a cabo acciones concretas de conservación y reforestación. Por otro lado, es importante tomar en cuenta que hay otros factores a evaluar en las poblaciones de la especie, como la regeneración natural, que no fue objeto de estudio en el presente trabajo, pero que representa un factor de importancia de las condiciones ecológicas de una especie, por lo que se sugiere realizar investigaciones posteriores encaminadas a medir este aspecto.

La localidad de Nueva Victoria, Municipio de Queréndaro, obtuvo el VIR más alto (30.48), seguida por Agua Zarca (30.40), Temascal (12.97), Cerro Mozo (10.0), Laguna verde (9.06) y en última instancia La Joya (7.09). Cabe señalar, que existe

una diferencia significativa entre las dos primeras poblaciones con respecto a las demás, lo que refleja los distintos grados de conservación de cada una de ellas.

La mayor parte de las poblaciones registradas presentan un grado avanzado de deterioro debido a los incendios forestales y a la tala clandestina de la región, ya que la madera de este pino es altamente valorada debido a sus características, para su uso en la elaboración de papel de alta resistencia y la fabricación de muebles (Álvarez- Moreno *en* Silva 2005). Por lo anterior, se observó durante el trabajo de campo que el aprovechamiento se realiza en la mayoría de los casos de manera selectiva en individuos de *P. martinezii* sobre otras especies como *P. teocote* y *P. michoacana var. cornuta*.

No obstante la importancia de *Pinus martinezii* al ser una especie considerada en estatus de **Pr** "sujeta a protección especial" por la Norma Oficial Mexicana-059-2001, no se realizan labores de conservación y reforestación. Un aspecto importante en cuanto a la conservación de la especie es la generación de información básica para un óptimo aprovechamiento como son los cuadros de volumen de madera. Esta situación refleja la falta de conocimiento que existe sobre las condiciones actuales de la especie, lo cual representa un grave problema debido a que las poblaciones están siendo rápidamente deterioradas.

4.7. Literatura citada

Acevedo- Herrera, O., Alanis de la Rosa, J.A. y Angeles- Pérez, J. 2001. Atlas forestal del Estado de Michoacán. Comisión Forestal del Estado de Michoacán. Morelia, Mich. México.

Carranza G., E. 1987. Aspectos botánico – ecológicos del campo geotérmico Los Azufres, Michoacán (México). Tesis de Licenciatura. Escuela de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México.

Challenger, A. 1998. Utilización y conservación de los ecosistemas terrestres de México: pasado, presente y futuro. Universidad Nacional Autónoma de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Agrupación Sierra Madre, S.C. México.

Chapman, S.B. 1976. Methods in Plant Ecology. Blackwell Scientific Publications. Osney Mead, Oxford. New York.

- COFOM (Comisión Forestal de Michoacán).** 2005. Viveros productores de especies de plantas de afinidad templada en el Estado de Michoacán 2002- 2004. En: La Biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Villaseñor G., L.E. y O.A. Leal-Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México.
- Cronquist, A.** 1977. Introducción a la Botánica. Ed. CECSA. México, DF.
- Curtis, J.T.** 1959. The vegetation of Wisconsin. An ordination of plant communities. Univ of Wisconsin Press. Madison 657 pp
- Farjon, A. y T. Styles, B.** 1997. Pinus (Pinaceae). Flora Neotropica. Monograph 75. Organization for Flora Neotropica. The New York Botanical garden. New York.
- García A., A. y M.S González E.** 1998. Pinaceas de Durango. Instituto de Ecología AC.
- Hanson, H.E. y E. Churchill, D.** 1961. The plant Community. Reinhold Publishing Corporation. New York. 217 pp.
- Hoehne, E.** 1893. Deutsche dendrologie. Stuttgart, F. Enke
- IFN (Inventario Forestal Nacional).** 2000. La condición actual de los recursos forestales en México: resultados del Inventario Forestal Nacional 2000. Investigaciones geográficas. Boletín del Instituto de geografía. UNAM. 43:183-203.
- Inventario Forestal Estatal.** 1995. Tablas de Volumen para los diferentes géneros y regiones. Dirección Forestal. Secretaría de Desarrollo Agropecuario y Forestal. Gobierno del Estado de Michoacán.
- Kearney, M. y Porter, W.** 2004. Mapping the fundamental niche: physiology, climate, and the distribution of a nocturnal lizard. Ecology. Ecological Society of America. 85 (11) pp. 3119- 3131.
- Larsen, E.** 1964. A new species of pine from México. Madroño. 17 (5): 217 – 218
- Little, E.L. y W.B. Critchfield.** 1969. Subdivisions of the genus Pinus (Pines). USDA. Washington, DC. Misc. 114
- Madrigal- Sánchez, X.** 1982. Clave para la identificación de las coníferas silvestres en el Estado de Michoacán. Biol. Div. No 58. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales. México, DF.
- Madrigal- Sanchez, X.** 1994. Características ecológicas generales de la región forestal oriental del Estado de Michoacán, México. UMSNH. Morelia, Mich. México.
- Madrigal- Sanchez, X.** 1997. Ubicación fisiográfica de la vegetación en Michoacán, México. Ciencia Nicolaita. Morelia, Mich. México. 15: 65- 75.
- Madrigal- Sánchez, X. y Guridi- Gómez, L.I.** 2005. Especies arbóreas y arborescentes en estado crítico de conservación. En: La Biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Villaseñor G., L.E. y O.A. Leal- Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México.

- Matteucci, S. y A. Colma.** 1982. Metodología para el Estudio de la Vegetación. Secretaría General de los Estados Americanos- Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Washington, D.C.
- Ninyerola M., Pons, X.y Roure, J.M.** 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- Norma Oficial Mexicana NOM-059- SEMARNAT- 2001.** Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo.
- Rodríguez L., G y Carillo S., A.** 2005. Gimnospermas. En: La Biodiversidad en Michoacán: Estudio de Estado. Villaseñor G., L.E. y O.A. Leal- Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México.
- Rusell S., G. 1909.** Los Pinos de México. Edición facsimilar tomada del original. Comisión Forestal. Técnica reforestación No. 15.
- Silva F., M.A.** 2005. Distribución y aspectos ecológicos de *Pinus martinezii* Larsen, en el Eje Neovolcánico, Estado de Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México.
- Styles T., B. 1998.** El género *Pinus*: su panorama en México. En: Diversidad Biológica de México: orígenes y su distribución. Ramamoorthy T., P.R. Bye, A. Lot, J. Fa (Comps.). Instituto de Biología. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Teixeira R.,V. y E. Sánchez I.** Patrones poblacionales de las principales herbáceas en la Reserva Nacional de Lachay. Ecología Aplicada. Vol 5. No. 22. Lima, Perú pp 23-27.
- Whittaker, R.H.** 1972. Evolution and measurement of species diversity. Taxon 21: 213-251
- Young R.** 1991. Introducción a las ciencias forestales. LIMUSA. México. DF. 630 pp.

CAPITULO 5

MODELO DE DISTRIBUCIÓN POTENCIAL DE *Pinus martinezii*

5.1. Antecedentes

5.1.1. Perfil bioclimático

Cada especie tiene su propio lugar en el espacio y en el tiempo en una comunidad, así como también es diferente la forma en que se relaciona con otras especies dentro de la misma, el área que ocupa cada especie es su rango geográfico, es decir su distribución en el espacio, el cual puede ser representado en un mapa. La distribución geográfica de las especies está profundamente relacionada con el hábitat, es decir a las condiciones ecológicas en las que ésta ocurre, lo anterior es debido a que su desarrollo está definido por un rango de factores ambientales con base en los requerimientos esenciales de la especie, los cuales generalmente están definidos por valores extremos (altitud, posición topográfica, temperatura, humedad, precipitación, entre otros), este rango de tolerancia de las especies a las condiciones ambientales es definido por Chapman (1976) como amplitud ecológica. El hábitat es definido por Hanson y Churchill (1961), como el lugar que ocupa una población o comunidad en la cual existe una combinación particular de condiciones ambientales presentes; algunas especies pueden ocupar un rango de hábitats diferentes o más de uno en diferentes partes de su área de distribución (Whittaker 1975).

La amplitud ecológica de una especie ha sido caracterizada también como perfil bioclimático (Fischer *et al.* 2001, Graham *et al.* 2004, Vaughton y Ramsey 2004, Villaseñor y Téllez Valdez 2004, Finch *et al.* 2005) o perfil ecológico (Petraglia y Tomaselli 2003, Mitov y Stoyanov 2005). Estos perfiles proporcionan información del rango de tolerancia de las especies, lo cual permite evaluar su afinidad con respecto a los factores ambientales, haciendo posible medir su probabilidad de ocurrencia en el espacio geográfico.

Cada especie tiene su propio perfil ecológico, el cual está definido con base a su potencial para crecer dentro de un limitado rango de condiciones ambientales. En el caso específico de las plantas, su distribución ha sido asociada principalmente a los factores climáticos y edáficos (Chapman 1976, Hanson y Churchill 1961).

El rango de tolerancia de cada especie hacia cada factor ambiental está constituido por límites, mas allá de estos, las condiciones son extremas y los organismos no pueden permanecer con vida o mantener poblaciones extensas, en ocasiones los organismos pueden permanecer con vida, pero no funcionan eficientemente y pueden mantenerse únicamente pocos individuos. Ya que cuando una especie se encuentra bajo condiciones fisiológicas de estrés, pueden sucumbir fácilmente ante otros competidores, razón por la que las especies no alcanzan su distribución potencial completa en campo (Cox y Moore 1994) (Figura 5.1).



Figura 5.1. Modelo gráfico de la abundancia de una población a lo largo de un gradiente de un factor ambiental (Tomado de Cox y Moore 1994).

5.1.2. Concepto de nicho ecológico

El concepto de nicho ecológico multidimensional de una especie es definido como la posición de una especie en una comunidad con relación a otras especies (Hutchinson 1957); en el cual existe un conjunto de condiciones ecológicas dentro de las cuales la especie puede mantener las poblaciones sin migración por lo que es definido como un espacio ecológico - ambiental multidimensional (Townsend *et al.* 2002). El nicho

ecológico es un espacio fundamental para las especies debido a que es determinante para su distribución, por este motivo las especies generalmente desarrollan mecanismos que les permiten la dispersión de su nicho en el espacio (Townsend 2001).

El nicho fundamental está delimitado por el rango de condiciones ambientales que requiere una especie, este puede estar afectado por la heterogeneidad del paisaje y algunas condiciones como la fragmentación, el tamaño de los parches y el efecto de borde. La distribución de una especie puede estar limitada por la interacción con otras especies como la competencia interespecífica, la depredación o el parasitismo, lo que puede causar la restricción de su nicho a un área más pequeña, el cual es conocido como nicho realizado (Hutchinson 1957, Mazerolle y Villard 1999, Stockman *et al.* 2006).

Según Cox y Moore (1994), las áreas de distribución de las especies se encuentran en una escala definida por un área geográfica, hábitat o microhábitat, rodeadas por zonas en las que las poblaciones no pueden mantenerse viables debido a diferentes condiciones físicas que limitan su supervivencia, estas regiones son conocidas como barreras biogeográficas. Cualquier factor climático o topográfico o su combinación pueden constituir una barrera para la distribución de una especie en particular. Factores como la cantidad de lluvia, la evaporación, la cantidad y disponibilidad del agua en el suelo, la intensidad de luz, son todos ellos factores limitantes para la distribución de las plantas.

Una reciente aplicación de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en la ecología, es la construcción de modelos de los nichos fundamentales para predecir la posible distribución geográfica de las especies a partir de registros de colectas (Townsend y Klusa 2003). Los modelos predictivos simplifican el concepto de nicho tomando en cuenta los factores ambientales que determinan el entorno medio ambiental de las localidades de colecta de la especie para modelar el nicho ecológico fundamental (Illoldi *et al.* 2002, Finch *et al.* 2005).

5.1.3. Modelos de distribución potencial

Se han desarrollado numerosas técnicas que han permitido el desarrollo de modelos de nicho, utilizando principalmente información ambiental y de registros de las especies.

Según Williams y colaboradores (2002), para la construcción de modelos de distribución potencial, la información ambiental está constituida principalmente por tres tipos: terreno, clima y substrato. El terreno incluye parámetros como la elevación, pendiente, relieve y exposición, los cuales pueden ser generados a partir de las curvas de cartas topográficas mediante la generación de un Modelo Digital de Elevación (MDE), lo que lo constituye como uno de los insumos más importantes para la generación del modelo. La información de substrato en ocasiones es la más difícil de obtener, sin embargo hay regiones en donde la información está disponible en forma de mapas de litología, suelos y formas del relieve.

Existen cinco tipos de modelos de nicho, con base en el tipo de información disponible: 1) *con pocos datos o sin datos disponibles para el modelamiento*, el cual se basa únicamente en el conocimiento de las condiciones ambientales del experto; 2) *datos de solo presencia*, en el que solo se cuenta con información de los sitios en donde se tienen registros de la especie pero no se cuentan datos de ausencia, en estos casos el registro de la información obedece a un sistema de muestreo no sistemático; 3) *datos de presencia y ausencia*, se tienen registros de datos de las localidades ocupadas y desocupadas por la especie, en el cual generalmente se utiliza un muestreo sistemático; 4) *categoría ordinal*, en donde existen datos disponibles del número de los individuos en las localidades y se tiene la información organizada en categorías de abundancia; 5) *conteos*, cuando se realiza un censo del número presente de individuos de la especie en las localidades de muestreo. Los últimos dos son los menos utilizados debido al costo asociado que este trabajo representa (Wintle *et al.* 2005)

Los programas diseñados para la predicción de distribución potencial de especies emplean principalmente tres tipos de modelos: heurísticos, estadísticos

(regresión e interpolación de multivariados) y los modelos computacionales (Williams *et al.* 2002).

Dentro de los modelos heurísticos el más utilizado es BIOCLIM, el cual construye índices climáticos de los puntos de colecta y posteriormente encuentra pixeles que poseen los mismos índices, mismos que utiliza para construir el modelo de distribución potencial. Otro modelo de este tipo comúnmente utilizado es HÁBITAT, el cual puede trabajar con datos ambientales incluyendo índices climáticos generados en BIOCLIM, pero además utiliza información de suelos y litología, analizando todos los atributos como factores interdependientes (Nix 1986, Pearce y Lindenmayer 1998, Villaseñor y Téllez Valdez 2004).

Los modelos de regresión son correlaciones estadísticas de observaciones de presencia y ausencia de la especie, la cual se relaciona con la información ambiental. Este tipo de modelos utiliza el mismo marco conceptual de BIOCLIM y modelos heurísticos similares, los modelos más utilizados en ecología y biogeografía son GLM (Generalised Linear Models) y GAM (Generalised Additive Models) (Williams *et al.* 2002). Otro programa actualmente utilizado que utiliza algoritmos similares, también basado en redes neurales

Dentro de los modelos computarizados son reconocidos tres métodos los cuales pueden ser útiles para el modelamiento de la distribución espacial de las especies a partir de datos de colecta: árboles de decisiones, redes neurales y algoritmos genéticos. En este último se encuentra uno de los mayormente utilizados para la creación de modelos de distribución, el GARP (Genetic Algorithm for Rule-set Prediction), incluye distintos algoritmos que son iterativos, basados en inteligencia artificial, los cuales son utilizados para construir componentes o reglas creadas para predecir la distribución de las especies dentro o fuera del nicho (Townsend 2001, Martínez- Meyer *et al.* 2004, Stockman *et al.* 2006). Otro programa utilizado para el modelamiento de nichos es Maxent, basado en algoritmos similares a los modelos lineales de GLM y GAM pero a su vez incorpora métodos Bayesianos y redes neurales, cuyo principio es estimar la probabilidad de distribución en el espacio para

cada píxel a partir de puntos de presencia de las especies (Phillips *et al.* 2006, Phillips y Dudík 2008, Guisan y Zimmermann 2000).

Sin duda el éxito de estos modelos depende de la calidad de la información ambiental y de los datos de registro de las especies, lo cual ha sido una de las más grandes debilidades de estos programas según Townsend (2001), ya que esta información es raramente muestreada sistemáticamente lo que dificulta su análisis estadístico y ocasiona errores en la construcción de los modelos. Por lo que uno de los productos considerados de mayor importancia es la consolidación de bases de datos biogeográficos digitales, el cual es uno de los procesos principales para la creación de los mapas de distribución potencial (Jennings 2000, Williams *et al.* 2002).

Existen algunas limitantes sin embargo para el uso de estos programas cuando los organismos están restringidos a parte de su hábitat potencial, ya sea por barreras biogeográficas, o por su pobre habilidad de dispersión, las cuales pueden verse alteradas por acción del hombre (Williams *et al.* 2002).

5.1.4. Análisis multicriterio

El análisis multicriterio es un proceso jerárquico analítico, que utiliza un sistema que ayuda a los expertos a mejorar la toma de decisiones estratégicas mediante el uso de procesos que proveen una estructura y síntesis clara. Es un método flexible que ayuda a analizar problemas complejos de decisión, a través de separar una situación compleja sin estructura, en cada uno de sus componentes mas pequeños que lo conforman, asignando valores numéricos a partir de juicios subjetivos para determinar las prioridad de las variables que influyen en una determinada situación (Malczewski 1997, Al- Zu'bi 2007). Al igual que en modelos como *data driven* y *knowledge driven*, la asignación de pesos en el análisis multicriterio pueden estar basados en criterios estadísticos y/o subjetivos fundados en la opinión experta (Bonham- Carter 1994).

Los pesos son valores numéricos asignados a un criterio, los cuales indican su importancia con relación a otro criterio. Las técnicas que se utilizan para la asignación de pesos son: 1) *jerárquico (Ranking)*, constituye el método más simple en el que los

criterios de decisión son ordenados de acuerdo a su importancia, mismos que son asignados por el experto; 2) *categorico (Rating)*, en el cual el tomador de decisiones estima los pesos con base en una determinada escala desde 1 (muy apto) asignado al criterio más importante y los valores más pequeños son otorgados a los criterios más bajos en orden hasta 0 (no apto); 3) *comparación pareada (Pairwise comparison)*, este método realiza balances por pares para cada uno de los componentes con la finalidad de asignar los pesos relativos; y 4) *análisis de intercambio (Trade-off analysis Method)*, en el cual el experto compara dos alternativas con respecto a dos criterios al mismo tiempo y determina cual es la alternativa que mejor se ajusta al objetivo (Malczewski 1999).

Los mapas de criterios y los pesos finalmente son integrados para proveer un cálculo final, que es llevado a cabo bajo una apropiada regla de decisión o una función de agregación lineal. Debido a que la evaluación multicriterio está relacionada con los factores geográficos y sus interacciones, estos pueden ser analizados con los Sistemas de Información Geográfica para generar e integrar las variables, así cada píxel en el espacio es evaluado con base en criterios ponderados para obtener una escala jerárquica de valores de aptitud que pueden ser representados en forma de mapas expresando la compatibilidad del territorio (Bonham- Carter 1994, Paegelow *et al.* 2003).

5.2. Objetivos

- Identificar los factores ambientales que determinan el nicho fundamental de *Pinus martinezii*, mediante la elaboración de un perfil bioclimático de la especie.
- Elaborar un modelo de distribución potencial de *P. martinezii*, utilizando información ambiental y datos de presencia de la especie, para espacializar su nicho fundamental, el cual pueda ser utilizado para identificar áreas de conservación y reforestación en la cuenca de Cuitzeo.

5.3. Hipótesis

1. Los rangos de tolerancia de *Pinus martinezii* a los factores ambientales determinan su distribución en el espacio geográfico
2. Un modelo de distribución potencial basado en el nicho fundamental de la especie, permite la identificación de áreas aptas en la Cuenca de Cuitzeo para la conservación y reforestación de las poblaciones de *P. martinezii*.

5.4. Materiales y métodos

Para obtener el perfil bioclimático y el modelo de distribución potencial de *Pinus martinezii* se utilizó información temática y vectorial escala 1:50,000 de INEGI, de estos últimos se derivaron otras capas de información como el Modelo Digital de Elevación, Pendientes, Exposición de ladera, Temperatura media anual y Precipitación anual.

Los mapas fueron estandarizados utilizando ILWIS 3.3, ARCVIEW 3.2, ERDAS 9.1 y ARCGIS 9.2 a un área mínima cartografiada de 3 x 3 mm (22,500 m²) y en los mapas con formato raster el tamaño de píxel de 20m. Posteriormente, el análisis de la información para el perfil bioclimático y la elaboración del modelo de distribución potencial fueron obtenidos en ILWIS 3.2 a partir de matrices raster.

5.4.1. Obtención del perfil bioclimático de *Pinus martinezii*

El perfil bioclimático o ecológico se refiere en el presente trabajo a la amplitud ecológica de la especie, es decir, la descripción de los principales factores ambientales que están relacionados con la distribución espacial de la vegetación, entre los que se encuentran los factores climáticos (luz, temperatura, precipitación y humedad), las características de los suelos (textura, estructura y profundidad) y los aspectos topográficos (exposición de la ladera, pendiente, relieve, altitud, geología etc.), por lo que el perfil hace posible medir la probabilidad de ocurrencia en el espacio geográfico (Hanson y Churchill 1961, Ninyerola et al. 2005).

El perfil bioclimático de *Pinus martinezii* para la cuenca de Cuitzeo, se obtuvo a partir del establecimiento de los rangos de tolerancia a diversos factores ambientales, los cuales fueron determinados mediante sobreposición cartográfica de la base de

datos de los puntos de ocurrencia de la especie con los mapas temáticos físico geográficos (altitud, geología, geomorfología, edafología, pendientes, exposición de la ladera) (Anexos 2.1 al 2.7) y climáticos (temperatura media anual y precipitación anual) (Anexos 3.4 y 3.5) (Petraglia y Tomaselli 2003).

Posteriormente, se sistematizó la información en forma de bases de datos y se elaboraron tablas y gráficas de los factores ambientales presentes en cada localidad de muestreo de *P. martinezii*, para determinar el rango ecológico y los factores que están incidiendo más fuertemente en la distribución de la especie.

5.4.2. Elaboración del modelo de distribución potencial de *Pinus martinezii*

El principio de un modelo de distribución potencial está basado principalmente en los sitios de ocurrencia de la especie y las condiciones ambientales presentes, que constituyen una muestra del nicho realizado de la especie. Por lo tanto, el modelo basado en el nicho fundamental de la especie, representa solamente una aproximación de su nicho ecológico (Anderson *et al.* 2002, Phillips *et al.* 2006). La elaboración del modelo de de distribución potencial de *Pinus martinezii* fue mediante el modulo de análisis multicriterio “Spatial Multi-Criteria Evaluation” de ILWIS. El análisis multicriterio, permite un análisis o desagregación de los componentes o criterios por separado para asignarles valores numéricos bajo juicios subjetivos y en este caso, basados también en la recopilación de información del trabajo de campo, para determinar las variables que tienen una mayor influencia en la distribución de la especie; así como también utilizar matrices raster categóricos y continuos, lo que facilita su agregación y análisis en criterios.

Los criterios utilizados en el análisis fueron: el geopedológico que incluye los factores (geología, geomorfología y edafología), el altimétrico (altitud, pendientes y exposición de la ladera) (Anexos 2.1 al 2.7), y los climáticos (temperatura media anual y precipitación anual) (Anexos 3.4 y 3.5). En cuanto a la información geográfica de *Pinus martinezii*, se utilizaron únicamente datos de presencia, debido a que los datos de ausencia pueden ayudar a obtener mejores resultados siempre y cuando se cubran

en su mayoría las zonas no aptas para la especie identificadas en el área de estudio (Chefaoui y Lobo 2008).

5.4.2.1. Asignación de pesos

Los criterios fueron normalizados, priorizados y finalmente agregados. A través de este proceso, los valores de los criterios pierden su dimensión y se vuelven una expresión en términos de grados de realización del objetivo.

Para los criterios y factores, la asignación de pesos se realizó mediante dos métodos utilizados en el Análisis Multicriterio: 1) la comparación de pares (*Pairwise comparison*) que asigna un valor de proporción, para esta técnica existe una escala de comparación que representa grados de importancia (Cuadro 5.1) (Saaty 1980); 2) la asignación de pesos jerárquica (*Ranking*), en la cual se le otorga el valor ponderado más alto a la variable más importante. Para la asignación de pesos en esta fase se utilizó el criterio experto, tomando en cuenta las variables que tienen una mayor influencia en la distribución de *Pinus martinezii*.

Cuadro 5.1. Escala de comparación pareada (Saaty 1980).

INTENSIDAD DE IMPORTANCIA	DEFINICIÓN
1	Igual Importancia
2	Igual a moderada importancia
3	Moderada importancia
4	Moderada a fuerte importancia
5	Fuerte importancia
6	Fuerte a muy fuerte importancia
7	Muy fuerte importancia
8	Muy fuerte a extrema importancia
9	Extrema importancia

Para la asignación de pesos a los factores (mapas), la técnica utilizada fue la jerárquica (*Ranking*), mediante la cual se expresó su importancia relativa con respecto a los demás factores considerados, esto se realizó utilizando los resultados obtenidos en el análisis del perfil bioclimático de *Pinus martinezii*.

Para la asignación de pesos a los atributos de los factores, se utilizó el método de categorías (*Rating*), para los cuales se utilizó la información de las clases en las

tablas de atributos. Los valores fueron estandarizados en un rango de cero para los factores que no tienen influencia hasta uno para el más importante. Para esto se utilizó la información del perfil bioclimático, en donde se tienen registrados la ocurrencia de la especie para cada clase de los mapas ya que de esta manera no se realiza una asignación de pesos subjetiva (Mendoza y Macoun 1999, Geneletti 2007).

Para los factores con datos continuos (e.g. Modelo Digital de Elevación), se realizó una transformación mediante una función de valores cóncavos (Keeney 1992), para convertir los valores a una escala común. En donde los valores más bajos son estandarizados a 0, mientras los valores más altos a 1, determinando de esta manera la forma de la curva (Sharifi y Herwijnen 2004).

5.4.2.2. Obtención del mapa de distribución potencial de *Pinus martinezii*

Los tres criterios que se tomaron en cuenta para la construcción del Análisis Multicriterio fueron el Altimétrico, Geopedológico y el Climático, los cuales a su vez estuvieron constituidos por subcriterios. La suma de los pesos normalizados para los criterios fueron establecidos con base en la siguiente formula en el módulo de Análisis Multicriterio de ILWIS (Geneletti 2007):

1)

$$V_i = \sum_i a_i w_i$$

En donde V_i es el valor de un determinado píxel, a_i es el valor del criterio normalizado, w_i el peso del criterio, e i es la evaluación del criterio.

El resultado de este proceso es la obtención de mapas potenciales o de probabilidad de ocurrencia de *Pinus martinezii*, a partir de las relaciones y los pesos para cada uno de los factores utilizados en el análisis, determinando la aptitud de cada píxel para encontrar las condiciones del nicho ecológico para esta especie. Se realizaron tres diferentes mapas potenciales, asignando diferentes pesos a los criterios y subcriterios, posteriormente se realizó una prueba de sensibilidad tomando en cuenta el criterio experto para elegir el mapa de distribución potencial más adecuado, tomando en cuenta aspectos como los valores máximos de píxel (aptitud)

en el mapa. El mapa potencial resultante fue agregado en tres clases: muy apto, medianamente apto y sin aptitud. Los umbrales para la clasificación en grados de aptitud, fueron determinados de las estadísticas del modelo y de la curva acumulativa obtenidos de manera automática por el programa ILWIS, en donde se estima la aptitud en el espacio geográfico que representa cada píxel para la distribución de la especie.

5.4.2.3. Evaluación de la confiabilidad

Se realizó la prueba de confiabilidad, utilizando 16 sitios de presencia de *Pinus martinezii* registrados por Silva (2005), los cuales no fueron utilizados en la elaboración del modelo (Cuadro 5.2).

Cuadro 5.2. Puntos utilizados para la evaluación de confiabilidad del modelo de distribución potencia de *Pinus martinezii*

LOCALIDAD	MUNICIPIO	COORDENADAS UTM	
		X	Y
La Leonera	Morelia	279,302	2,169,375
Rincón del Burro	Zinapécuaro	315,868	2,185,518
Los azufres	Zinapécuaro	328,249	2,193,671
La Lobera	Morelia	277,047	2,168,706
El Zarate	Morelia	278,017	2,170,564
Ejido Atécuaro	Morelia	269,413	2,163,714
La Joya	Morelia	267,589	2,156,006
El Laurelito	Morelia	279,193	2,172,669
Agua Zarca	Morelia	278,046	2,168,542
Ejido Irapeo	Charo	284,393	2,172,954
Cañada de Otzumatlán	Queréndaro	304,708	2,182,694
Milpillas	Queréndaro	303,664	2,181,035
Nueva Victoria	Queréndaro	314,618	2,185,457
San Pedro Jacuáro	Hidalgo	314,618	2,185,457
Cerro Mozo	Zinapécuaro	318,798	2,196,111
Laguna Verde	Zinapécuaro	328,403	2,194,154

5.4.2.4. Identificación de zonas potenciales de conservación y reforestación

Para la identificación de zonas para conservación y reforestación con *Pinus martinezii*, se utilizaron el mapa de distribución potencial y los mapas de cobertura y uso del suelo para la cuenca de Cuitzeo para los años de 1975 y 2000, elaborados por López y Bocco (2001) (Cuadro5.3).

Se realizó un análisis de cambio de la cobertura forestal del año 1975 al 2000 para obtener los sitios potenciales para la reforestación con *P. martinezii*. Se identificaron los sitios con disminución de la cobertura de la clase Bosque de pino y Bosque mixto, así como las zonas que presentaron una pérdida o transición a las clases Matorrales, Pastizal y Suelo desnudo (Figura 5.2).

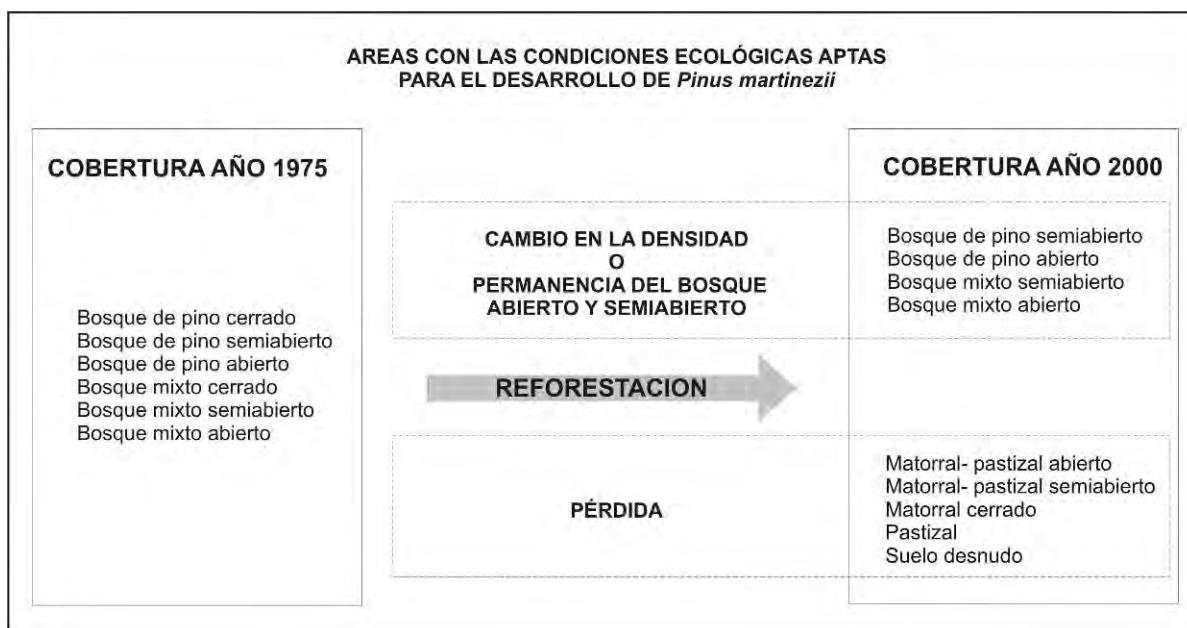


Figura 5.2. Áreas aptas para la reforestación con *Pinus martinezii*.

Las áreas para la conservación de *Pinus martinezii* o de probable ocurrencia fueron los Bosques de pino cerrado y Bosque mixto cerrado que tuvieron una permanencia en la cobertura y aquellos bosques que presentaban coberturas semiabiertas y abiertas (Figura 5.3).

Cuadro 5.3. Leyenda de la cartografía de cobertura y uso del suelo para los años 1975 y 2000 (López y Bocco 2001).

CLASES
Bosque de Encino
Bosque de Pino
Bosque de Abies
Bosque Mixto
Matorral- pastizal abierto
Matorral- pastizal semiabierto
Matorral cerrado
Pastizal
Pastizal halófilo
Suelo desnudo
Cultivos Estacionales temporales
Cultivos Estacionales temporales en terrazas
Cultivos Estacionales de riego
Cultivos de Riego en zonas de inundación
Huertas
Plantaciones de Árboles
Plantaciones de Eucaliptos
Plantaciones de Pinos
Vegetación acuática
Lago
Acuicultura
Zonas de inundación del lago
Bordos
Zonas de inundación de bordos
Asentamientos humanos
Terrenos baldíos

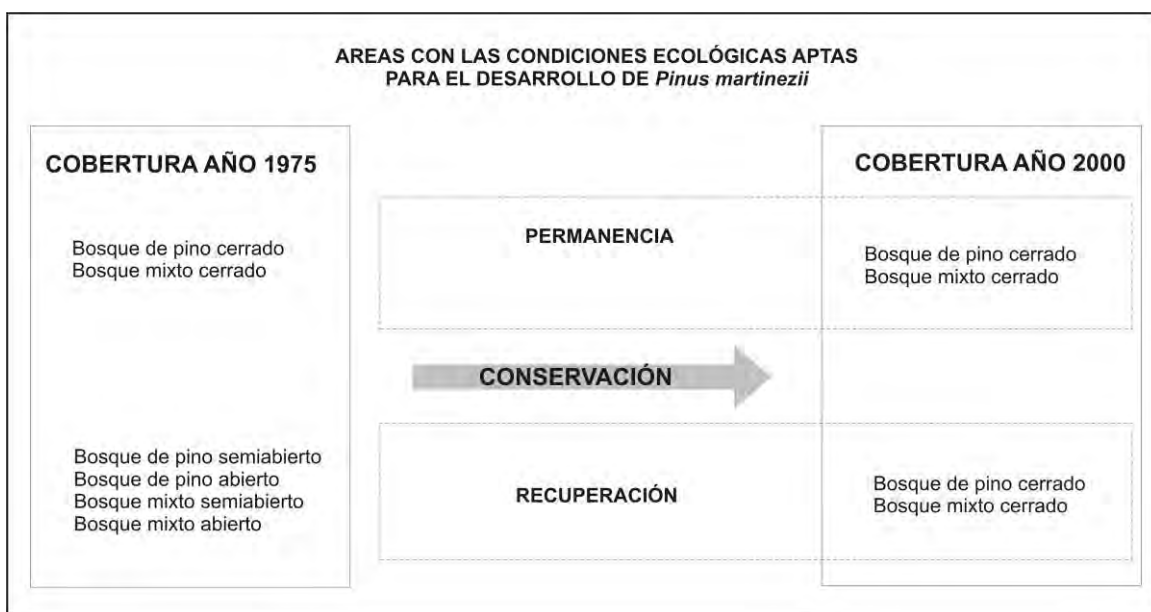


Figura 5.3. Áreas aptas para la conservación de *Pinus martinezii*.

5.5. Resultados y discusión

5.5.1. Perfil bioclimático de *Pinus martinezii*

Los valores de los factores ambientales para establecer el perfil bioclimático, fueron obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica de los puntos de correnca registrados en campo para *Pinus martinezii* (Anexo 5.1), con los mapas temáticos fisio-geográficos y climáticos para la cuenca de Cuitzeo. A partir de los cuales se determinaron los rangos de tolerancia de la especie y los factores que tienen mayor influencia en su distribución. A continuación se realiza una descripción de los factores por localidad.

5.5.1 .1. Análisis del perfil bioclimático por localidad

Nueva Victoria. Esta localidad sobresale como la más importante con relación al Valor de Importancia (*VIR*), por lo que los valores obtenidos corresponden a la comunidad con mejor desarrollo en la cuenca.

Se presentan suelos de tipo Luvisol, desarrollados sobre domos dacíticos y riolíticos, las geoformas en las que se registraron los sitios corresponden en su mayoría a los complejos de laderas de lomeríos altos y en menor frecuencia a los complejos cumbresales de lomeríos altos. El rango altitudinal presente oscila desde los 2,440 hasta los 2,600 m en inclinaciones que van desde 6.68 a 23.9°. En esta población se registran temperaturas medias anuales de 13.8 a 14.7 °C y rangos de precipitación de 1,116 mm la mínima y de 1,222 mm la máxima (Cuadro 5.4).

Cuadro 5.4. Factores físico geográficos de *Pinus martinezii* obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica para la localidad de Nueva Victoria.

SUELOS	GEOLOGIA	GEOFORMAS	ALTITUD	PEND	EXPO	T MEDIA	PRECIP
Luvisol	Domas dacíticos y riolíticos	Complejos de laderas de lomeríos altos	2,440	6.68	Sin exp Sur Sureste Noroeste	13.86	1,116
			2,488	10.64		13.96	1,148
			2,509	15.53		14.35	1,161
		Complejos cumbresales de lomeríos altos	2,580	17.29		14.46	1,209
			2,600	23.9		14.72	1,222

Agua Zarca. Es la segunda localidad en importancia con base en el VI, por lo que los datos obtenidos para esta población de *Pinus martinezii* también se consideran relevantes. En esta localidad las poblaciones se presentan en suelos de tipo Andosol, subyaciendo sobre rocas de tipo Ignimbritas. Mayormente se localiza en complejos de laderas de lomeríos altos y algunos de los sitios registrados en complejos cumbresales de lomeríos altos. El rango altitudinal en estas comunidades va desde los 2,293 hasta los 2,336 m, y las pendientes de 1.43 hasta 16.78°. Los registros de temperatura media anual para esta zona van de 15.26 a 15.49 °C y la precipitación mínima anual es de 1,020 mm y la máxima de 1,048 mm (Cuadro 5.5).

Cuadro 5.5. Factores físico geográficos y climáticos de *Pinus martinezii* obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica para la localidad de Agua Zarca.

SUELOS	GEOLOGIA	GEOFORMAS	ALTITUD	PEND	EXPO	T MEDIA	PRECIP
			2,293	1.43		15.26	1,020
			2,295	4.73		15.35	1,021
		Complejos de laderas de lomeríos altos	2,296	5.43		15.35	1,021
			2,297	6.77	Este	15.36	1,022
			2,310	7.25	Noreste	15.37	1,031
Andosoles	Ignimbritas		2,317	9.37	Noroeste	15.40	1,035
		Complejos cumbresales de lomeríos altos	2,320	9.37	Sur	15.48	1,036
			2,320	11.09	Sureste	15.48	1,037
			2,320	11.2	Suroeste	15.48	1,038
			2,336	16.78		15.49	1,048

El Temascal. Esta comunidad se encuentra en suelos de tipo Luvisol, sobre un sustrato geológico compuesto por basaltos y dacitas. Las geoformas presentes en este sitio difieren de las de las otras localidades, ya que se ubican en complejos de laderas de montañas, presentes en un rango altitudinal de 2,480 a 2,531 m, con pendientes de 7.47 a 19.91°. En cuanto a los factores climáticos, la temperatura media anual mínima es de 14.22 °C y la máxima de 14.49 °C, mientras que la precipitación varía de 1,143 a 1,176 mm (Cuadro 5.6).

Cerro Mozo. Esta localidad se encuentra en suelos Luvisoles, sobre un sustrato geológico conformado por domos dacíticos y riolíticos. La geoforma que corresponde a la zona son complejos de laderas de lomeríos altos. La comunidad está ubicada

desde 2,305 hasta 2,365 m, en pendientes ligeras de 7.13 a 14.31°. La temperatura media anual de la zona va desde los 15.12 hasta los 15.43 °C y se presentan precipitaciones anuales de 1,027 a 1,065 mm (Cuadro 5.7).

Cuadro 5.6. Factores físico geográficos y climáticos de *Pinus martinezii* obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica para la localidad de El Temascal.

SUELOS	GEOLOGIA	GEOFORMAS	ALTITUD	PEND	EXPO	T MEDIA	PRECIP
Luvisoles	Basaltos y dacitas	Complejos de laderas de montañas	2,480	7.47	Noroeste Sureste	14.22	1,143
			2,527	14.58		14.24	1,173
			2,528	18.57		14.25	1,174
			2,531	19.91		14.49	1,176

Cuadro 5.7. Factores físico geográficos y climáticos de *Pinus martinezii* obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica para la localidad de Cerro Mozo.

SUELOS	GEOLOGIA	GEOFORMAS	ALTITUD	PEND	EXPO	T MEDIA	PRECIP
Luvisoles	Domos dacíticos y riolíticos	Complejos de laderas de lomeríos altos	2,305	7.13	Oeste	15.12	1,027
			2,324	10.49		15.33	1,040
			2,365	14.31		15.43	1,065

Laguna Verde. La población de *P. martinezii* en esta zona se encuentra en suelos de tipo Andosol, sobre conos andesíticos y cuyas geoformas corresponden a Complejos de laderas de lomeríos altos. Aquí se presenta la máxima altitud registrada en todos los sitios, con 3,022 m, y la pendiente de la zona es ligera con valores de 2.07 a 11.04°. Los rangos de precipitación anual son también los más altos, con valores de 1,473 a 1,499 mm, y la temperatura media anual es la mínima registrada para todas las localidades y oscila desde 11.62 hasta 11.82°C (Cuadro 5.8).

Cuadro 5.8. Factores físico- geográficos y climáticos de *Pinus martinezii* obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica para la localidad de Laguna Verde.

SUELOS	GEOLOGIA	GEOFORMAS	ALTITUD	PEND	EXPO	T MEDIA	PRECIP
Andosoles	Conos andesíticos	Complejos de laderas de lomeríos altos	2,983	2.07	Sur	11.62	1,473
			2,995	9.93	Noroeste	11.73	1,481
			3,000	10.76	Oeste	11.76	1,485
			3,022	11.04	Noroeste	11.82	1,499

La Joya. Esta localidad se presenta en suelo de tipo Andosol, sobre un lecho geológico compuesto por depósitos superficiales y en una geoforma compuesta por

complejos de laderas de colinas. Es la localidad localizada a menor altitud con 2,284 m. Tiene una temperatura media anual de 15.5°C y la precipitación anual en la zona es de 1,013 mm.

5.5.1 .2. Perfil bioclimático de *Pinus martinezii*

Altitud. El rango altitudinal de la especie es el factor más importante para determinar la distribución de *P. martinezii*, pues con este se asocian variables como la temperatura y la precipitación, el intervalo de altitud se registró desde 2,284 hasta 3,022 m. Sin embargo, esta distribución no es continua, ya que la mayoría de los sitios registrados (37.9%) se ubican entre 2,300 y 2,400 m, seguido por los que se distribuyen de 2,500 a 2,600 m (20.7%) (Figura 5.4).

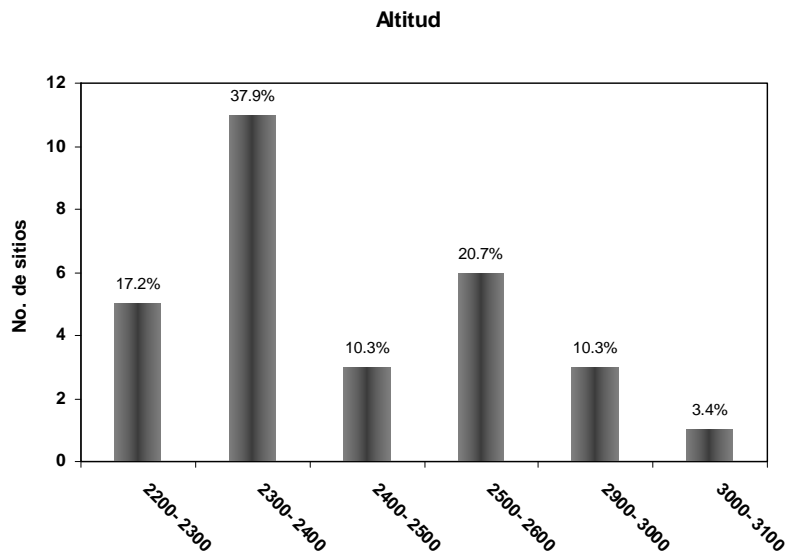


Figura 5.4. Distribución de los sitios registrados en campo de *Pinus martinezii* por rangos de altitud.

Suelos. El factor edafológico mostró ser el segundo en importancia para esta especie, ya que las localidades muestreadas de ésta se encuentran restringidas a solamente dos tipos de suelo; Andosol, donde se establece el 58.6% de los sitios y Luvisol, con el resto (41.4%) (Figura 5.5).

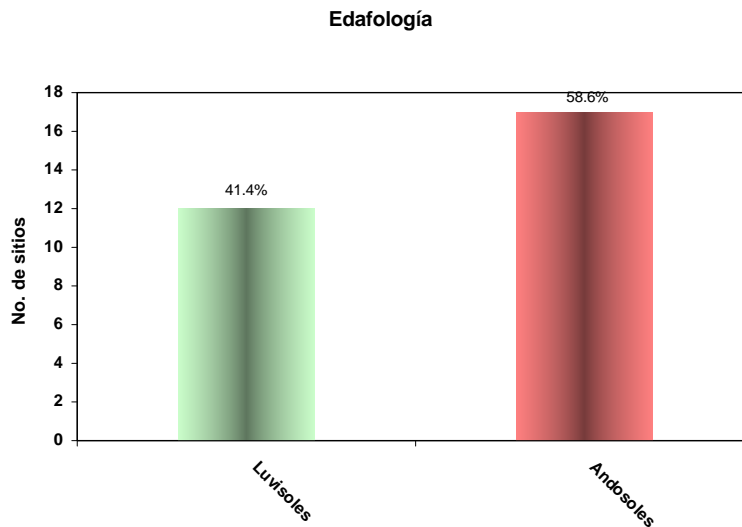
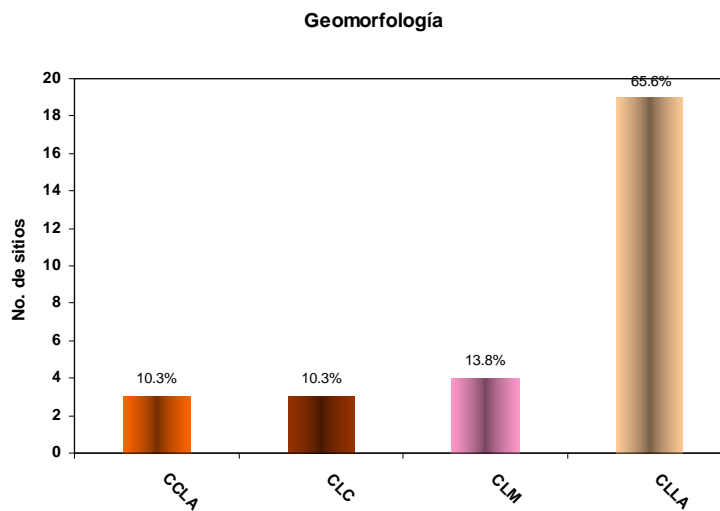


Figura 5.5. Distribución de los sitios registrados en campo de *Pinus martinezii* por clases de suelos.

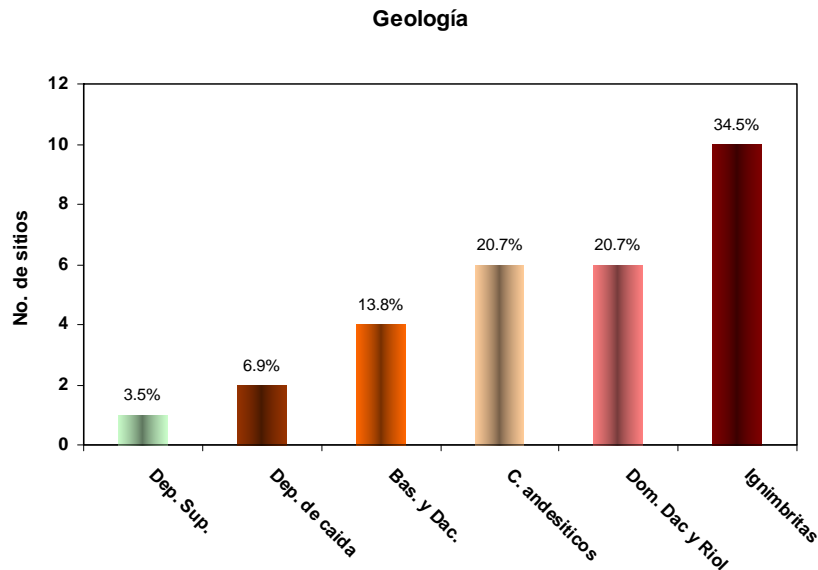
Geomorfología. Este es el tercer factor que influye en la distribución de las poblaciones de este pino. Los sitios registrados se ubicaron en cuatro clases geomorfológicas; la gran mayoría (65%) de éstos, corresponde con los complejos de laderas de lomeríos altos, mientras que el 35% restante se distribuye de manera más o menos homogénea en las otras tres clases: complejos de ladera de montañas, complejos de laderas de colinas y complejos cumbrales de lomeríos altos (Figura 5.6).



CCLA= Complejos cumbrales de lomeríos altos, CLLA= Complejos de laderas de lomeríos altos, CLC= Complejos de laderas de colinas, CLM= Complejos de laderas de montaña

Figura 5.6. Distribución de los sitios registrados en campo de *Pinus martinezii* por clases geomorfológicas.

Geología. Para este caso, la especie en cuestión se registró sobre seis clases diferentes de rocas, presentándose la mayoría las localidades en Ignimbritas (34.5%) seguidas por las encontradas en domos dacíticos y riolíticos (20.7%) al igual que en conos andesíticos (20.7%); mientras que en los depósitos superficiales se presenta sólo el 3.5% de los sitios (Figura 5.7).



Dep. Sup.= Depósitos superficiales, Dep. de caída= Depósitos de caída, Bas. y Dac= Basaltos y dacitas, C. Andesíticos= Conos andesíticos, Dom. Dac. Y Riol.= Domos dacíticos y riolíticos.

Figura 5.7. Distribución de los sitios registrados en campo de *Pinus martinezii* por clases geológicas.

Pendiente. *Pinus martinezii*, se distribuye desde zonas con terreno sin inclinación, hasta las que tienen pendientes por encima de los 23°. El 48% de los sitios se registra en pendientes moderadas, que van de 8 a 16°, seguido por los ubicados en pendientes ligeras, con inclinación de 4 a 8° (27.6%) (Figura 5.8). Cabe mencionar que este factor no se considera restrictivo en la distribución de este árbol, sin embargo, puede favorecer a la especie en algunos procesos como la competencia interespecífica dentro de la comunidad.

Exposición. Los registros de los sitios comprenden todas las clases existentes en este factor, además de que no muestran un patrón definido, por lo que no se le considera determinante en la distribución de la especie. Sin embargo, la mayor

afinidad de *P. martinezii* fue para las laderas con exposición noroeste (24.1%) y sureste (20.7%) (Figura 5.9).

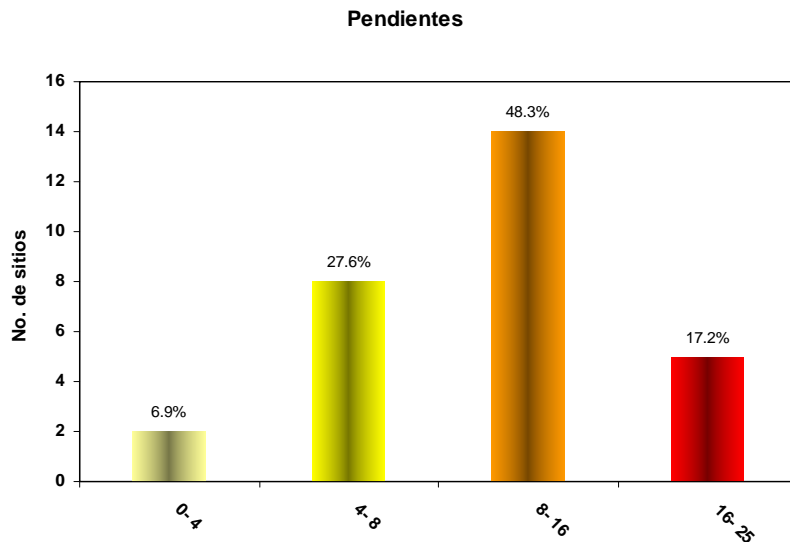


Figura 5.8. Distribución de los sitios registrados en campo de *Pinus martinezii* por clases de pendientes.

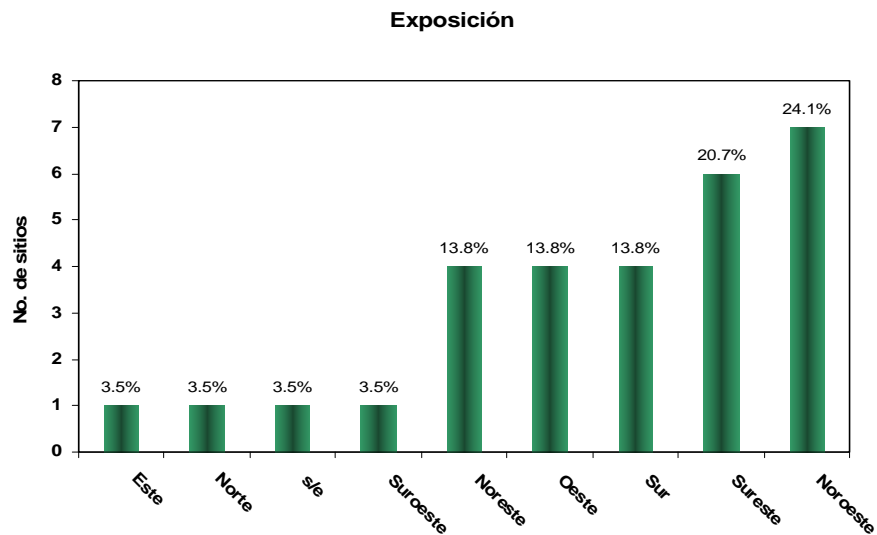


Figura 5.9. Distribución de los sitios registrados en campo de *Pinus martinezii* por clases de exposición de ladera.

Precipitación anual. En los sitios muestreados este factor se ha registrado con un intervalo desde 1,013 hasta 1,499 mm. La mayoría de ellos se ubica en los valores más bajos, donde la variación en la precipitación oscila entre 1,000 y 1,050 mm

(44.8%), mientras que el resto se distribuye casi en forma homogénea en las zonas de mayor humedad (Figura 5.10).

Temperatura media anual. En este caso se registra un rango de tolerancia de 11.6 a 15.54 °C, y la mayoría de las poblaciones analizadas se distribuyen en zonas con temperatura media anual de 15 a 15.5°C (Figura 5.11).

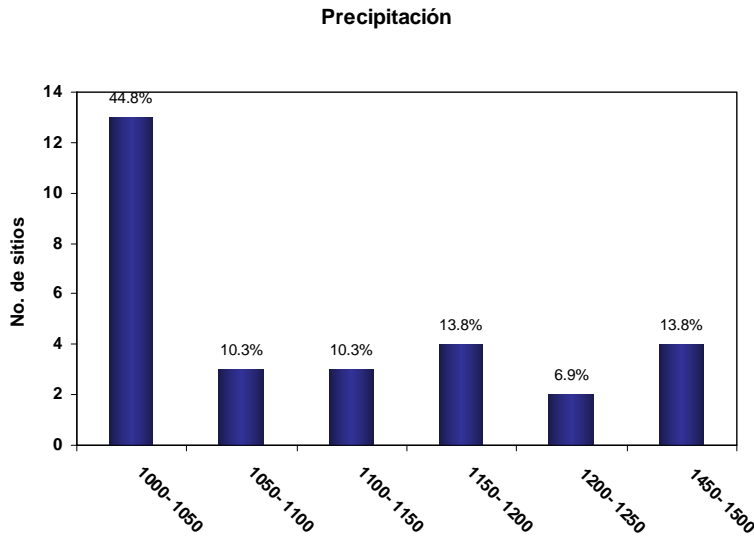


Figura 5.10. Distribución de los sitios registrados en campo de *Pinus martinezii* por rangos de precipitación anual.

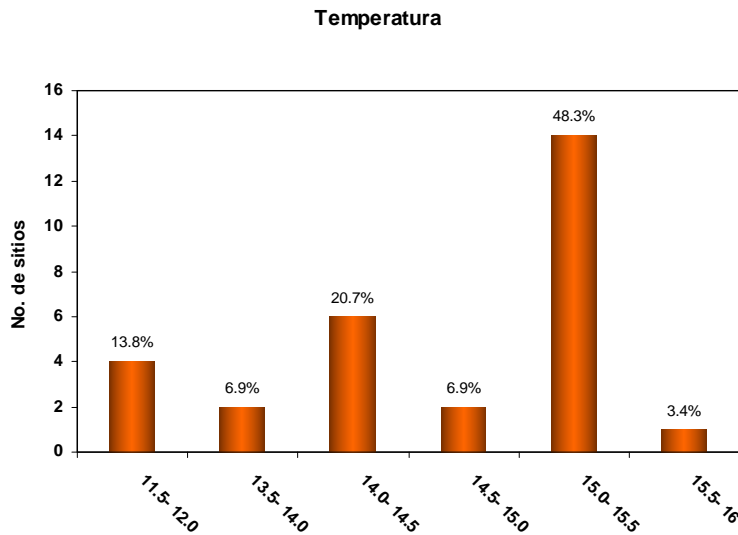


Figura 5.11. Distribución de los sitios registrados en campo de *Pinus martinezii* por rangos de temperatura media anual.

5.5.2. Modelo de distribución potencial de *Pinus martinezii*

Se realizaron tres diferentes modelos de distribución potencial, agrupándose los factores ambientales en tres principales criterios: altimétrico, geopedológico y climático. Estos fueron normalizados, priorizados y finalmente agregados (Geneletti 2007). La normalización fue efectuada a través del modulo de Análisis Multicriterio de ILWIS, el cual asigna un rango de entre uno (máximo deseable) hasta cero (mínimo deseable).

5.2.2.1. Estandarización de los criterios

A continuación se refieren los métodos de asignación de pesos y los valores de estandarización de los criterios para los tres modelos de Análisis Multicriterio. Para realizar esta ponderación se tomo en cuenta que aunque los factores climáticos son muy importantes para el desarrollo de las poblaciones de *Pinus martinezii*, estos están altamente correlacionados con el mapa de altitud, que ya está considerado como parte de los factores físicos y debido a esto se les asignó un peso más bajo.

Modelo 1. Para la elaboración de este modelo se utilizó el método jerárquico, asignándole un mayor peso al criterio geopedológico, seguido por el altimétrico y en última instancia al climático, la ponderación de los valores fueron asignados directamente por el modulo de Análisis Multicriterio de ILWIS (Figura 5.12).

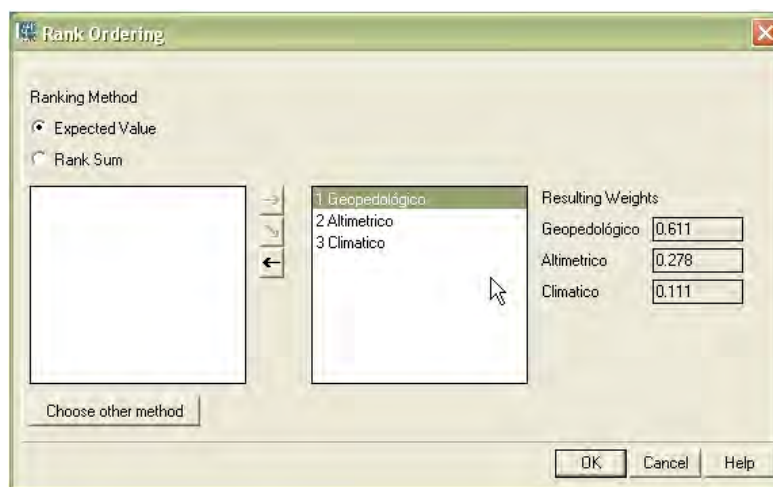


Figura 5.12. Normalización de los criterios del *Modelo 1* mediante el método jerárquico, utilizando el modulo de Análisis multicriterio de ILWIS.

Modelo 2. Se efectuó una comparación pareada para la priorización de los criterios, considerando al criterio Geopedológico como el más importante, posteriormente el Altimétrico y por último el Climático (Figura 5.13). La comparación se realizó con el modulo Multicriterio de ILWIS, realizando la estandarización de los criterios de la siguiente manera: el criterio Geopedológico es (0.77) “*muy fuertemente más importante que*” el Altimétrico (0.17); el Geopedológico es (0.77) “*extremadamente más importante que*” el Climático (0.05); y el Altimétrico es (0.17) “*fuertemente más importante que*” el Climático (0.05).

Modelo 3. Este modelo se realizó mediante la comparación pareada, asignando la misma importancia a los criterios, pero con diferencia en los pesos (Figura 5.13). La priorización de los criterios fue efectuada de la siguiente manera: el criterio Geopedológico es (0.74) “*muy fuertemente más importante que*” el Altimétrico (0.20); el Geopedológico es (0.74) “*muy fuertemente más importantes que*” el Climático (0.06); y el Climático es (0.06) “*muy fuertemente menos importante que*” el Altimétrico (0.20).

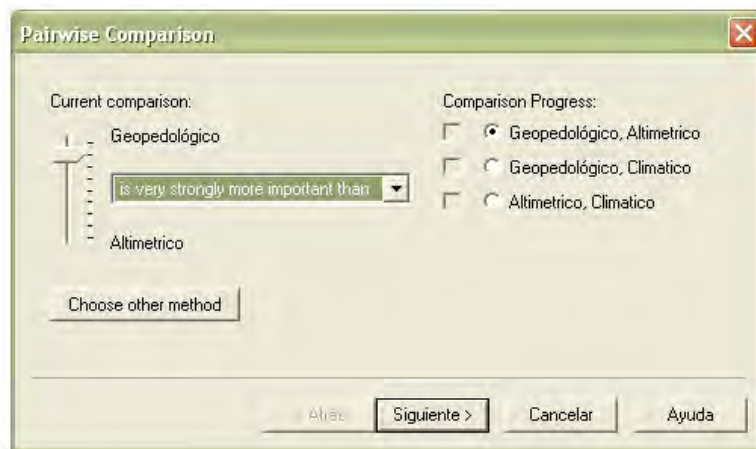


Figura 5.13. Normalización de los criterios de los *Modelos 2 y 3* mediante comparación pareada utilizando el modulo de Análisis Multicriterio de ILWIS.

5.2.2.2. Estandarización de los factores

La estandarización de los factores se utilizó el método jerárquico, estableciendo una prioridad basada en la distribución de *P. martinezii*, asignándole el valor más alto al factor de mayor importancia, para esto se utilizó modulo Multicriterio de ILWIS obteniendo tres modelos basados en escenarios distintos (Cuadro 5.9).

5.2.2.3. Estandarización de los atributos

En la normalización de los atributos se aplicó también el método de categorías en aquellos mapas que están estructurados en sus tablas de atributos en clases. Con este propósito se utilizaron datos obtenidos del perfil bioclimático, en el cual se obtienen el número de registros de *P. martinezii* en campo para cada una de estas clases. Para la estandarización de los pesos se utilizó el módulo de Análisis Multicriterio de ILWIS, por medio de este se asigna un valor de uno para la clase con más registros y de cero para aquellas en donde existe registro de la especie, posteriormente los demás pesos son asignados en un gradiente de acuerdo a este rango de valores (Mendoza y Macoun 1999) (Cuadro 5.10).

Cuadro 5. 9. Acomodo de los factores con relación a su importancia jerárquica y valores estandarizados para los tres Modelos, basados en tres escenarios distintos.

CRITERIOS	MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3	
	<i>(VALORES ESTANDARIZADOS)</i>					
GEOPEDOLÓGICO	Suelos	<i>(0.61)</i>	Suelos	<i>(0.61)</i>	Suelos	<i>(0.61)</i>
	Geoformas	<i>(0.28)</i>	Geoformas	<i>(0.28)</i>	Geología	<i>(0.28)</i>
	Geología	<i>(0.11)</i>	Geología	<i>(0.11)</i>	Geoformas	<i>(0.11)</i>
ALTIMÉTRICO	Altitud	<i>(0.50)</i>	Pendientes	<i>(0.50)</i>	Altitud	<i>(0.61)</i>
	Pendientes	<i>(0.33)</i>	Altitud	<i>(0.33)</i>	Pendientes	<i>(0.28)</i>
	Exposición	<i>(0.17)</i>	Exposición	<i>(0.17)</i>	Exposición	<i>(0.11)</i>
CLIMÁTICO	Temperatura	<i>(0.50)</i>	Temperatura	<i>(0.50)</i>	Temperatura	<i>(0.50)</i>
	Precipitación	<i>(0.50)</i>	Precipitación	<i>(0.50)</i>	Precipitación	<i>(0.50)</i>

Para los tres factores que están constituidos como una matriz raster de valores continuos (Altitud, Precipitación y Temperatura), se estandarizaron los valores mediante una función de curva cóncava de costo beneficio, en donde los pesos más altos alcanzan el valor 1 y los bajos 0, generándose a partir de estos los valores intermedios.

Los valores utilizados para generar la estandarización de los atributos continuos en el módulo de Análisis Multicriterio de ILWIS, corresponden a la media

estadística y a los valores mínimos y máximos, los cuales fueron obtenidos a partir del perfil bioclimático de la especie. (Figuras 5.14, 5.15 y 5.16).

Cuadro 5. 10. Obtención de los valores normalizados de los atributos mediante el método de categorías con base en los datos obtenidos en el perfil bioclimático.

	CLASES	REGISTROS	PESO
SUELO	Luvisoles	12	0.706
	Andosoles	17	1.0
GEOLOGIA	Depósitos superficiales	1	0.1
	Depósitos de caída	2	0.2
	Basaltos y dacitas	4	0.4
	Conos andesíticos	6	0.6
	Domos dacíticos y riolíticos	6	0.6
	Ignimbritas	10	1.0
GEOFORMAS	Complejos cumbrales de lomeríos altos	3	0.158
	Complejos de laderas de colinas	3	0.158
	Complejos de laderas de montañas	4	0.211
	Complejos de laderas de lomeríos altos	19	1.0
PENDIENTES	0- 4	2	0.143
	4- 8	8	0.571
	8- 16	14	1.0
	16- 25	5	0.357
EXPOSICIÓN	Este	1	0.143
	Norte	1	0.143
	s/e	1	0.143
	Suroeste	1	0.143
	Noreste	4	0.571
	Oeste	4	0.571
	Sur	4	0.571
	Sureste	6	0.857
	Noroeste	7	1.0

5.5.2.4. Agregación de los Factores en el Análisis Multicriterio

Una vez normalizados y priorizados los criterios, factores y sus atributos, se elaboraron los árboles de decisiones para los tres modelos, asignando los pesos a cada uno de los mapas en la interfase del Modulo de Análisis Multicriterio del programa ILWIS, para obtener como resultado final los mapas de distribución potencial de *Pinus martinezii*, obtenidos a partir de la sumatoria lineal de los pesos (Paegelow *et al.* 2003) (Figuras 5.17, 5.18 y 5.19).

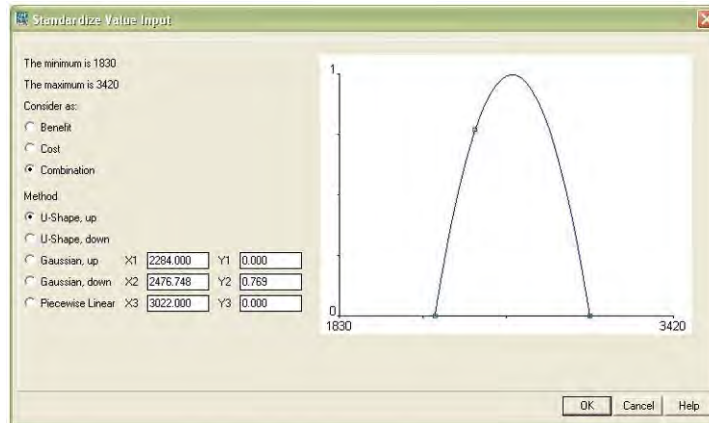


Figura 5.14. Normalización del mapa de altitud mediante el uso de una función de costo beneficio del modulo Multicriterio de ILWIS.

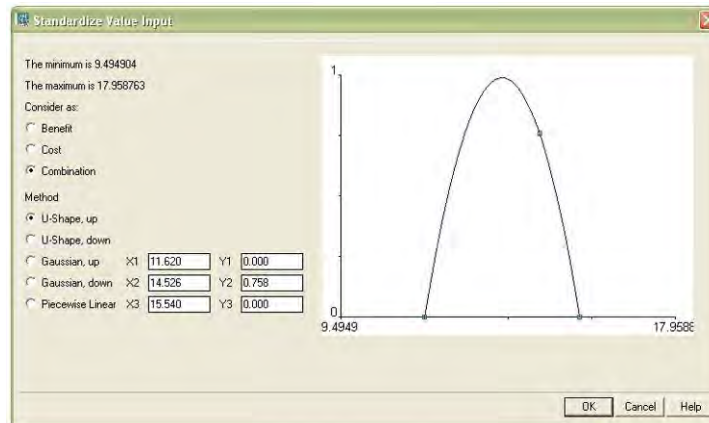


Figura 5.15. Normalización del mapa de temperatura media anual mediante el uso de una función de costo beneficio del modulo Multicriterio de ILWIS.

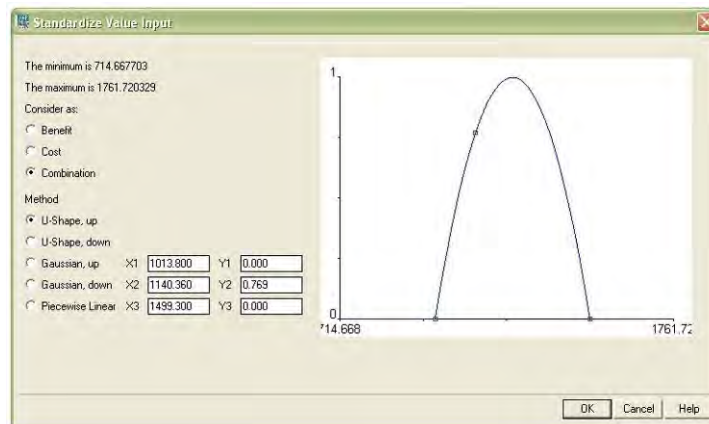


Figura 5.16. Normalización del mapa de precipitación anual mediante el uso de una función de costo beneficio del modulo Multicriterio de ILWIS.

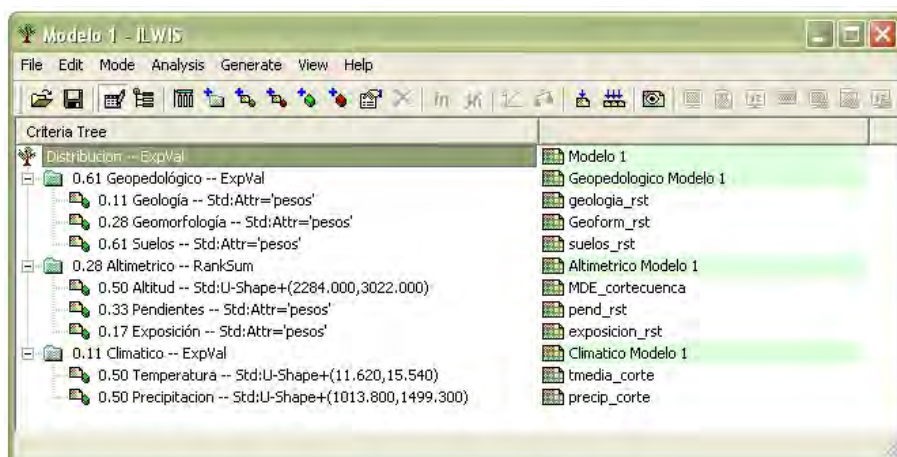


Figura 5.17. Modulo de Análisis Multicriterio de ILWIS para la obtención del mapa de distribución potencial del *Modelo 1*.

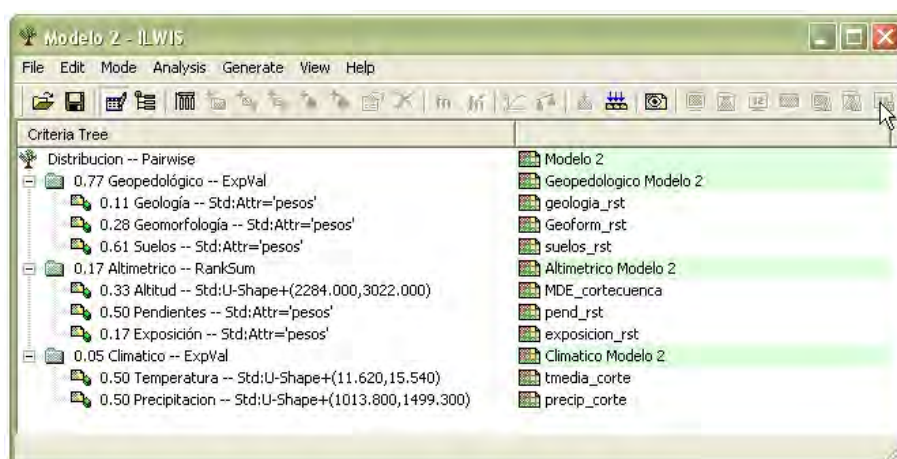


Figura 5.18. Modulo de Análisis Multicriterio de ILWIS para la obtención del mapa de distribución potencial del *Modelo 2*.

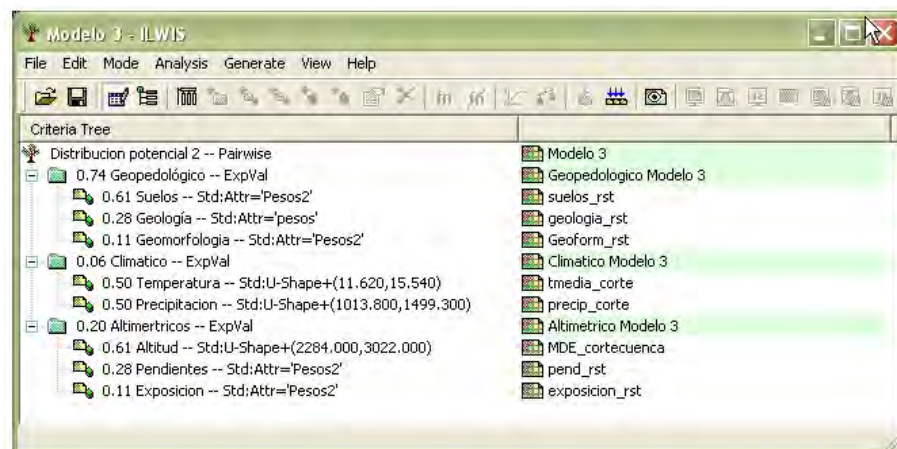


Figura 5.19. Modulo de Análisis Multicriterio de ILWIS para la obtención del mapa de distribución potencial del *Modelo 3*.

Los valores normalizados que se utilizaron para la construcción de los tres modelos de distribución potencial mediante en el Análisis Multicriterio pueden ser observados en resumen en los cuadros 5.11, 5.12 y 5.13.

Cuadro 5.11. Árbol de decisiones multicriterio del *Modelo 1*.

PESO	FACTOR	PESO	FACTOR	PESO	FACTOR	
0.61	GEOPEDELOGICOS	JERÁRQUICO	0.61	SUELOS	1.00	ANDOSOLES
					0.71	LUVISOLES
					1.00	IGNIMBRITAS
					0.6	CONOS ANDESÍTICOS
					0.6	DOMOS DACÍTICOS Y RIOLÍTICOS
					0.4	BASALTOS Y DACITAS
				0.2	DEPÓSITOS DE CAÍDA	
				0.1	DEPÓSITOS SUPERFICIALES	
				1.00	COMPLEJOS DE LADERAS DE LOMERÍOS ALTOS	
				0.21	COMPLEJOS DE LADERAS DE MONTAÑAS	
				0.16	COMPLEJOS CUMBRALES DE LOMERÍOS ALTOS	
				0.16	COMPLEJOS DE LADERAS DE COLINAS	
0.28	ALTIMETRICOS	JERÁRQUICO	0.50	ALTITUD	FUNCIÓN COSTO BENEFICIO	
					1.00	8- 16
					0.57	4- 8
					0.36	16-25
					0.14	0-4
					1.00	NOROESTE
				0.86	SURESTE	
				0.57	NORESTE	
				0.57	OESTE	
				0.57	SUR	
				0.14	ESTE	
				0.14	NORTE	
		0.14	S/E			
		0.14	SUROESTE			
0.11	CLIMATICOS	JERÁRQUICO	0.50	PRECIPITACION	FUNCIÓN COSTO BENEFICIO	
			0.50	TEMP MEDIA		

Cuadro 5.12. Árbol de decisiones multicriterio del *Modelo 2*.

PESO	FACTOR	PESO	FACTOR	PESO	FACTOR			
COMPARACIÓN PAREADA	0.77	GEOPEDOLOGICOS	JERÁRQUICO	0.61	SUELOS	1.00	ANDOSOLES	
				0.71	LUVISOLES	1.00	IGNIMBRITAS	
				0.6	CONOS ANDESÍTICOS	0.6	DOMOS DACÍTICOS Y RIOLÍTICOS	
			0.28	GEOLOGIA	0.6	BASALTOS Y DACITAS	0.2	DEPÓSITOS DE CAÍDA
					0.1	DEPÓSITOS SUPERFICIALES	1.00	COMPLEJOS DE LADERAS DE LOMERÍOS ALTOS
					0.11	GEOFORMAS	0.21	COMPLEJOS DE LADERAS DE MONTAÑAS
	0.17	ALTIMETRICOS	JERÁRQUICO	0.50	ALTITUD	0.16	COMPLEJOS CUMBRALES DE LOMERÍOS ALTOS	
				0.16	COMPLEJOS DE LADERAS DE COLINAS	1.00	8- 16	
				0.33	PENDIENTES	0.57	4- 8	
			0.17	EXPOSICIÓN	0.36	16-25	0.14	0-4
					0.14	0-4	1.00	NOROESTE
					0.86	SURESTE	0.57	NORESTE
0.05	CLIMATICOS	JERÁRQUICO	0.50	PRECIPITACION	0.57	OESTE		
			0.57	SUR	0.57	ESTE		
			0.14	ESTE	0.14	NORTE		
			0.14	NORTE	0.14	S/E		
				0.14	SUROESTE			

Cuadro 5.13. Árbol de decisiones multicriterio del *Modelo 3*.

PESO	FACTOR	PESO	FACTOR	PESO	FACTOR	
0.74	GEOPEDELOGICOS	JERÁRQUICO	0.61	SUELOS	1.00	ANDOSOLES
			0.71		0.71	LUVISOLES
			0.28	GEOLOGIA	1.00	IGNIMBRITAS
		CATEGORIAS	0.6		0.6	CONOS ANDESÍTICOS
			0.6		0.6	DOMOS DACÍTICOS Y RIOLÍTICOS
			0.4		0.4	BASALTOS Y DACITAS
		CATEGORIAS	0.2		0.2	DEPÓSITOS DE CAÍDA
			0.1		0.1	DEPÓSITOS SUPERFICIALES
			1.00		1.00	COMPLEJOS DE LADERAS DE LOMERÍOS ALTOS
	CATEGORIAS	0.21		0.21	COMPLEJOS DE LADERAS DE MONTAÑAS	
		0.16		0.16	COMPLEJOS CUMBRALES DE LOMERÍOS ALTOS	
		0.16		0.16	COMPLEJOS DE LADERAS DE COLINAS	
0.20	ALTIMETRICOS	JERÁRQUICO	0.61	ALTITUD	FUNCIÓN COSTO BENEFICIO	
			0.28	PENDIENTES	1.00	8- 16
			0.36		0.57	4- 8
		CATEGORIAS	0.14		0.36	16-25
			0.14		0.14	0-4
			1.00		1.00	NOROESTE
	CATEGORIAS	0.86		0.86	SURESTE	
		0.57		0.57	NORESTE	
		0.57		0.57	OESTE	
		0.57		0.57	SUR	
		0.14		0.14	ESTE	
		0.14		0.14	NORTE	
0.06	CLIMATICOS	JERÁRQUICO	0.50	PRECIPITACION	FUNCIÓN COSTO BENEFICIO	
			0.50	TEMP MEDIA	0.14	S/E
	CATEGORIAS	0.14		0.14	SUROESTE	

Con base en los factores y pesos normalizados mostrados en estos árboles de decisiones se obtuvieron los mapas de distribución potenciales para cada uno de los modelos.

5.5.2.5. Mapa de distribución potencial de *Pinus martinezii*

El modelo describe la aptitud de un espacio geográfico para predecir de la presencia de una especie, las áreas que satisfacen las condiciones del nicho fundamental de la especie representan su distribución potencial, sin embargo las áreas geográficas que actualmente ocupan representan su distribución realizada.

Los mapas obtenidos a partir del Análisis Multicriterio son matrices raster de valores continuos, en donde cada píxel tiene un rango de cero (mínimo deseable) a uno (máximo deseable), que determina el potencial de ese punto en el espacio para proveer las condiciones ecológicas adecuadas para ser considerado parte del nicho ecológico fundamental de *Pinus martinezii*.

El *Modelo 1* fue descartado debido a que los valores máximos de píxel obtenidos fueron de 0.66 (Figura 5.20), los cuales corresponden al grado de aptitud de un punto en el espacio como se menciono anteriormente, otro aspecto importante que se tomó en cuenta fue que el área correspondiente a la población de Agua Zarca presentó valores de aptitud muy bajos, que de acuerdo al índice de Valor de Importancia (*VIR*) calculado es la segunda de importancia en la cuenca de Cuitzeo (Figura 5.21).

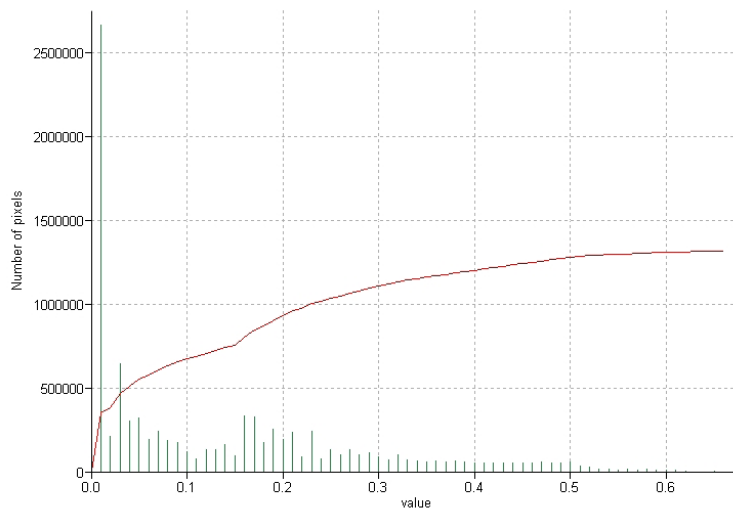


Figura 5.20. Histograma del mapa de distribución potencial de *Pinus martinezii* para el *Modelo 1*.

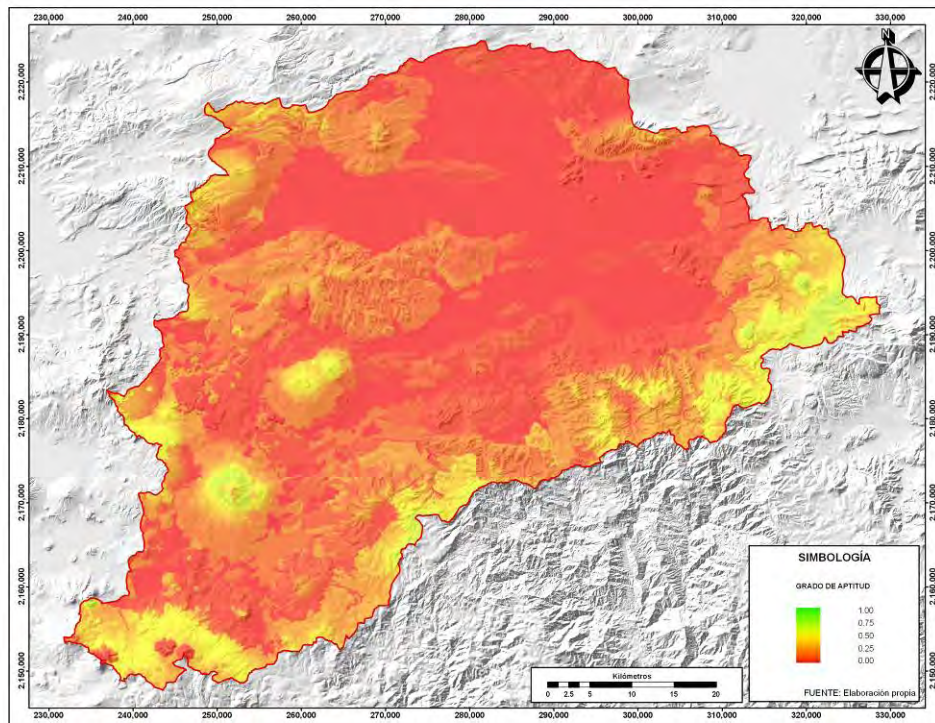


Figura 5.21. Mapa de distribución potencial de *Pinus martinezii* obtenido a partir del análisis multicriterio para el Modelo 1.

En el Modelo 2 los valores máximos de aptitud obtenidos fueron los menores de los tres con 0.63 (Figura 5.22), sin embargo cabe señalar que los valores máximos se localizan en las poblaciones de *P. martinezii* de mayor importancia en el área de estudio (Figura 5.23).

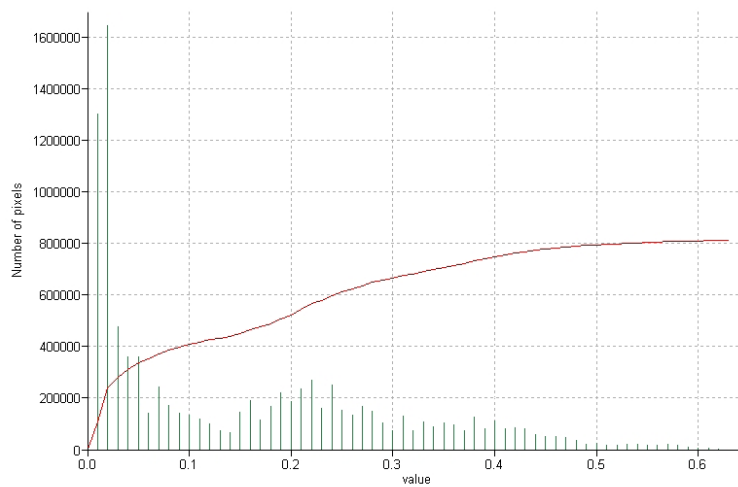


Figura 5.22. Histograma del mapa de distribución potencial de *Pinus martinezii* para el Modelo 2.

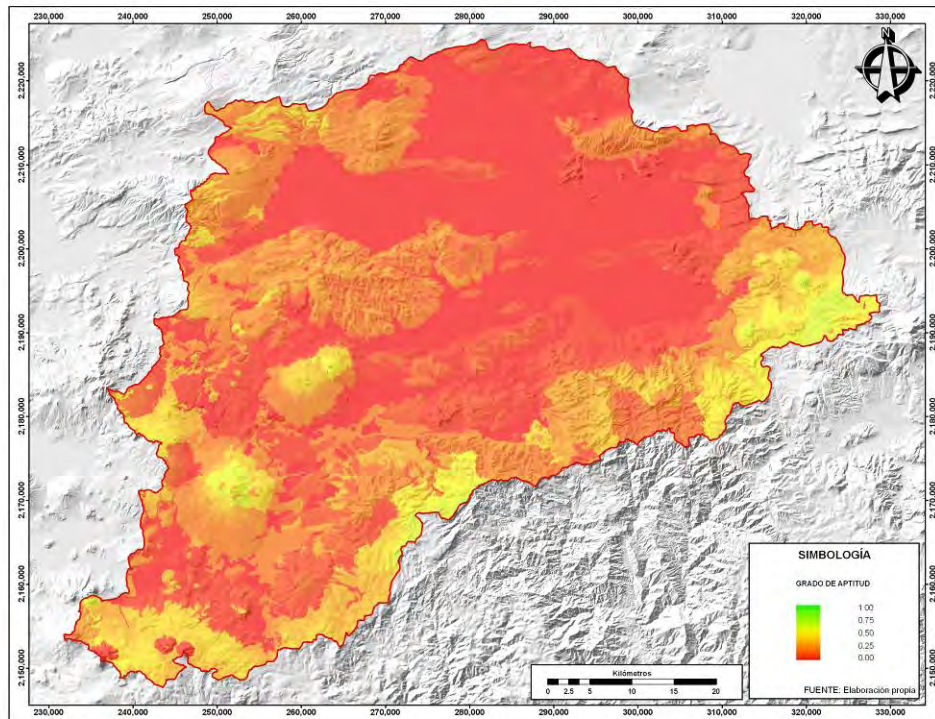


Figura 5.23. Mapa de distribución potencial de *Pinus martinezii* obtenido a partir del análisis multicriterio para el *Modelo 2*.

El Modelo 3 presentó el valor más alto de aptitud con 0.93 (Figura 5.24), cubriendo las localidades de mayor importancia de *Pinus martinezii* con relación al índice de Valor de Importancia (*VIR*), lo cual es un indicador de que se presentan las condiciones adecuadas en la zona para el nicho de la especie. Por lo tanto este mapa fue considerado para la obtención del modelo de distribución potencial final (Figura 5.25).

Posteriormente se definieron los rangos de aptitud del mapa de distribución potencial *Modelo 3*. Los umbrales fueron obtenidos a partir del histograma del modelo de distribución potencial, tomando como base la distribución de frecuencias y el rompimiento natural de la curva con respecto a las estadísticas del modelo.

Con base en el rompimiento natural de la distribución de frecuencias obtenido de las estadísticas del mapa, fueron establecidos tres rangos de aptitud, el primero de ellos agrupa los píxeles con valores de 0.67 a 0.93 considerados como “Aptitud alta”, el segundo como “Aptitud media” de 0.59 a 0.67 y los que se encuentran por debajo de estos como áreas sin aptitud (Figura 5. 26). A partir de estos rangos se generó el

mapa de distribución potencial de *P. martinezii*, con base en niveles de aptitud, el cual refleja la presencia de las condiciones ambientales propicias para el nicho ecológico fundamental de la especie (Figura 5.27) (Anexo 5.2).

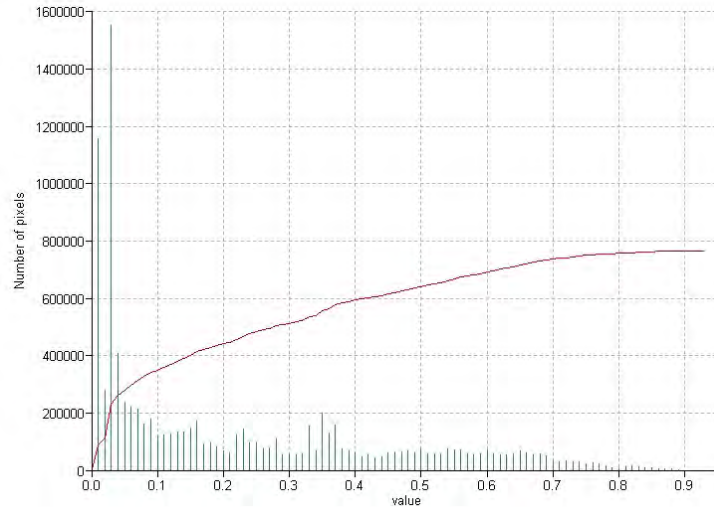


Figura 5.24. Histograma del mapa de distribución potencial de *Pinus martinezii* para el Modelo 3.

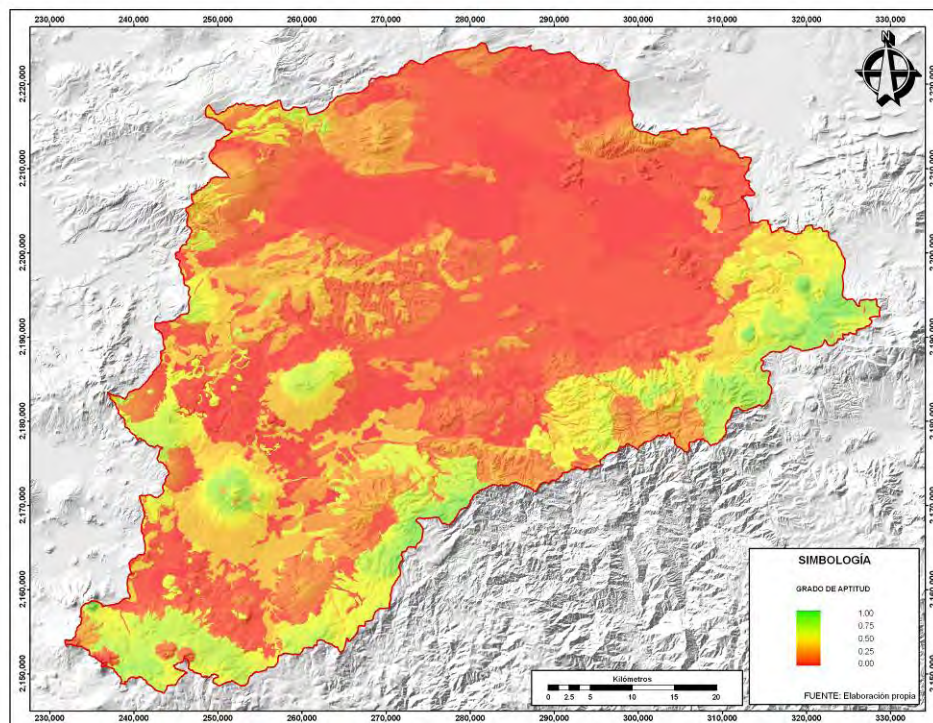


Figura 5.25. Mapa de distribución potencial de *Pinus martinezii* obtenido a partir del análisis multicriterio para el Modelo 3.

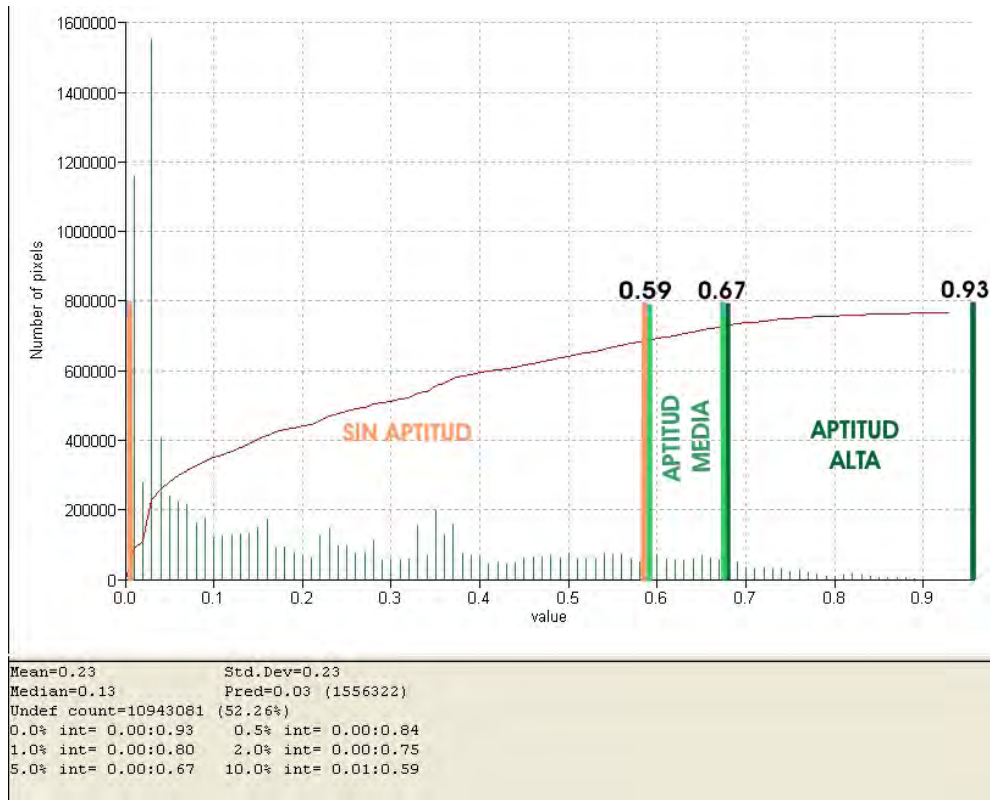


Figura 5.26. Histograma generado en ILWIS con base en el mapa de distribución potencial del *Modelo 3* para el establecimiento de rangos de aptitud.

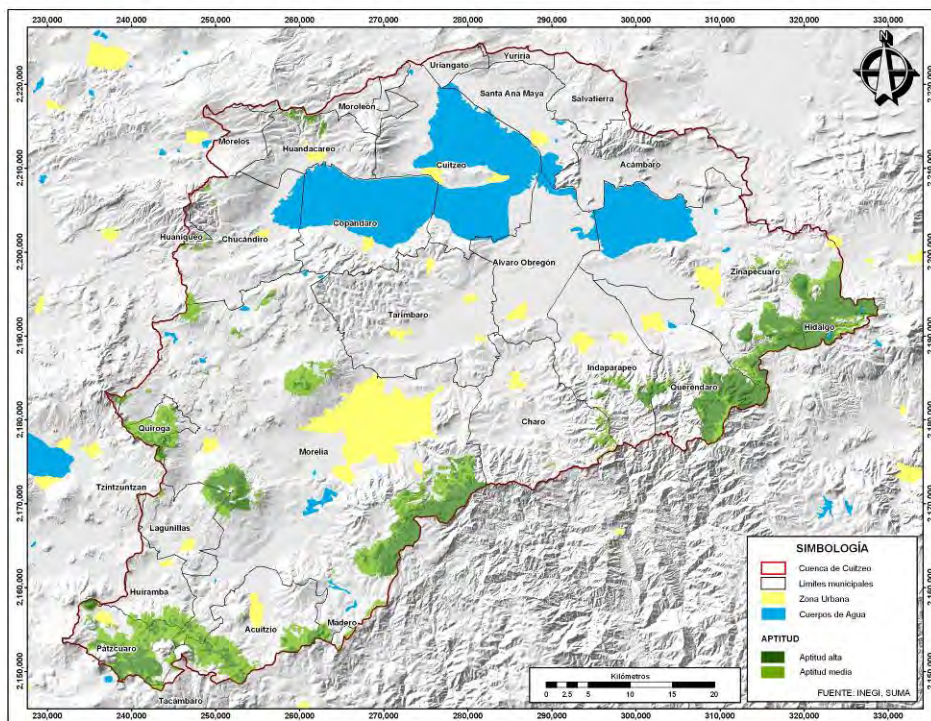


Figura 5.27. Mapa de distribución potencial de *Pinus martinezii*.

El mapa de distribución potencial muestra que el área de aptitud alta con mayor extensión en la cuenca corresponde a porción oriente de la cuenca, que comparten los municipios de Zinapécuaro e Hidalgo. En esta zona se encuentran las localidades de Nueva Victoria considerada como la más importante de acuerdo al *VIR*, Laguna Verde y Cerro Mozo. En esta área existe una mayor proporción de zonas de aptitud alta en relación a las de aptitud media (Anexo 5.3).

De acuerdo con el mapa de distribución potencial, la localidad de Nueva Victoria está localizada en un área con aptitud alta para el desarrollo de *Pinus martinezii*, lo cual concuerda con el *VIR* que se determinó con base en los registros de campo, ya que se observó que se efectúan labores de conservación por parte de pobladores de ejido, lo que favorece la obtención de un valor de importancia alto.

En el caso de la localidad de Laguna Verde localizada en Los Azufres, es importante señalar que no fue una de las localidades con *VIR* más altos por la baja densidad de individuos ocasionado por la extracción de madera; sin embargo, de acuerdo al modelo de distribución potencial existen las condiciones ambientales adecuadas para un desarrollo óptimo de las poblaciones de *P. martinezii*, lo anterior fue constatado en campo al registrar los individuos con DAP más elevados.

En el Cerro Mozo se encuentran zonas aptas cercanas a los sitios de muestreo y medianamente aptas en la parte alta de esta estructura, en donde no se observaron árboles de esta especie en las excursiones realizadas. Las condiciones de esta localidad fueron afectadas por un incendio que ocurrió años atrás que acabó casi en su totalidad con el bosque, por lo que es un área en el que pueden encontrarse ahora algunos individuos aislados de *P. martinezii*.

La segunda zona de importancia para la distribución de la especie, es la porción sureste del municipio de Morelia, donde se encuentra la localidad de Agua Zarca considerada la segunda en condiciones de conservación de acuerdo al Valor de Importancia (*VIR*), formando una franja en forma de corredor en la parte alta de las Calderas La Escalera y Atécuaro. Hacia el sur de la cuenca se encuentran áreas de

aptitud media aisladas, las cuales pueden representar un potencial para el hallazgo de nuevas poblaciones de *P. martinezii* (Anexo 5.4).

La localidad El Temascal y La Joya no fueron representadas en el modelo de distribución potencial, lo cual puede ser un indicativo que en este lugar existen condiciones muy diferentes a las demás localidades muestreadas y a la pobre representatividad de los sitios muestreados debido al grado de alteración. En términos de conservación este aspecto puede ser muy importante ya que al presentar estas diferencias, es posible que sea la localidad más susceptible a disturbios y con mayores dificultades para la reintroducción de individuos, lo cual se torna importante al observar la tala selectiva sobre esta especie detectada en el trabajo de campo.

Existen áreas aisladas consideradas por el modelo de distribución potencial en donde no se han registrado localidades de *P. martinezii* sobre todo en la porción norte y poniente de la cuenca (Anexo 5.5). Esto indica que existen las condiciones para el desarrollo de poblaciones, pero que la dispersión de la especie ha estado determinada por barreras biogeográficas o competencia interespecífica. Esto está relacionado con el concepto de nicho fundamental, que es el obtenido a partir del modelo de distribución potencial pero que la distribución real de la especie está limitada por la interacción, lo que restringe su distribución a un espacio conocido como nicho realizado (Hutchinson 1957, Stockman *et al.* 2006).

5.5.3. Confiabilidad del modelo

La confiabilidad del modelo se estimó utilizando los puntos de ocurrencia de 16 poblaciones de *Pinus martinezii* registradas por Silva (2005) para la cuenca de Cuitzeo (Anexo 5.6). Para realizar esta prueba se efectuó la sobreposición de los puntos con el mapa de distribución potencial; a partir de este procedimiento se observó que trece de los sitios están en zonas de aptitud del modelo, mientras que solo tres de estas caen en áreas sin aptitud (Cuadros 5.14 y 5.15).

Cuadro 5.14. Localidades registradas por Silva (2005) que no fueron consideradas en las zonas con aptitud del modelo de distribución potencial.

LOCALIDAD	MUNICIPIO	COORDENADAS UTM	
		X	Y
Ejido Irapeo	Charo	284,393	2,172,954
Cañada de Oztumatlán	Queréndaro	304,708	2,182,694
La Joya	Morelia	267,589	2,156,006

Cuadro 5.15. Localidades registradas por Silva (2005) consideradas en las zonas con aptitud del modelo de distribución potencial.

LOCALIDAD	MUNICIPIO	COORDENADAS UTM	
		X	Y
La Leonera	Morelia	279,302	2,169,375
Rincón del Burro	Zinapécuaro	315,868	2,185,518
Los azufres	Zinapécuaro	328,249	2,193,671
La Lobera	Morelia	277,047	2,168,706
El Zarate	Morelia	278,017	2,170,564
Ejido Atécuaro	Morelia	269,413	2,163,714
El Laurelito	Morelia	279,193	2,172,669
Agua Zarca	Morelia	278,046	2,168,542
Nueva Victoria	Queréndaro	314,618	2,185,457
Milpillas	Queréndaro	303,664	2,181,035
San Pedro Jacuáro	Hidalgo	314,618	2,185,457
Cerro Mozo	Zinapécuaro	318,798	2,196,111
Laguna Verde	Zinapécuaro	328,403	2,194,154

De las trece localidades que fueron consideradas por el modelo, doce se encuentran en la clase “Aptitud alta”, mientras que solo el sitio de Milpillas pertenece a “Aptitud media”. Estos resultados indican, que se obtuvo un 81.25% de confiabilidad en el modelo, el cual es un porcentaje considerado aceptable para un modelo de distribución potencial (Stockwell y Townsend 2002).

Es necesario tomar en cuenta, que el método utiliza únicamente datos de presencia de la especie, por lo que únicamente se cuantificó el error de omisión, ya que las áreas en las que se predice la presencia de las especie en los modelos de distribución potencial son típicamente más grandes que sus distribuciones realizadas, debido a diversos factores que impiden su dispersión como las barreras geográficas, interacciones bióticas y las modificaciones humanas al ambiente, por lo que pocas especies ocupan todas las áreas que satisfacen los requerimientos de su nicho. En

dado caso, si fuera necesario mapear la distribución realizada de una especie a partir de un modelo de distribución potencial, sería a través de la remoción de áreas en las que se infiere que la especie no puede habitar ya sean factores geográficos o zonas inhabitadas debido a las interacciones bióticas.

Por otro lado, los modelos de distribución potencial pueden ser una herramienta muy importante para inferir la distribución actual para propósitos de conservación, en donde pueden combinarse las coberturas de uso del suelo a partir de sensores remotos, para excluir áreas altamente alteradas como la deforestación.

5.5.4. Zonas potenciales para el desarrollo de *Pinus martinezii*

Para determinar las áreas para la conservación y reforestación con esta especie, se realizó una sobreposición cartográfica del mapa de distribución potencial con el mapa de cambios obtenido a partir de la cobertura y uso del suelo para los años 1975 y 2000 (López y Bocco 2001). Para este proceso únicamente fueron consideradas las áreas muy aptas para la especie en el mapa de distribución potencial, debido a que más del 90% de los sitios de colecta y verificación se distribuyen en esta clase.

5.5.4.1. Zonas potenciales para reforestación con *Pinus martinezii*

Se detectaron las zonas para reforestación con *Pinus martinezii* tomando como base la zona de aptitud más alta del modelo de distribución potencial. Existen diferencias entre los mapas de reforestación obtenidos y lo que se registra en campo, lo cual es debido a que el insumo más reciente para realizar el mapa de cambio de cobertura es del año 2000 y los procesos de extracción de madera clandestina en la mayoría de las localidades visitadas es reciente y se presenta de manera acelerada, por lo que no existe registro en dicha cartografía y por lo tanto no aparecen en el mapa de zonas potenciales para reforestación; sin embargo, se hace énfasis en el presente trabajo como un aspecto a tomarse en cuenta para llevar acciones de reforestación.

En todas las localidades visitadas existe extracción de madera en diferentes grados, por lo que es necesario llevar a cabo labores de reforestación, ya sea mediante el establecimiento de viveros que garanticen el abastecimiento de plántulas

o por medio de regeneración natural. Sin embargo, cuando se realiza la tala de manera clandestina es muy poco probable que ocurra cualquiera de estos dos escenarios, por lo que es un problema que se debe atacar ejerciendo acciones de manera organizada con las localidades de la región.

Los resultados obtenidos mostraron que las localidades de El Cerro Mozo y Laguna Verde son las que requieren de acciones de reforestación debido a sus condiciones de deterioro. También existen diversas áreas en la porción oriente de la cuenca donde se presentan las condiciones ecológicas adecuadas para el desarrollo de la especie con base en el nicho ecológico fundamental y se ha perdido cobertura de bosque y que pueden ser reforestadas de manera exitosa (Anexo 5.7)

En el Cerro Mozo es necesaria una reforestación, sin embargo hay que tomar en cuenta otros factores como la pérdida de suelo por la erosión, ya que esta puede ser determinante en el establecimiento de un programa de esta naturaleza en este sitio. En esta localidad se encontraron muy pocos individuos de *Pinus martinezii*, debido a esto se podrían utilizar semillas de una localidad cercana, como la de Nueva Victoria que presenta un perfil bioclimático similar al de este lugar y presentó el índice de Valor de Importancia más alto, lo que es un indicativo de las buenas condiciones fisiológicas de los individuos del lugar.

En Laguna Verde se detectó una zona que es susceptible a reforestación según el mapa obtenido; sin embargo, en el recorrido a campo se pudieron localizar muy pocos individuos en toda el área, por lo que se considera necesario llevar a cabo acciones inmediatas de reforestación. Esta región presenta condiciones muy favorables para el establecimiento de *P. martinezii*, y en dado caso de no poder contar con los suficientes individuos en el área para el establecimiento de un banco de semillas, puede recurrirse también a la población de Nueva Victoria.

En la localidad del Temascal no fue representada en el modelo de distribución potencial y por lo tanto en el mapa de zonas de reforestación, pero es necesario efectuar una reforestación con la especie, pues mediante los recorridos de campo se pudo observar que la población de este lugar esta sujeta a una tala selectiva, dejando

muy pocos individuos en pie para una regeneración natural. El problema al que pudiera enfrentarse esta localidad es debido a su lejanía geográfica con respecto a los demás sitios, lo que refleja también sus diferencias en las condiciones ambientales. A pesar de esto, se puede considerar que existe una afinidad con el perfil ecológico de la localidad de Nueva Victoria por lo que podría ser un referente para el establecimiento de una plantación.

La localidad de La Joya tampoco fue representada en el modelo de distribución, pero debido a que también presentó graves disturbios por extracción de madera que incluso impidieron el registro de información en el momento de los recorridos de campo, se recomienda realizar una reforestación con *P. martinezii* basado en el sitio de colecta. En el caso particular de esta localidad no se cuenta con suficiente información para determinar si existe material para el establecimiento de un banco de semillas, pero en dado caso puede utilizarse germoplasma de la comunidad de Agua Zarca por su cercanía y similitud ecológica. En las zonas cercanas a esta última localidad se ubicaron individuos aislados, lo que indica que quizá anteriormente era una población que presentaba continuidad con la de Agua Zarca. Tomando en cuenta este hecho, se recomienda utilizar esta especie para fines de reforestación para esta zona con semillas provenientes de la localidad de Agua Zarca, que presentó un índice de Valor de Importancia alto debido a sus condiciones ecológicas, por otro lado, en esta localidad se presentan manchones aislados potenciales para la reforestación lo que es un indicativo de las condiciones de conservación del lugar (Anexo 5.8).

5.5.4.2. Zonas potenciales para la conservación de *Pinus martinezii*

Las zonas que aparecen como áreas de conservación son aquellos bosques que han permanecido o se han recuperado y que presentan una aptitud alta, por lo que puede realizarse también reforestación en caso de existir un cambio de uso del suelo o incluso el establecimiento de una plantación con fines forestales. También indican una probabilidad de encontrar poblaciones de *P. martinezii* en futuras exploraciones ya que se encuentran las condiciones ambientales adecuadas para su desarrollo.

Dentro de las localidades de muestreo que aparecen como áreas aptas para la conservación se encuentran Agua Zarca, Nueva Victoria, Cerro Mozo y Laguna Verde. Las dos primeras presentan condiciones estables, por lo que para su mantenimiento es suficiente con un buen manejo orientado al aprovechamiento sustentable, lo que concuerda con lo observado en campo y con el índice de Valor de Importancia. Cerro Mozo y Laguna Verde son localidades que presentan rodales de conservación, sin embargo es necesario realizar un trabajo más a detalle pues estas zonas han sido sujetas a disturbios en años recientes (Anexo 5.9 y 5.10).

5.6. Conclusiones

De acuerdo a los perfiles bioclimáticos obtenidos para *Pinus martinezii* basados en las colectas realizadas en la cuenca de Cuitzeo en el presente trabajo, la especie se distribuye desde los 2,284 y 3,022 metros de altitud, principalmente en suelos Andosoles y Luvisoles, en geoformas compuestas principalmente por complejos de laderas de lomeríos altos, el sustrato geológico de mayor ocurrencia para la especie es de ignimbritas, domos dacíticos y riolíticos y conos andesíticos, en pendientes que van de suaves a moderadas. Esta información permite conocer aspectos sobre los rangos de tolerancia de la especie hacia los factores físico geográficos y de esta forma determinar la manera en que estos influyen en su distribución. Lo que constituye una herramienta de utilidad para efectuar acciones de reforestación y sitios de colecta de semilla para el establecimiento de viveros.

La información generada en el perfil bioclimático de *P. martinezii* fue de utilidad al efectuar el análisis multicriterio para el modelamiento del nicho ecológico fundamental de esta especie en los SIG. El análisis multicriterio constituye una herramienta que puede ser utilizada para la obtención de modelos de distribución espacial, sin embargo se requiere un conocimiento previo de la distribución y las condiciones de la especie, ya que la asignación de pesos y de los umbrales de aptitud constituyen una fase crítica de la metodología y son determinados por el especialista.

El modelo de distribución potencial, predice la aptitud de un punto en el espacio para *P. martinezii* en función de las variables ambientales utilizadas. Se realizaron tres modelos de distribución basados en diferentes árboles multicriterio y

los valores más altos de aptitud fueron mostrados por el Modelo 3 que a su vez presentó un 81.25% en la prueba de confiabilidad.

El modelo de distribución potencial representa el nicho fundamental de la especie, que consiste en un conjunto de condiciones que le permite sobrevivir, por lo tanto el nicho realizado o distribución actual puede ser más pequeño ocupando solo una parte del nicho fundamental. Esta diferencia puede ser debida a factores entre las que se encuentran: 1) la influencia humana como el aprovechamiento, el cambio de uso del suelo y los incendios; 2) las interacciones bióticas como la competición interespecífica con otros pinos y encinos; 3) las barreras geográficas como la presencia de planicies en la cuenca y las diferentes formaciones geológicas que han impedido la dispersión y colonización de nuevas áreas limitando su distribución.

En el mapa de nicho ecológico fundamental de la especie, se pueden observar dos regiones de distribución, la primera de ellas localizada en la porción Oriente de la cuenca, en donde se encuentran las localidades de Nueva Victoria, Laguna Verde y Cerro Mozo. La segunda zona de distribución importante se encuentra al sur del municipio de Morelia constituida por Agua Zarca y otras localidades como Ejido Atécuaro que no fueron registradas en el presente trabajo debido a que el tamaño poblacional es no significativo. Entre estas dos zonas de distribución se muestra un área sin aptitud para la distribución de la especie, la cual puede ser atribuida a factores geopedológicos como los suelos, las geoformas y la geología.

En la porción sur de la cuenca se muestra un área de aptitud media para *P. martinezii*, sin embargo en esta zona no hay registros de la especie, esto puede representar que existen las condiciones ambientales propicias para el establecimiento de la especie, pero que existen barreras que han impedido su distribución. Otras de las zonas consideradas con aptitud sin la presencia del pino son los volcanes Cerro del Águila y El Quinceo y otras áreas al norte de la cuenca; una explicación que pudiera formularse es que estas formaciones geológicas son más actuales y que la planicie de la cuenca se ha constituido como una barrera biogeográfica natural para su distribución.

Este mapa constituye una herramienta importante para realizar labores de conservación y reforestación, pues toma en cuenta diversos factores ambientales que determinan la aptitud del territorio para la especie. Representa también una herramienta útil para futuras exploraciones en busca de nuevas localidades de *P. martinezii* que no han sido registradas, así como la introducción de esta especie en sitios que presentan las condiciones ambientales idóneas.

Se determinó que las localidades susceptibles a la reforestación en orden de importancia debido a las condiciones de disturbio son: La Joya, Laguna Verde, Cerro Mozo y El Temascal; sin embargo fueron detectadas diversas áreas en donde los bosques que han sido objeto de degradación o cambio de uso del suelo, que presentan aptitud para realizar labores de reforestación ya sea con fines de restauración o para el establecimiento de plantaciones forestales.

En las localidades que se pueden llevar a cabo acciones de conservación son Nueva Victoria y Agua Zarca, debido a que por sus condiciones solo se requiere un manejo forestal orientado al aprovechamiento sustentable. Cabe señalar que existen rodales de aprovechamiento en los que pueden ser introducidos individuos de esta especie para atenuar la erosión del suelo.

Con base en el análisis realizado en el perfil bioclimático de las localidades de *P. martinezii* y el modelo de distribución potencial, se determinó que los sitios óptimos para la colecta de semillas y establecimiento de viveros son las localidades de Nueva Victoria, Agua Zarca y Laguna Verde.

5.7. Literatura citada

- Al-Zu'bi, Y.A.** 2007. Application of Multicriteria Analysis for Ranking and Evaluation of Waste Water Treatment Plants and its Impact on the Environment and Public Health: Case Study from Jordan. *Journal of Applied Sciences Research*, 3(2): 155-160.
- Anderson, R. P., Peterson, A. T. y Gómez-Laverde, M.** 2002. Using niche-based GIS modeling to test geographic predictions of competitive exclusion and competitive release in South American pocket mice. *Oikos* 98: 3–16.

- Bonham- Carter, G.F.** 1994. Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS. Pergamon. Geological Survey of Canada. Canada.
- Chapman, S.B.** 1976. Methods in Plant Ecology. Blackwell Scientific Publications. Osney Mead, Oxford. New York.
- Chefaoui, R. y J. M. Lobo.** 2008. Assessing the effects of pseudo-absences on predictive distribution model performance. *Ecological Modelling*. 210: 478- 486.
- Cox, B y D. Moore.** 1994. Biogeography, an ecological and evolutionary approach. Blackwell Scientific Publications, Oxford. London.
- Finch, J.M., Samways, M.J., Hill, T.R., Piper, S.E. y Taylor, S.** 2005. Application of predictive distribution modeling to invertebrates: Odonata in South Africa. *Biodiversity and Conservation* (2005) 00:1–13.
- Fischer, J., Lindenmayer, D.B., Nix, H.A., Stein, J.L. y Stein, J.A.** 2001. Climate and animal distribution: a climatic analysis of the Australian marsupial *Trichosurus caninus*. *Journal of Biogeography* 28: 293-304.
- Geneletti, D.** 2007. An approach based on spatial multicriteria analysis to map the nature conservation value of agricultural land *Journal of Environmental Management*. 83: 228–235.
- Graham, C.H., Ron, S., Santos, J.C., Schneider, C.J.** 2004. Integrating Phylogenetics and environmental niche models to explore speciation mechanism in dendrobatid frogs. *Evolution*. 58(8). pp. 1781–1793.
- Guisan, A., y Zimmermann N.** 2000. Predictive habitat distribution models in ecology. *Ecological modeling*. 135: 147-186
- Hanson H., C. y E. Churchill D.** 1961. *The Plant Community*. Reinhold Publishing Corp. New York.
- Hutchinson, G. E.** 1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Sym. Quant. Biol.* 22:415–427.
- Illodi R., P., Linaje, M.A., y Sánchez- Cordero, V.** 2002. Distribución de los mamíferos terrestres en la región del Golfo de California, México. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Zoología* 73(2): 213-224.
- Keeney, R.L.** 1992. Value-focused thinking, a pad to creative decision making. Cambridge. London. Harvard University Press. 416 pp
- Jennings, M.D.** 2000. Gap analysis: concepts, methods and recent results. *Landscape ecology*. 15: 5- 20.
- López, E y G. Bocco.** 2001. Cambio de cobertura vegetal y uso del suelo. En: Mendoza, M., E. López y G. Bocco. Regionalización ecológica, conservación de recursos

naturales y ordenamiento territorial en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Informe SIMORELOS- CONACYT (Proyecto 98306024). 53- 87 pp.

- Malczewski, J.** 1997. Propagation of Errors in Multicriteria Location Analysis: A Case Study. Multiple Criteria Decision Making: Proceedings of the Twelfth International Conference. Hagen (Germany): 1995. G. Fandel, and T. Gal. Berlin: Springer-Verlag. 154-165.
- Malczewski, J.** 1999. GIS and multicriteria decision analysis. Wiley & Sons. New York. 392.
- Martínez-Meyer, E., Townsend P., A. y Hargrove W., W.** 2004. Ecological niches as stable distributional constraints on mammal species, with implications for Pleistocene extinctions and climate change projections for diobiversity.
- Mazerolle, M.J. y M.A. Villard.** 1999. Patch characteristics and landscape context as predictors of species presence and abundance: a review. *Ecoscience* 61, 117-124.
- Mendoza, G.A. y Macoun, P.** 1999. Guidelines for Applying Multi-Criteria Analysis to the Assessment of Criteria and Indicators. Center for International Forestry Research. Indonesia. 82 pp.
- Mitov, P.G. e I.L. Stoyanov.** 2005. Ecological Profiles of Harvestmen (Arachnida, Opiliones) From Vitosha Mountain (Bulgaria): A Mixed Modelling Approach Using Gams. 2005. *The Journal of Arachnology*. 33: 256-268.
- Ninyerola M., Pons, X.y Roure, J.M.** 2005. Atlas Climático Digital de la Península Ibérica. Metodología y aplicaciones en bioclimatología y geobotánica. ISBN 932860-8-7. Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra.
- Nix, H.A.** 1986. A biogeographic análisis of the Australian elapid snakes. En: R. Longmore (ed.) Atlas of elapid snakes. Australian Flora and Fauna Series No. 7.
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T. y Menor Toribio, J.** 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *GeoFocus*. No 3, 2003, p. 22-44.
- Pearce J. y D Lindenmayer.** 1998. Bioclimatic analysis to enhance reintroduction biology of the endangered helmeted honeyeater (*Lichenostomus melanops assidix*) in Southeastern Australia. *Restoration Ecology* Vol. 6 No. 3, pp. 238- 243.
- Petraglia, A. y M. Tomaselli.** 2003. Ecological profiles of wetland plant species in the northern Apennines (N. Italy). *J. Limnol.* 62(1): 71-78.
- Phillips, S., R. Anderson y R. Schapire.** 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*. 190: 231- 259.
- Phillips, S. y M. Dudík.** 2008 Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography*. 31:161-175
- Saaty, T.L.** 1980. The analytic hierarchy process. McGraw-Hill. New York. 165 pp.

- Sharifi, A. y Herwijnen, M.** 2004. Spatial Decision Support Systems. ITC Lectures. ITC. 234 pp.
- Silva F., M.A.** 2005. Distribución y aspectos ecológicos de *Pinus martinezii* Larsen, en el Eje Neovolcánico, Estado de Michoacán, México. Tesis de Licenciatura. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México
- Stockman, A.K., Beamer, D.A. y Bond, J.E.** 2006. An evaluation of a GARP model as an approach to predicting the spatial distribution of non- vagile invertebrate species. *Diversity and Distributions*. 12: 81- 89.
- Stockwell B., R. y A. Townsend. P.** 2002. Effects of sample size on accuracy of species distribution Models *Ecological Modelling*. 148: 1–13.
- Townsend P., A.** 2001. Predicting species' geographic distributions based on ecological niche modeling. *The condor*. 103: 599- 605.
- Townsend, P. A., Ortega-Huerta, M.A., Bartley, J, Sánchez-Cordero, V., Soberón, J. Buddemeier, R.H. y Stockwel, D.R.B.** 2002. Future projections for Mexican faunas under global climate change scenarios. *Nature*. 416: 115- 128.
- Townsend, P. y D.A. Klusa.** 2003. New distributional modelling approaches for gap analysis. *Animal Conservation*. The Zoological Society of London. 6: 47–54.
- Vaughton, G. y M. Ramsey.** 2004. Dry environments promote the establishment of females in monomorphic populations of *Wurmbea biglandulosa* (Colchicaceae). *Evolutionary Ecology* 18: 323–341, 2004.
- Villaseñor, J.L. y Téllez- Valdéz, O.** 2004. Distribución potencial del género *Jefea* (Asteraceae) en México. *Anales del instituto de Biología*. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Botánica 75(2): 205 – 220.
- Whittaker H., R.** 1975. *Communities and ecosystems*. Macmillan Publishing Co., Inc. New York.
- Williams, P.H., Margules, C.R. y Hilbert, D.W.** 2002. Data requirements and data sources for biodiversity priority area selection. *J. Biosci.* Vol. 27. 4: 327- 338.
- Wintle, B.A. Elith, J. y Potts, J.M.** 2005. Fauna habitat modelling and mapping: A review and case study in the Lower Hunter Central Coast region of NSW. *Austral Ecology*.30:719- 738.

CAPITULO 6

CONCLUSIONES GENERALES

Pinus martinezii es una especie que se encuentra en estatus de Pr “sujetas a protección especial” en la Norma Oficial Mexicana-059-2001, por lo que es considerada ecológicamente importante. Sin embargo, de acuerdo a las observaciones y a los registros realizados en campo, actualmente no se realiza un aprovechamiento adecuado para mantener sus poblaciones a largo plazo.

Mediante los datos obtenidos en campo en las mediciones de los individuos de *P. martinezii*, se determinó que la especie posee características maderables deseables, por esta razón se ve afectada por la tala selectiva. No obstante su importancia económica, existe falta de conocimiento en los aspectos que puedan ayudar a realizar un manejo y aprovechamiento forestal más adecuado.

Para caracterizar y realizar una comparación para determinar las condiciones ecológicas de las principales poblaciones de la especie, se aplicó el un Índice de Valor de Importancia, el cual proporciona un valor relativo (adimensional) que permite efectuar una comparación rápida y efectiva de las localidades al interior de la cuenca; determinando que únicamente las localidades de Nueva Victoria y Agua Zarca presentan poblaciones conservadas, mientras que Laguna Verde, Cerro Mozo, El Temascal y La Joya han sido fuertemente afectadas por la tala clandestina y los incendios forestales.

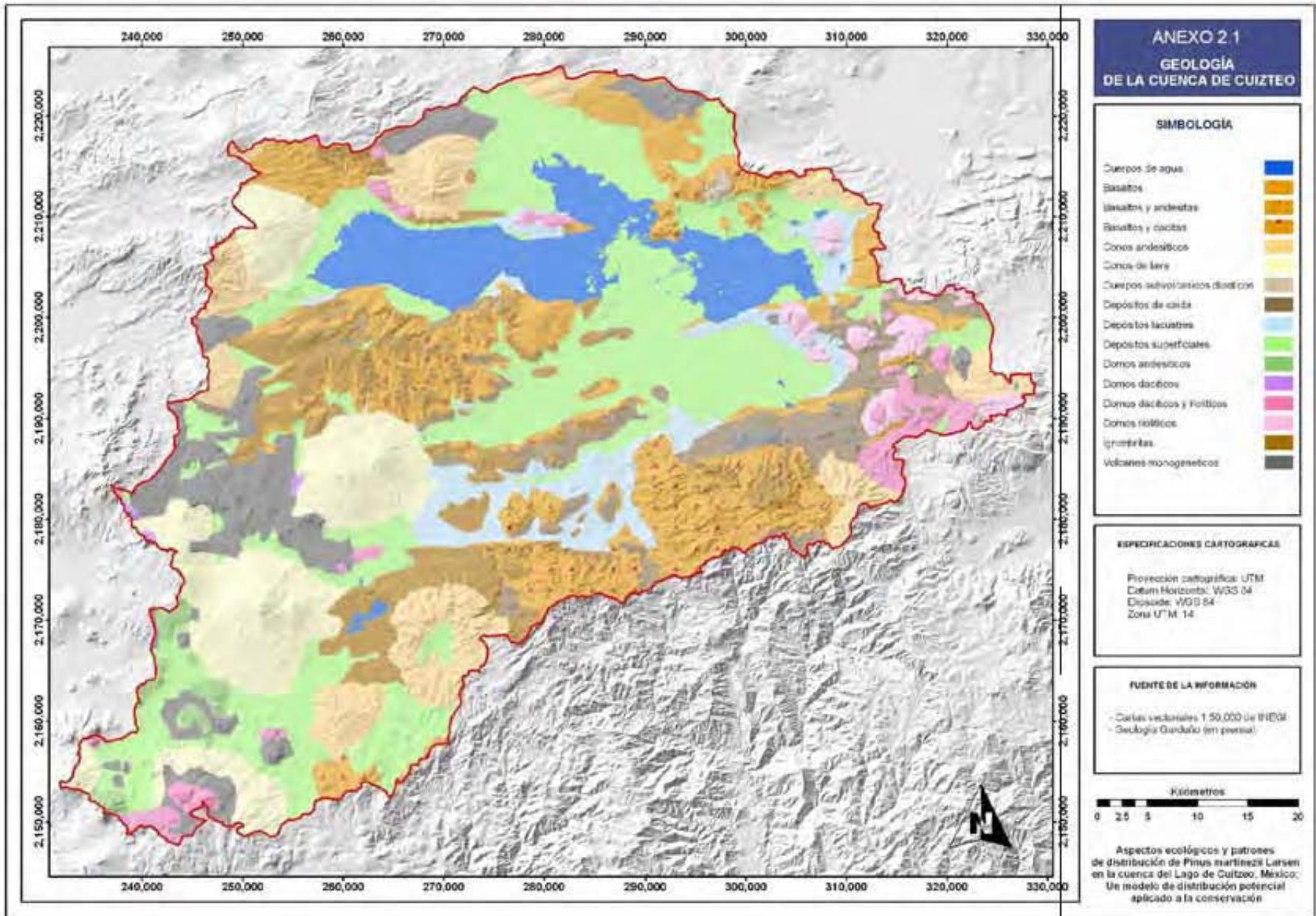
El modelo de distribución potencial basado en el nicho fundamental de la especie, representa una herramienta útil para encaminar acciones de conservación y reforestación en áreas específicas con las condiciones ambientales adecuadas para su desarrollo para garantizar el éxito de las plantaciones forestales. Asimismo también puede constituirse como un referente para efectuar exploraciones para encontrar nuevas poblaciones de la especie en la cuenca. El nicho realizado o real de

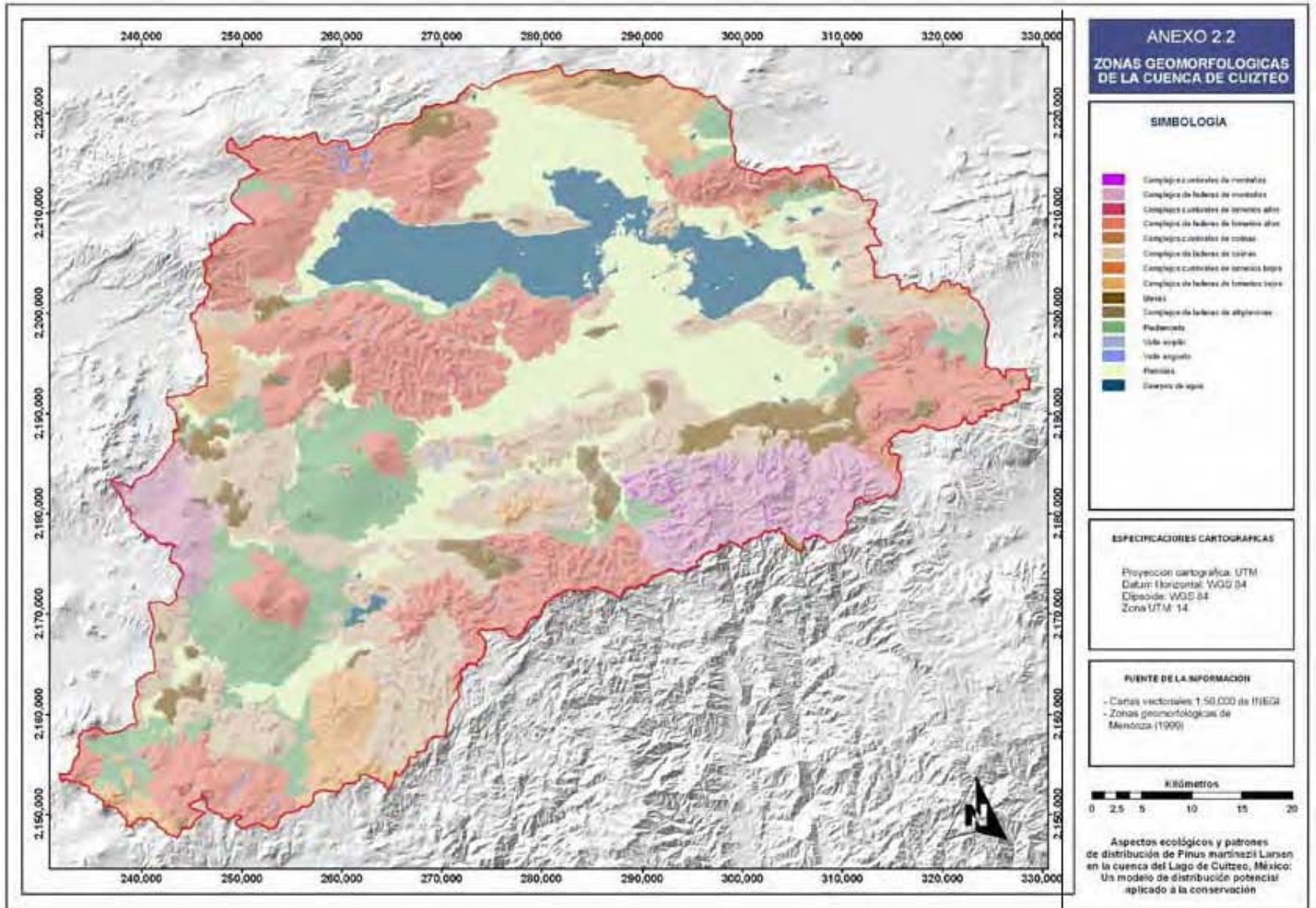
la especie ocupa solo una parte del nicho fundamental, lo cual es debido a diversos factores que han impedido la dispersión y colonización limitando su distribución geográfica, entre los más importantes se encuentran, las barreras geográficas, las interacciones bióticas y algunos procesos ocasionados por la acción humana como el cambio de uso del suelo y el aprovechamiento.

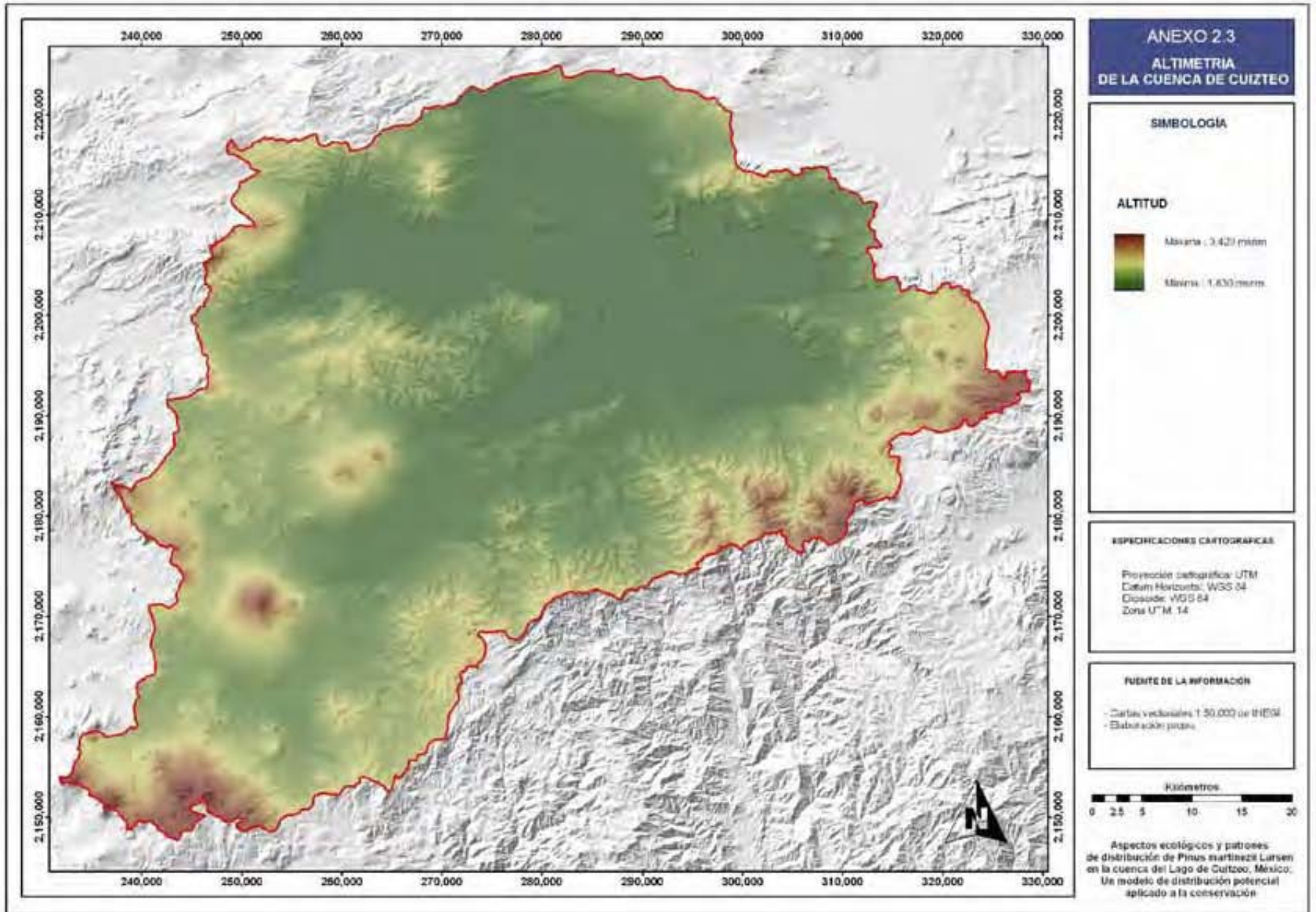
Un aspecto importante para la conservación de la especie, es la elección de sitios de colecta de semillas para la propagación. Para esto se utilizaron como criterios el Valor de Importancia, los perfiles bioclimáticos, el modelo de distribución potencial y la información recabada en las visitas a campo; a partir de los cuales se determinó que las localidades más adecuadas para el establecimiento de viveros y la colecta de semilla son Nueva Victoria, Agua Zarca y Laguna Verde.

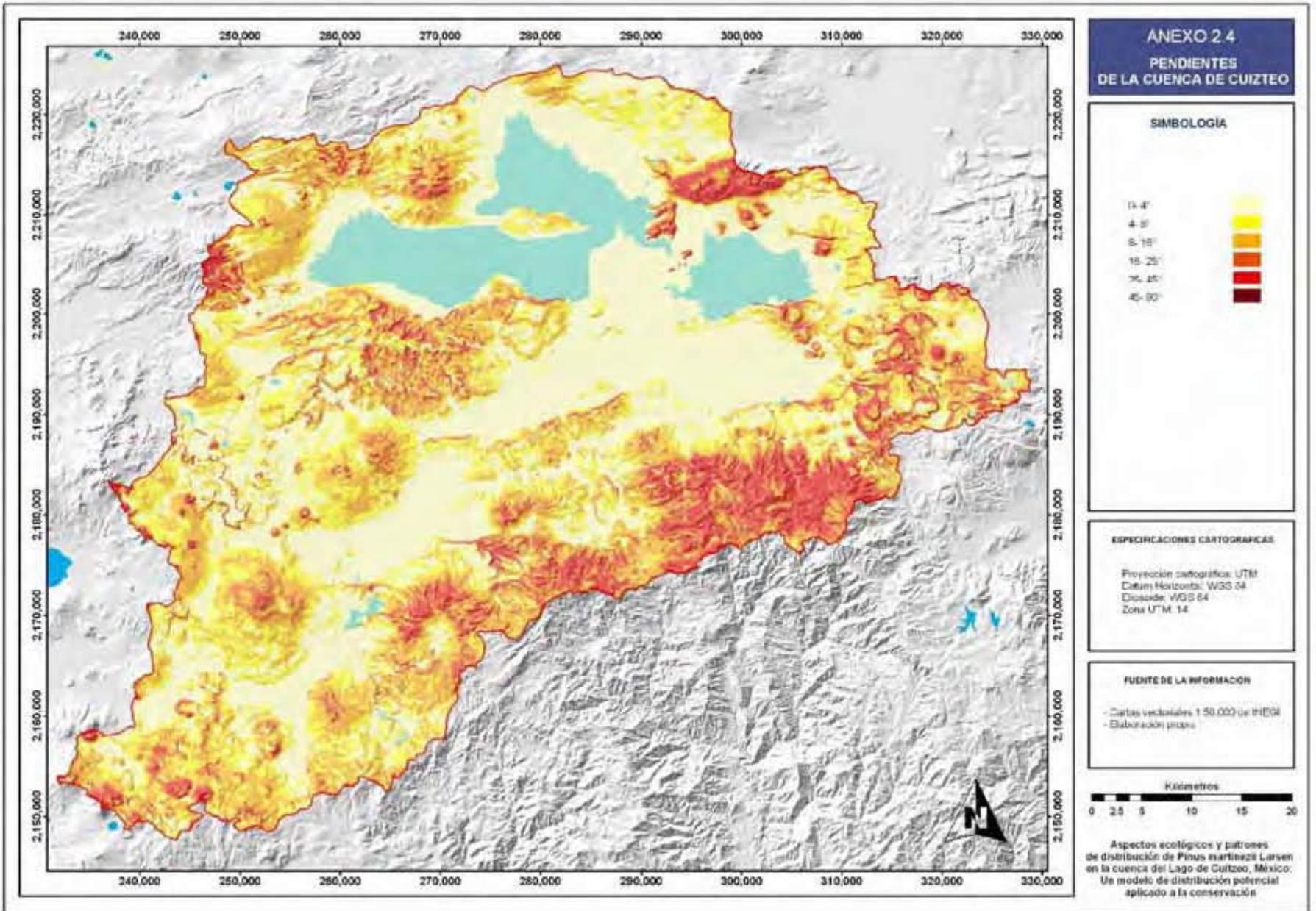
La información generada en el presente trabajo constituye una herramienta importante para el conocimiento de las condiciones de conservación de las poblaciones y los aspectos ecológicos que están determinando su distribución. Por otro lado, la importancia ecológica de esta especie hace propicio un mayor conocimiento para realizar un mejor manejo de la especie, sin dejar de lado su importancia económica y el involucramiento de las comunidades que manejan y aprovechan el recurso.

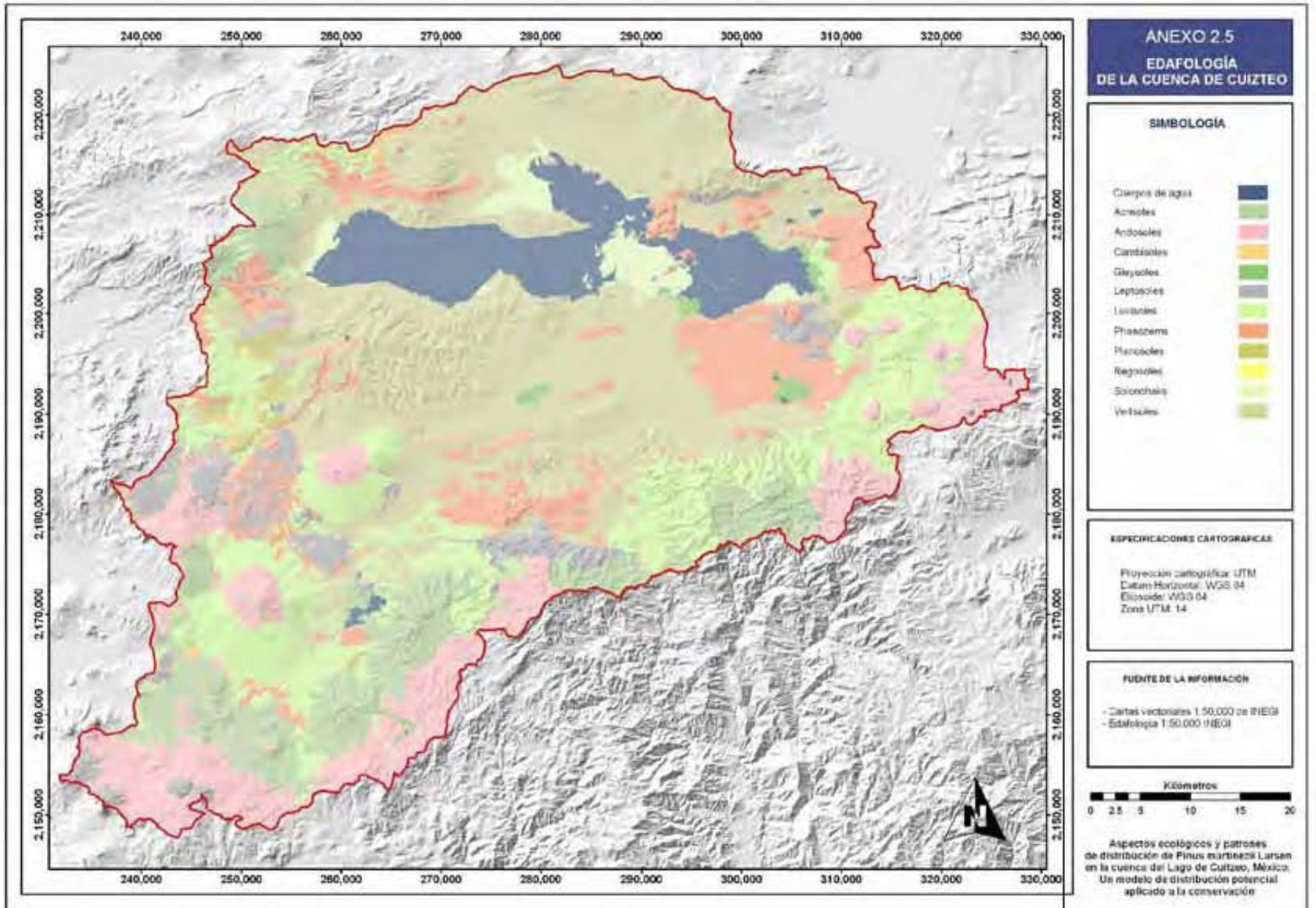
ANEXOS

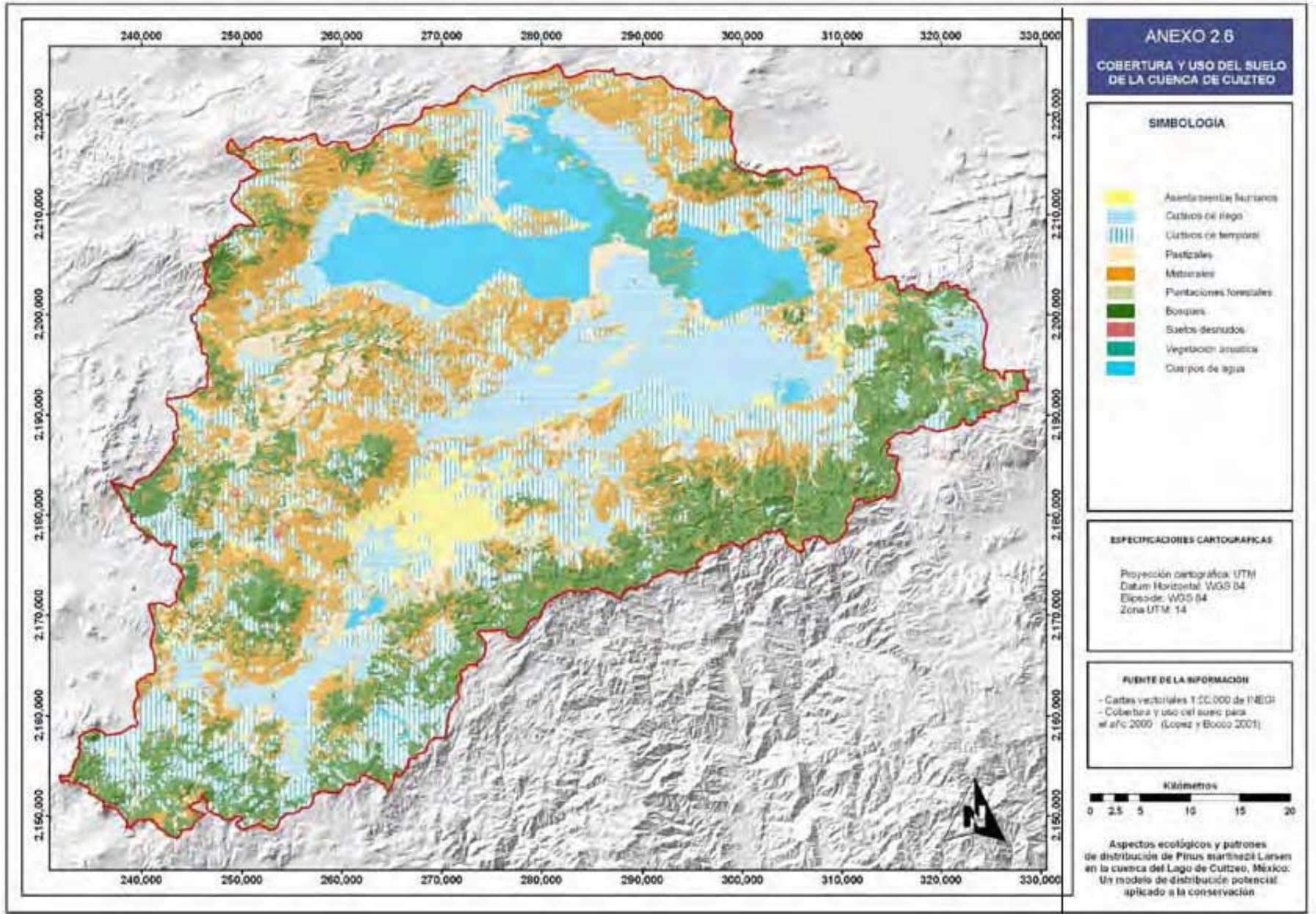


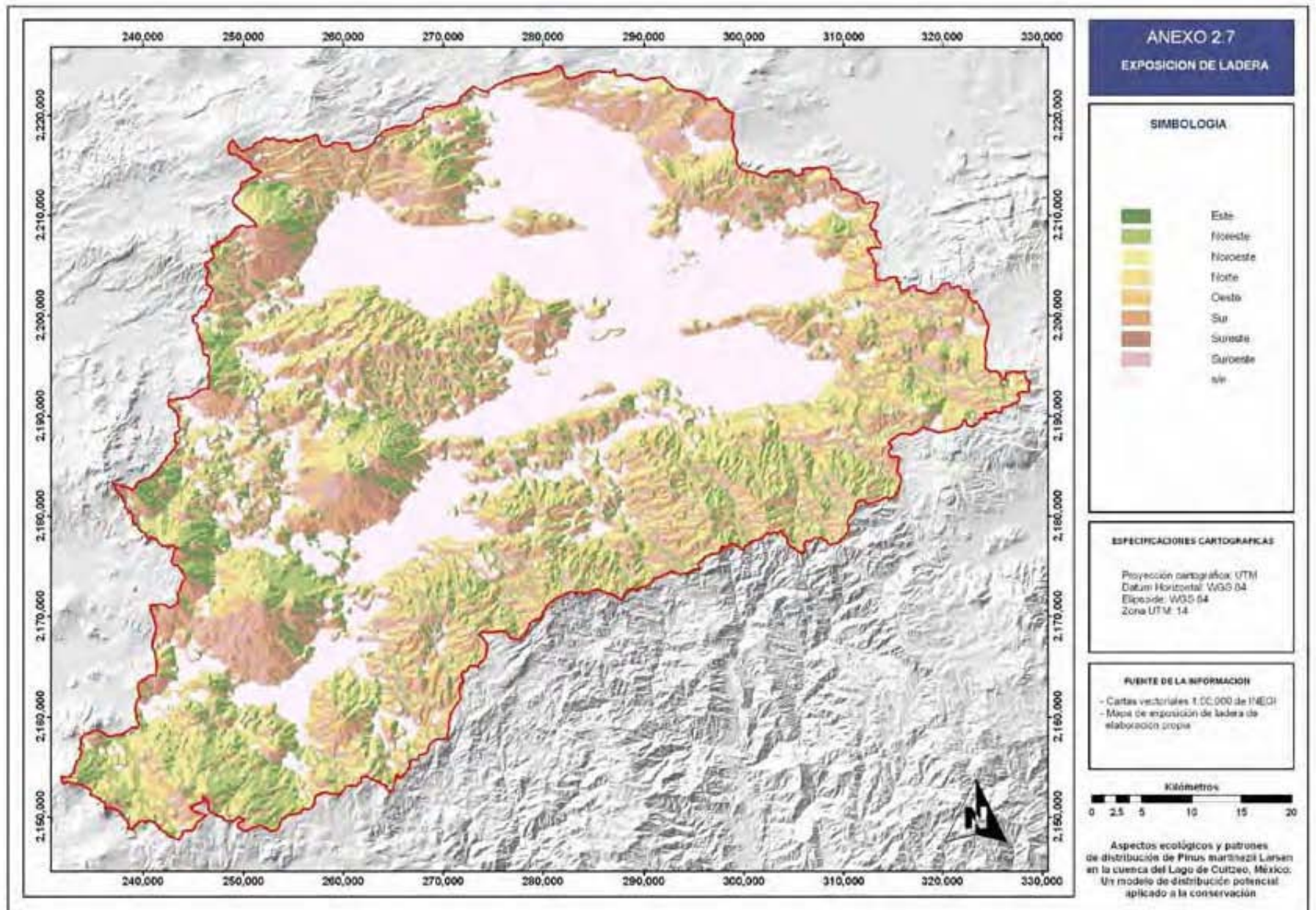












Anexo 3.1. Información de las estaciones ubicadas al interior de la cuenca, utilizadas para la construcción del modelo de regresión y su validación.

ESTACIONES UTILIZADAS PARA LA CONSTRUCCION DEL MODELO

ESTACION	X	Y	ALTITUD	T° MEDIA	PREC	OSC	EXPOSICION
Acúitzio del Canje	255183.33	2157305.74	2076	16.70	992.34	6.00	90
Álvaro Obregón	286491.41	2193431.80	1851	18.72	646.09	7.20	356
Copándaro de Jiménez	267913.38	2200911.82	1848	15.52	850.10	6.90	22
Cuitzeo	275882.40	2209425.83	1840	18.04	682.83	6.90	361
Cuitzillo Grande	278507.39	2188644.79	1851	17.07	647.34	6.60	0
Jesús del Monte	274374.38	2174056.77	2151	17.24	887.90	6.30	270
Morelia (Centro)	271120.37	2178493.78	1900	18.03	788.69	7.00	270
Presa Malpaís	303859.44	2191063.79	1880	17.44	728.83	7.20	183
Quirio	290614.42	2190199.79	1859	17.81	725.19	7.00	180
San Miguel del Monte	276227.38	2170751.76	2158	15.92	1040.17	6.70	6
Santa Rita	264835.37	2202543.82	1840	20.00	723.87	5.50	361

ESTACIONES UTILIZADAS PARA LA VALIDACIÓN

Carrillo Puerto	286697.41	2201647.81	1840	16.57	698.46	6.90	225
Coíntzio	262914.38	2171975.20	2010	17.60	810.03	6.20	45
Huingo	308461.46	2201935.81	1860	17.51	741.27	7.00	270
San Sebastián Queréndaro	301131.44	2190657.79	1916	16.48	669.23	7.10	316
Santiago Undaméo	260246.64	2168486.64	2013	16.13	837.77	7.00	0
Zinapécuaro	308801.45	2197019.80	1893	17.85	840.12	6.80	285

Anexo 3.2. Información de las estaciones ubicadas en un buffer de 10km de la cuenca, utilizadas para la construcción del modelo de regresión y su validación.

ESTACIONES UTILIZADAS PARA LA CONSTRUCCION DEL MODELO

ESTACION	X	Y	ALTITUD	T° MEDIA	PRECIP	OSC	EXPOSICION
Acuítzio del Canje	255183.33	2157305.74	2076	16.70	992.34	6.00	90
Carrillo Puerto	286697.41	2201647.81	1840	16.57	698.46	6.90	225
Coíntzio	262914.38	2171975.20	2010	17.60	810.03	6.20	45
Copándaro de Jiménez	267913.38	2200911.82	1848	15.52	850.10	6.90	22
Cuitzeo	275882.40	2209425.83	1840	18.04	682.83	6.90	361
Cuitzillo Grande	278507.39	2188644.79	1851	17.07	647.34	6.60	0
El Puerto San Isidro	236163.32	2198337.83	2000	16.18	825.76	6.80	225
El Temascal de Morelia	294527.42	2173855.76	2240	16.99	1402.59	5.10	156
Jesús del Monte	274374.38	2174056.77	2151	17.24	887.90	6.30	270
Pátzcuaro	225909.28	2160147.76	2144	16.45	926.02	6.50	274
Quiroga (Santa Fe Quiroga)	235282.30	2176161.79	2071	16.38	827.16	5.60	209
San Miguel del Monte	276227.38	2170751.76	2158	15.92	1040.17	6.70	6
San Sebastián Queréndaro	301131.44	2190657.79	1916	16.48	669.23	7.10	316
Teremendo Morelia	240471.32	2189658.81	2146	16.57	724.24	6.30	57
Tzitzio	297986.42	2166545.74	1565	20.54	1225.25	5.60	45
Zinapécuaro	308801.45	2197019.80	1893	17.85	840.12	6.80	285

ESTACIONES UTILIZADAS PARA LA VALIDACIÓN

Álvaro Obregón	286491.41	2193431.80	1851	18.72	646.09	7.20	356
Huaniqueo	237856.32	2202151.84	2043	17.90	887.63	6.60	245
Huingo	308461.46	2201935.81	1860	17.51	741.27	7.00	270
Morelia (Centro)	271120.37	2178493.78	1900	18.03	788.69	7.00	270
Presa Malpaís	303859.44	2191063.79	1880	17.44	728.83	7.20	183
Quirio	290614.42	2190199.79	1859	17.81	725.19	7.00	180
Santa Rita	264835.37	2202543.82	1840	20.00	723.87	5.50	361
Santiago Undaméo	260246.64	2168486.64	2013	16.13	837.77	7.00	0

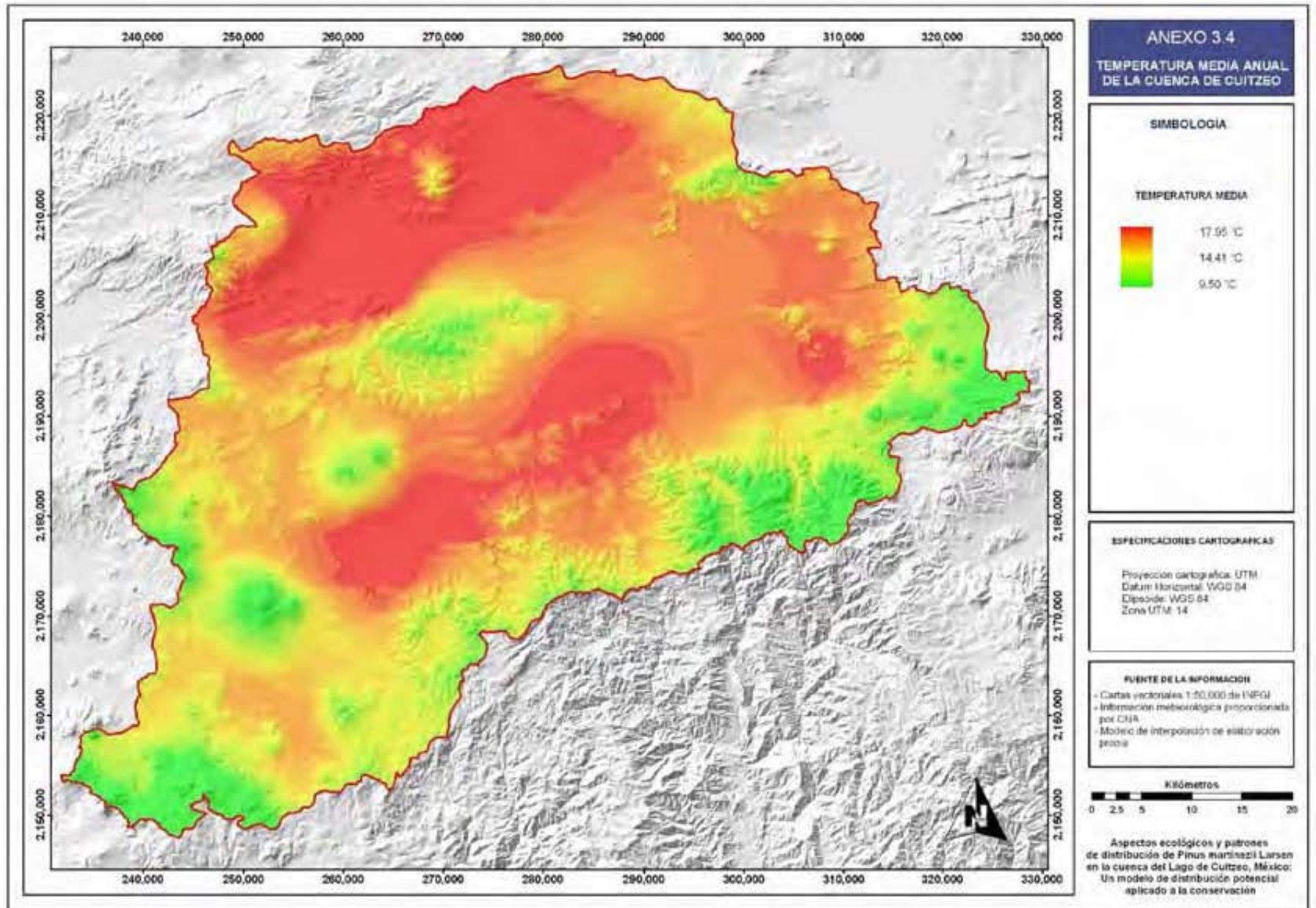
Anexo 3.3. Información de las estaciones ubicadas en un buffer de 20km de la cuenca, utilizadas para la construcción del modelo de regresión y su validación.

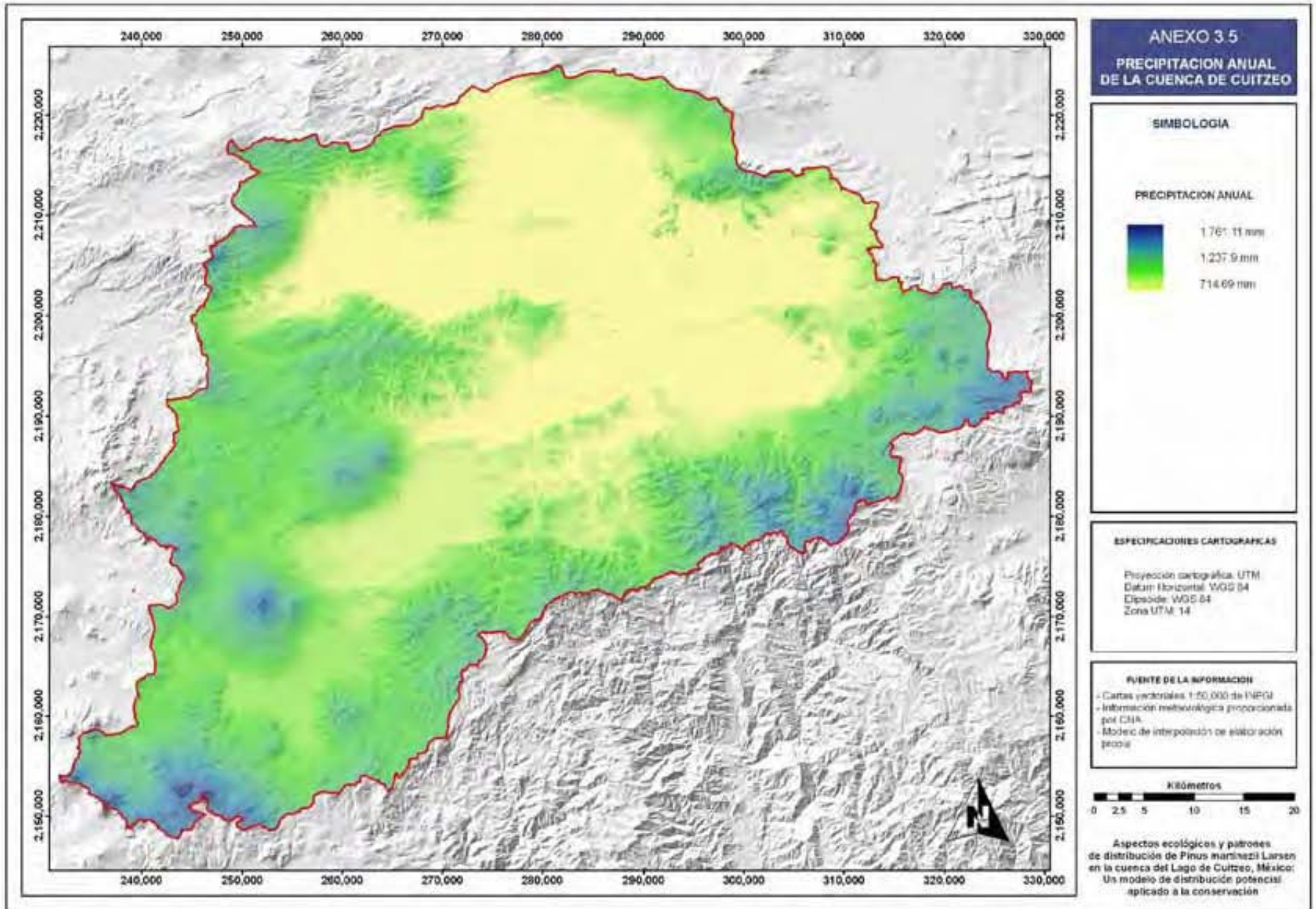
ESTACIONES UTILIZADAS PARA LA CONSTRUCCION DEL MODELO

ESTMETEO	X	Y	ALTITUD	T° MEDIA	PREC	OSC	EXPOSICION
Acúitzio del Canje	255183.00	2157306.00	2076	16.70	992.34	6.00	90
Álvaro Obregón	286491.00	2193432.00	1851	18.72	646.09	7.20	356
Carrillo Puerto	286697.00	2201648.00	1840	16.57	698.46	6.90	225
Ciudad Hidalgo	337233.00	2178566.00	2070	16.56	823.04	6.10	135
Coíntzio	262914.00	2171975.00	2010	17.60	810.03	6.20	45
Copándaro de Jiménez	267913.00	2200912.00	1848	15.52	850.10	6.90	22
Cuitzeo	275882.00	2209426.00	1840	18.04	682.83	6.90	361
El Puerto San Isidro	236163.00	2198338.00	2000	16.18	825.76	6.80	225
Huaniqueo	237856.00	2202152.00	2043	17.90	887.63	6.60	245
Huingo	308461.00	2201936.00	1860	17.51	741.27	7.00	270
Morelia (Centro)	271120.00	2178494.00	1900	18.03	788.69	7.00	270
Pucuáto	323039.00	2170834.00	2509	14.30	1184.90	6.00	205
Puruándiro	237048.00	2222522.00	1921	19.09	817.88	7.50	331
Quirio	290614.00	2190200.00	1859	17.81	725.19	7.00	180
Quiroga (Santa Fe Quiroga)	235282.00	2176162.00	2071	16.38	827.16	5.60	209
San Miguel del Monte	276227.00	2170752.00	2158	15.92	1040.17	6.70	6
San Sebastián Queréndaro	301131.00	2190658.00	1916	16.48	669.23	7.10	316
Santa Rita	264835.00	2202544.00	1840	20.00	723.87	5.50	361
Santiago Undaméo	260247.00	2168487.00	2013	16.13	837.77	7.00	0
Teremendo Morelia	240471.00	2189659.00	2146	16.57	724.24	6.30	57
Zinapécuaro	308801.00	2197020.00	1893	17.85	840.12	6.80	285

ESTACIONES UTILIZADAS PARA LA VALIDACIÓN

Cuitzillo Grande	278507.00	2188645.00	1851	17.07	647.34	6.60	0
El Temascal de Morelia	294527.00	2173856.00	2240	16.99	1402.59	5.10	156
Jesús del Monte	274374.00	2174057.00	2151	17.24	887.90	6.30	270
Maravatío	349165.00	2200124.00	2018	17.86	899.38	6.60	135
Pátzcuaro	225909.00	2160148.00	2144	16.45	926.02	6.50	274
Presa Malpaís	303859.00	2191064.00	1880	17.44	728.83	7.20	183
San Miguel Curahuango	348429.00	2198570.00	2019	16.98	794.31	6.50	90
Senguio	358374.00	2182370.00	2278	15.61	906.94	6.40	315
Tzítzio	297986.00	2166546.00	1565	20.54	1225.25	5.60	45





Anexo 4.1. Formato para el registro de información en campo.

**CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA DE *Pinus martinezii* EN LA CUENCA DE CUITZEO
FORMATO PARA EL REGISTRO DE INFORMACIÓN EN CAMPO**

LEVANTÓ: _____ FECHA: _____

COORDENADAS UTM	
X	
Y	

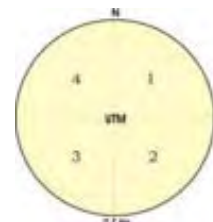
LOCALIDAD: _____ SITIO No: _____
MUNICIPIO: _____ ESTADO: _____

CARACTERIZACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO

TIPO DE VEGETACIÓN: _____

ALTITUD: _____ PENDIENTE _____
EXPOSICIÓN: _____ RELIEVE _____
FACTORES DE DISTURBIO: _____
OBSERVACIONES DEL SITIO: _____

DATOS DASOMÉTRICOS



SECTOR	ALTURA (m)	DAP (cm)	COBERTURA (%)	OBSERVACIONES

Anexo 4.2. Tablas para el cálculo de volumen de madera para especies del género *Pinus* en el Estado de Michoacán.

LOCALIDAD	MUNICIPIO	REGION COFOM
Temascal	Charo	Centro
Atécuaro	Morelia	Centro
La Joya	Morelia	Centro
Agua Zarca	Morelia	Centro
Nueva Victoria	Queréndaro	Centro
Cerro Moso	Zinapécuaro	Oriente
Agua Verde	Zinapécuaro	Oriente

TABLA DE VOLUMEN FUSTE TOTAL CON CORTEZA REGION CENTRO

DAP (cm)	ALTURA TOTAL (m)						
	10	15	20	25	30	35	40
10	0.0424317	0.0616899					
15	0.0918747	0.1335731	0.1741932				
20	0.1589427	0.2310808	0.3013532	0.3702703			
25	0.2431545	0.3535131	0.4610177	0.5664488	0.6702563		
30	0.3441483	0.5003442	0.6525007	0.8017223	0.9486461		
35	0.461635	0.6711537	0.8752539	1.0754174	1.2724986	1.467053	
40		0.8655926	1.1288224	1.3869749	1.6411522	1.8920706	
45		1.0833629	1.4128174	1.7359173	2.0540419	2.3680876	
50		1.3242052	1.7269008	2.121829	2.5106758	2.894537	3.2741812
55			2.070773	2.544342	3.0106186	3.4709169	3.9261585
60			2.444166	3.003127	3.5534806	4.0967779	4.6341067
65			2.8468371	3.4978858	4.138909	4.7717134	5.3975659
70			3.2785651	4.0283464	4.7665819	5.4953522	6.2161165
75			3.7391464	4.5942589	5.4362037	6.2673535	7.0893726
80						7.087402	8.0169778
85						7.9552047	8.9985004

TABLA DE VOLUMEN DE RAMAS REGION CENTRO

DAP (cm)	ALTURA TOTAL						
	10	15	20	25	30	35	40
10	0.0033421	0.0030259					
15	0.009021	0.0081673	0.0076111	0.0072059			
20	0.018248	0.165212	0.15396	0.0145763			
25	0.0315166	0.0285341	0.0265908	0.0251751	0.0240745		
30	0.492546	0.0445935	0.0415565	0.0393439	0.0376239		
35	0.0718443	0.0650456	0.0606156	0.0573884	0.0548795	0.052844	
40		0.0902058	0.0840623	0.0795867	0.0761073	0.0732845	
45		0.1203654	0.1121679	0.106196	0.1015533	0.0977867	
50		0.1557964	0.1451859	0.1374559	0.1314467	0.1265713	0.1224945
55			0.1833542	0.1735922	0.1660031	0.159846	0.1546975
60			0.2268984	0.2148179	0.2054266	0.1978073	0.191436
65			0.2760326	0.2613362	0.2499111	0.2406419	0.2328909
70			0.3309615	0.3133406	0.299642	0.2885283	0.2792349
75			0.3918812	0.3710168	0.3547967	0.316373	0.3306333
80						0.4001335	0.3872453
85						0.4641751	0.4492242

TABLA DE VOLUMEN FUSTE TOTAL CON CORTEZA REGION ORIENTE

DAP (cm)	ALTURA TOTAL						
	10	15	20	25	30	35	40
10	0.0409562	0.0628723	0.0852172				
15	0.0860682	0.1321242	0.1790813				
20	0.1457729	0.223774	0.3033082	0.3839936	0.4656113		
25	0.2193684	0.3367545	0.4564376	0.5778582	0.7006817		
30		0.4702613	0.6373929	0.8069509	0.978468	1.1516315	1.3262171
35		0.6236729	0.8453272	1.0701995	1.2976699	1.5273238	1.7588638
40		0.7964765	1.0795457	1.3667243	1.6572209	1.9505061	2.2461999
45		0.9882399	1.3394519	1.6957829	2.0562207	2.4201186	2.7870049
50		1.1985891	1.6245695	2.0567344	2.4938923	2.9352466	3.3802256
55				2.4490166	2.9695539	3.495088	4.0249381
60				2.8721297	3.4825995	4.0989294	4.7203209
65				3.3256244	4.0324843	4.7461297	5.4656357
70				3.8090936	4.6187146	5.4361075	6.2602131
75				4.3221648	5.2408389	6.1683316	7.1034413
80				4.8644958	5.8984421	6.9423136	7.9947578
85						7.7576016	8.9336422
90						8.6137756	9.9196109
95						9.5104436	10.952212
100							12.031024

TABLA DE VOLUMEN DE RAMAS REGION ORIENTE

DAP (cm)	ALTURA TOTAL						
	10	15	20	25	30	35	40
10	0.002346	0.003519	0.004692				
15	0.0052735	0.0079179	0.010557				
20	0.009384	0.014076	0.018768	0.02346	0.028152		
25	0.0146625	0.0219938	0.029325	0.0366563	0.0439875		
30		0.031671	0.042228	0.052785	0.063342	0.073899	0.084456
35		0.0431078	0.057477	0.0718463	0.0862155	0.1005848	0.114954
40		0.56304	0.75072	0.09384	0.112608	0.131376	0.150144
45		0.0712598	0.095013	0.1187663	0.1425195	0.1562723	0.190026
50		0.087975	0.01173	0.146625	0.17595	0.205275	0.2346
55				0.1774153	0.2128995	0.2483828	0.283866
60				0.21114	0.253368	0.295596	0.337824
65				0.2477963	0.2973555	0.3469148	0.396474
70				0.287385	0.344862	0.402339	0.459816
75				0.3299063	0.3958875	0.4618688	0.52785
80				0.37536	0.450432	0.525504	0.600576
85						0.5932448	0.677994
90						0.665091	0.760104
95						0.7410423	0.846906
100							0.9384

*ESPECIES *P. douglasiana*, *herrerai*, *michoacana*, *montezumae*, *pseudostrobus*, *tenuifolia*, *lawsoni*, *leiophylla*, *oocarpa*, *pringlei*, *teocote*.

Anexo 4.3. Información fisonómica por individuo registrada en el trabajo de campo.

SITIO	ID	SECTOR	DAP (cm)	AB (m2)	ALTURA (m)	VOL. FUSTE (m3)	VOL. RAMAS (m3)	VOL. IND.(m3)	COB (%)	OBS.
LOCALIDAD EL TEMAZCAL										
1	1	1	198	0.31	27.0	3.50	0.26	3.76	5	na
1	1	2	235	0.44	22.0	3.74	0.36	4.10	7	na
1	1	3	225	0.40	21.0	3.28	0.33	3.61	3	na
1	1	4	189	0.28	25.0	3.00	0.21	3.22	7	na
2	2	1	167	0.22	19.0	2.07	0.18	2.25	6	na
2	2	2	152	0.18	15.0	1.32	0.16	1.48	4	na
2	2	3	102	0.08	15.0	0.50	0.04	0.54	3	na
2	2	3	174	0.24	16.0	1.32	0.16	1.48	8	na
3	3	1	159	0.20	23.0	1.73	0.15	1.87	4	na
3	3	4	132	0.14	30.0	1.64	0.76	2.40	6	na
3	3	4	163	0.21	28.0	2.12	0.14	2.26	5	na
3	3	4	198	0.31	29.0	4.14	0.25	4.39	7	na
3	3	4	220	0.39	31.0	4.77	0.30	5.07	8	na
LOCALIDAD LA JOYA										
1	6	3	140	0.16	32.0	2.05	0.10	2.16	2	na
1	6	4	118	0.11	32.0	1.27	0.05	1.33	4	na
1	6	4	143	0.16	30.0	2.05	0.10	2.16	3	na
1	6	4	192	0.29	33.0	3.55	0.21	3.76	5	na
LOCALIDAD AGUA ZARCA										
1	7	1	38	0.01	6.0	0.04	0.00	0.05	2	na
1	7	1	91	0.07	10.0	0.34	0.05	0.39	4	na
1	7	1	285	0.65	21.0	7.96	0.46	8.42	6	Resina
1	7	2	18	0.00	4.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	7	2	22	0.00	3.0	0.04	0.00	0.05	2	na
1	7	2	24	0.00	5.0	0.04	0.00	0.05	2	na
1	7	3	166	0.22	15.0	1.32	0.16	1.48	6	Resina
1	7	3	179	0.25	22.0	2.07	0.18	2.25	5	Resina
1	7	4	75	0.04	13.0	0.24	0.03	0.27	4	Resina
1	7	4	81	0.05	16.0	0.35	0.03	0.38	1	Resina

Anexo 4.3. (Continuación)

SITIO	ID	SECTOR	DAP (cm)	AB (m2)	ALTURA (m)	VOL. FUSTE (m3)	VOL. RAMAS (m3)	VOL. IND.(m3)	COB (%)	OBS.
LOCALIDAD AGUA ZARCA										
1	7	4	93	0.07	12.0	0.34	0.05	0.39	4	na
1	7	4	117	0.11	17.0	0.67	0.07	0.74	4	Resina
1	7	4	197	0.31	18.0	2.44	0.23	2.67	6	Resina
2	8	1	128	0.13	20.0	1.13	0.08	1.21	5	Resina
2	8	1	140	0.16	21.0	1.41	0.11	1.52	2	na
2	8	1	191	0.29	22.0	2.44	0.23	2.67	6	Resina
2	8	2	81	0.05	13.0	0.24	0.03	0.27	2	na
2	8	2	91	0.07	7.0	0.34	0.05	0.39	1	na
2	8	2	103	0.08	10.0	0.34	0.05	0.39	2	na
2	8	2	108	0.09	12.0	0.46	0.07	0.53	6	na
2	8	2	117	0.11	14.0	0.67	0.07	0.74	4	na
2	8	2	141	0.16	18.0	1.08	0.12	1.20	7	na
2	8	3	47	0.02	5.0	0.04	0.00	0.05	1	na
2	8	3	90	0.06	6.0	0.34	0.05	0.39	2	na
2	8	3	120	0.11	8.0	0.46	0.07	0.53	3	na
2	8	3	132	0.14	12.0	0.46	0.07	0.53	5	Resina
3	9	1	65	0.03	20.0	0.37	0.01	0.38	1	na
3	9	1	70	0.04	18.0	0.23	0.02	0.25	1	na
3	9	1	78	0.05	24.0	0.57	0.03	0.59	1	na
3	9	1	96	0.07	19.0	0.65	0.42	1.07	3	na
3	9	1	111	0.10	19.0	0.88	0.06	0.94	3	Resina
3	9	1	129	0.13	25.0	1.39	0.08	1.47	4	Resina
3	9	1	133	0.14	22.0	1.13	0.08	1.21	4	Resina
3	9	1	141	0.16	25.0	1.74	0.11	1.84	5	Resina
3	9	2	43	0.01	13.0	0.09	0.01	0.10	1	na
3	9	2	87	0.06	19.0	0.46	0.03	0.49	3	Resina
3	9	2	89	0.06	19.0	0.65	0.42	1.07	3	na
3	9	2	92	0.07	19.0	0.65	0.42	1.07	3	na
3	9	2	100	0.08	21.0	0.65	0.42	1.07	2	Resina
3	9	2	101	0.08	18.0	0.50	0.04	0.54	4	Resina

Anexo 4.3. (Continuación)

SITIO	ID	SECTOR	DAP (cm)	AB (m2)	ALTURA (m)	VOL. FUSTE (m3)	VOL. RAMAS (m3)	VOL. IND.(m3)	COB (%)	OBS.
LOCALIDAD AGUA ZARCA										
3	9	2	110	0.10	17.0	0.67	0.07	0.74	3	na
3	9	2	117	0.11	21.0	0.88	0.06	0.94	3	Resina
3	9	2	125	0.12	20.0	1.13	0.08	1.21	5	na
3	9	3	26	0.01	4.0	0.04	0.00	0.05	1	na
3	9	3	41	0.01	5.0	0.04	0.00	0.05	1	na
3	9	3	45	0.02	5.0	0.04	0.00	0.05	1	na
3	9	3	60	0.03	8.0	0.16	0.02	0.18	2	na
3	9	3	62	0.03	14.0	0.23	0.02	0.25	1	na
3	9	3	76	0.05	15.0	0.35	0.03	0.38	2	na
3	9	3	98	0.08	16.0	0.50	0.04	0.54	5	na
3	9	3	101	0.08	18.0	0.50	0.04	0.54	4	na
3	9	3	104	0.09	19.0	0.88	0.06	0.94	2	Resina
3	9	3	126	0.13	21.0	1.13	0.08	1.21	4	Resina
3	9	4	60	0.03	14.0	0.23	0.02	0.25	1	Resina
3	9	4	74	0.04	15.0	0.35	0.03	0.38	2	na
3	9	4	79	0.05	22.0	0.46	0.03	0.49	1	Resina
3	9	4	89	0.06	19.0	0.65	0.42	1.07	2	na
3	9	4	98	0.08	20.0	0.65	0.42	1.07	4	Resina
3	9	4	101	0.08	20.0	0.65	0.42	1.07	3	Resina
3	9	4	102	0.08	19.0	0.65	0.42	1.07	3	Resina
3	9	4	103	0.08	20.0	0.65	0.42	1.07	5	na
3	9	4	104	0.09	18.0	0.67	0.07	0.74	2	Resina
3	9	4	130	0.13	21.0	1.13	0.08	1.21	3	Resina
4	10	1	91	0.07	12.0	0.34	0.05	0.39	2	na
4	10	1	102	0.08	11.0	0.34	0.05	0.39	5	na
4	10	1	110	0.10	10.0	0.46	0.07	0.53	4	Resina
4	10	2	73	0.04	10.0	0.16	0.02	0.18	2	na
4	10	2	99	0.08	12.0	0.34	0.05	0.39	6	na
4	10	2	138	0.15	14.0	1.08	0.12	1.20	6	Resina
4	10	2	141	0.16	13.0	1.08	0.12	1.20	6	Resina

Anexo 4.3. (Continuación)

SITIO	ID	SECTOR	DAP (cm)	AB (m2)	ALTURA (m)	VOL. FUSTE (m3)	VOL. RAMAS (m3)	VOL. IND.(m3)	COB (%)	OBS.
LOCALIDAD AGUA ZARCA										
4	10	4	138	0.15	16.0	1.08	0.12	1.20	5	na
4	10	4	158	0.20	17.0	1.32	0.16	1.48	7	Resina
5	11	1	84	0.06	20.0	0.46	0.03	0.49	1	Resina
5	11	1	86	0.06	19.0	0.46	0.03	0.49	1	na
5	11	1	92	0.07	18.0	0.50	0.04	0.54	1	Resina
5	11	1	92	0.07	19.0	0.65	0.42	1.07	1	na
5	11	1	103	0.08	20.0	0.65	0.42	1.07	2	Resina
5	11	1	108	0.09	22.0	0.88	0.06	0.94	2	Resina
5	11	1	110	0.10	20.0	0.88	0.06	0.94	2	Resina
5	11	1	126	0.13	19.0	1.13	0.08	1.21	3	Resina
5	11	1	133	0.14	23.0	1.13	0.08	1.21	4	Resina
5	11	1	135	0.15	21.0	1.41	0.11	1.52	3	Resina
5	11	2	111	0.10	24.0	1.08	0.06	1.13	3	na
5	11	2	125	0.12	23.0	1.13	0.08	1.21	3	Resina
5	11	2	165	0.22	24.0	2.12	0.14	2.26	6	Resina
5	11	2	169	0.23	24.0	2.54	0.17	2.72	7	Resina
5	11	3	139	0.15	21.0	1.41	0.11	1.52	3	Resina
5	11	4	90	0.06	18.0	0.50	0.04	0.54	1	Resina
5	11	4	101	0.08	20.0	0.65	0.42	1.07	2	Resina
5	11	4	105	0.09	19.0	0.88	0.06	0.94	1	Resina
5	11	4	124	0.12	17.0	0.87	0.09	0.96	2	Resina
5	11	4	131	0.14	19.0	1.13	0.08	1.21	3	Resina
5	11	4	145	0.17	18.0	1.08	0.12	1.20	5	Resina
5	11	4	146	0.17	20.0	1.41	0.11	1.52	4	Resina
5	11	4	147	0.17	20.0	1.41	0.11	1.52	4	Resina
LOCALIDAD CERRO MOSO										
1	12	2	131	0.14	16.0	0.87	0.09	0.96	2	na
1	12	2	161	0.21	15.0	1.32	0.16	1.48	3	na
1	12	3	72	0.04	12.0	0.16	0.02	0.18	2	na
1	12	3	90	0.06	10.0	0.34	0.05	0.39	3	na

Anexo 4.3. (Continuación)

SITIO	ID	SECTOR	DAP (cm)	AB (m2)	ALTURA (m)	VOL. FUSTE (m3)	VOL. RAMAS (m3)	VOL. IND.(m3)	COB (%)	OBS.
LOCALIDAD CERRO MOSO										
1	12	3	100	0.08	13.0	0.34	0.05	0.39	2	na
2	13	1	26	0.01	5.0	0.04	0.00	0.05	0	na
2	13	1	81	0.05	15.0	0.35	0.03	0.38	3	na
2	13	2	58	0.03	9.0	0.16	0.02	0.18	1	na
2	13	2	59	0.03	10.0	0.16	0.02	0.18	3	na
2	13	2	59	0.03	11.0	0.16	0.02	0.18	1	na
2	13	2	84	0.06	12.0	0.24	0.03	0.27	2	na
2	13	4	74	0.04	17.0	0.35	0.03	0.38	1	na
2	13	4	100	0.08	18.0	0.50	0.04	0.54	4	na
2	13	4	113	0.10	17.0	0.67	0.07	0.74	3	na
LOCALIDAD AGUA VERDE										
1	14	2	79	0.05	24.0	0.57	0.03	0.59	1	na
1	14	2	120	0.11	26.0	1.39	0.08	1.47	2	na
1	14	2	165	0.22	25.0	2.12	0.14	2.26	2	na
1	14	4	70	0.04	21.0	0.37	0.01	0.38	1	na
1	14	4	307	0.75	27.0	7.96	0.46	8.42	9	na
2	15	1	110	0.10	25.0	1.08	0.06	1.13	1	na
2	15	1	117	0.11	25.0	1.08	0.06	1.13	1	na
2	15	1	142	0.16	25.0	1.74	0.11	1.84	3	na
3	16	1	206	0.34	27.0	3.50	0.26	3.76	2	na
3	16	2	217	0.37	26.0	4.03	0.31	4.34	3	na
3	16	4	253	0.51	26.0	7.09	0.40	7.49	3	na
LOCALIDAD NUEVA VICTORIA										
1	17	1	18	0.00	22.0	0.04	0.00	0.05	2	na
1	17	1	30	0.01	7.0	0.04	0.00	0.05	0	na
1	17	1	31	0.01	8.0	0.04	0.00	0.05	0	na
1	17	1	32	0.01	8.0	0.04	0.00	0.05	0	na
1	17	1	35	0.01	8.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	1	36	0.01	15.0	0.06	0.00	0.06	1	na
1	17	1	54	0.02	18.0	0.13	0.01	0.14	1	na

Anexo 4.3. (Continuación)

SITIO	ID	SECTOR	DAP (cm)	AB (m2)	ALTURA (m)	VOL. FUSTE (m3)	VOL. RAMAS (m3)	VOL. IND.(m3)	COB (%)	OBS.
LOCALIDAD AGUA ZARCA										
1	17	1	64	0.03	20.0	0.37	0.01	0.38	1	na
1	17	1	101	0.08	22.0	0.65	0.42	1.07	2	na
1	17	1	103	0.08	24.0	0.80	0.04	0.84	2	na
1	17	2	25	0.00	9.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	2	30	0.01	9.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	2	32	0.01	8.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	2	32	0.01	8.0	0.04	0.00	0.05	2	na
1	17	2	32	0.01	10.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	2	36	0.01	10.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	2	37	0.01	10.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	2	60	0.03	24.0	0.37	0.01	0.38	1	na
1	17	2	66	0.03	26.0	0.37	0.01	0.38	1	na
1	17	2	84	0.06	21.0	0.46	0.03	0.49	2	na
1	17	2	102	0.08	20.0	0.65	0.42	1.07	1	na
1	17	2	145	0.17	23.0	1.41	0.11	1.52	3	na
1	17	3	28	0.01	9.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	3	34	0.01	14.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	3	42	0.01	13.0	0.09	0.01	0.10	1	na
1	17	3	50	0.02	23.0	0.17	0.01	0.18	1	na
1	17	3	57	0.03	19.0	0.30	0.02	0.32	1	na
1	17	3	88	0.06	20.0	0.65	0.42	1.07	1	na
1	17	3	89	0.06	18.0	0.50	0.04	0.54	1	na
1	17	3	137	0.15	25.0	1.74	0.11	1.84	3	na
1	17	4	19	0.00	6.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	4	22	0.00	7.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	4	25	0.00	10.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	4	27	0.01	10.0	0.04	0.00	0.05	0	na
1	17	4	31	0.01	7.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	4	34	0.01	12.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	4	35	0.01	14.0	0.06	0.00	0.06	0	na

Anexo 4.3. (Continuación)

SITIO	ID	SECTOR	DAP (cm)	AB (m2)	ALTURA (m)	VOL. FUSTE (m3)	VOL. RAMAS (m3)	VOL. IND.(m3)	COB (%)	OBS.
LOCALIDAD AGUA ZARCA										
1	17	4	36	0.01	9.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	4	37	0.01	9.0	0.04	0.00	0.05	1	na
1	17	4	41	0.01	15.0	0.13	0.01	0.14	1	na
1	17	4	43	0.01	15.0	0.13	0.01	0.14	1	na
1	17	4	45	0.02	14.0	0.13	0.01	0.14	1	na
1	17	4	57	0.03	17.0	0.23	0.02	0.25	1	na
1	17	4	65	0.03	17.0	0.23	0.02	0.25	1	na
1	17	4	65	0.03	19.0	0.37	0.01	0.38	1	na
1	17	4	73	0.04	15.0	0.35	0.03	0.38	2	na
1	17	4	94	0.07	25.0	0.80	0.04	0.84	2	na
1	17	4	98	0.08	22.0	0.65	0.42	1.07	2	na
1	17	4	126	0.13	24.0	1.39	0.08	1.47	3	na
1	17	4	128	0.13	22.0	1.13	0.08	1.21	3	na
1	17	4	171	0.23	24.0	2.54	0.17	2.72	3	na
2	18	1	148	0.17	25.0	1.74	0.11	1.84	2	na
2	18	2	76	0.05	24.0	0.57	0.03	0.59	1	na
2	18	2	99	0.08	25.0	0.80	0.04	0.84	1	na
2	18	2	107	0.09	27.0	1.08	0.06	1.13	1	na
2	18	2	153	0.19	27.0	2.12	0.14	2.26	4	na
2	18	3	35	0.01	13.0	0.04	0.00	0.05	1	na
2	18	3	36	0.01	11.0	0.04	0.00	0.05	1	na
2	18	3	140	0.16	26.0	1.74	0.11	1.84	2	na
2	18	3	147	0.17	26.0	1.74	0.11	1.84	3	na
2	18	4	97	0.07	25.0	0.80	0.04	0.84	3	na
2	18	4	104	0.09	19.0	0.88	0.06	0.94	2	na
2	18	4	114	0.10	26.0	1.08	0.06	1.13	2	na
2	18	4	118	0.11	25.0	1.08	0.06	1.13	2	na
2	18	4	179	0.25	27.0	2.54	0.17	2.72	3	na
3	19	1	40	0.01	9.0	0.04	0.00	0.05	1	na
3	19	1	40	0.01	13.0	0.04	0.00	0.05	1	na

Anexo 4.3. (Continuación)

SITIO	ID	SECTOR	DAP (cm)	AB (m2)	ALTURA (m)	VOL. FUSTE (m3)	VOL. RAMAS (m3)	VOL. IND.(m3)	COB (%)	OBS.
LOCALIDAD AGUA ZARCA										
3	19	1	135	0.15	24.0	1.74	0.11	1.84	3	na
3	19	1	147	0.17	25.0	1.74	0.11	1.84	3	na
3	19	1	154	0.19	24.0	2.12	0.14	2.26	2	na
3	19	3	20	0.00	6.0	0.04	0.00	0.05	0	na
3	19	3	48	0.02	17.0	0.13	0.01	0.14	1	na
3	19	3	133	0.14	25.0	1.39	0.08	1.47	2	na
3	19	4	24	0.00	6.0	0.04	0.00	0.05	0	na
3	19	4	38	0.01	11.0	0.04	0.00	0.05	1	na
3	19	4	41	0.01	11.0	0.09	0.01	0.10	1	na
3	19	4	56	0.02	13.0	0.09	0.01	0.10	1	na
3	19	4	124	0.12	23.0	1.13	0.08	1.21	1	na
3	19	4	137	0.15	23.0	1.41	0.11	1.52	3	na
3	19	4	152	0.18	25.0	2.12	0.14	2.26	2	na
4	20	1	34	0.01	15.0	0.06	0.00	0.06	1	na
4	20	1	35	0.01	12.0	0.04	0.00	0.05	0	na
4	20	1	42	0.01	15.0	0.13	0.01	0.14	1	na
4	20	1	43	0.01	13.0	0.09	0.01	0.10	1	na
4	20	1	43	0.01	17.0	0.13	0.01	0.14	0	na
4	20	1	47	0.02	14.0	0.13	0.01	0.14	1	na
4	20	1	63	0.03	18.0	0.23	0.02	0.25	1	na
4	20	1	64	0.03	15.0	0.23	0.02	0.25	1	na
4	20	1	70	0.04	23.0	0.37	0.01	0.38	1	na
4	20	1	115	0.11	28.0	1.08	0.06	1.13	1	na
4	20	1	118	0.11	27.0	1.08	0.06	1.13	3	na
4	20	1	130	0.13	29.0	1.64	0.08	1.72	2	na
4	20	2	132	0.14	23.0	1.13	0.08	1.21	3	na
4	20	2	136	0.15	23.0	1.41	0.11	1.52	2	na
4	20	2	149	0.18	25.0	1.74	0.11	1.84	1	na
4	20	3	76	0.05	25.0	0.57	0.03	0.59	1	na
4	20	3	77	0.05	26.0	0.57	0.03	0.59	1	na

Anexo 4.3. (Continuación)

SITIO	ID	SECTOR	DAP (cm)	AB (m2)	ALTURA (m)	VOL. FUSTE (m3)	VOL. RAMAS (m3)	VOL. IND.(m3)	COB (%)	OBS.
LOCALIDAD AGUA ZARCA										
4	20	3	102	0.08	24.0	0.80	0.04	0.84	1	na
4	20	3	139	0.15	27.0	1.74	0.11	1.84	2	na
4	20	3	182	0.26	26.0	2.54	0.17	2.72	2	na
4	20	4	96	0.07	24.0	0.80	0.04	0.84	1	na
4	20	4	98	0.08	26.0	0.80	0.04	0.84	1	na
4	20	4	117	0.11	25.0	1.08	0.06	1.13	2	na
4	20	4	119	0.11	26.0	1.08	0.06	1.13	2	na
4	20	4	137	0.15	25.0	1.74	0.11	1.84	2	na

Sitio= No. de sitio en la localidad registrada, ID= Identificador del cuadrante, DAP (cm)= Diámetro a la altura de pecho expresado en centímetros, Altura (m)= Altura del individuo expresado en metros, Vol. Fuste (m³)= Volumen de madera calculado para el fuste, Vol. Ramas (m³)= Volumen de madera calculado para las ramas expresado en metros cúbicos, Cob (%)= Porcentaje de cobertura de la copa en el cuadrante, Obs= Observaciones

Anexo 5.1. Factores geofísicos y climáticos de las poblaciones de *Pinus martinezii* en la cuenca de Cuitzeo, obtenidos a partir de la sobreposición cartográfica.

STIOS	LOCALIDAD	X	Y	SUELOS	GEOLOGIA	GEOFORMAS	ALTITUD	PEND (°)	EXPOS	T MEDIA (°C)	PRECIP (mm)
NUEVA VICTORIA											
25	Nueva Victoria	314,656	2,186,002	Luvisoles	Domos dacíticos y riolíticos	CLLA	2,600.0	6.68	s/e	13.86	1,221.63
26	Nueva Victoria	315,468	2,185,118	Luvisoles	Domos dacíticos y riolíticos	CLLA	2,488.3	23.9	Sur	14.46	1,147.77
27	Nueva Victoria	315,448	2,185,544	Luvisoles	Domos dacíticos y riolíticos	CLLA	2,509.2	10.64	Sureste	14.35	1,161.48
28	Nueva Victoria	314,553	2,185,912	Luvisoles	Domos dacíticos y riolíticos	CLLA	2,580.0	17.29	Sur	13.96	1,209.18
29	Nueva Victoria	314,622	2,184,835	Luvisoles	Domos dacíticos y riolíticos	CCLA	2,440.0	15.53	Noroeste	14.72	1,115.59
AGUA ZARCA											
8	Agua Zarca	277,188	2,168,608	Andosoles	Ignimbritas	CLLA	2,296.8	9.37	Este	15.48	1,021.30
9	Agua Zarca	277,152	2,167,805	Andosoles	Ignimbritas	CLLA	2,320.0	16.78	Noreste	15.36	1,036.04
10	Agua Zarca	277,205	2,168,061	Andosoles	Ignimbritas	CLLA	2,297.1	7.25	Noreste	15.48	1,021.86
11	Agua Zarca	278,267	2,169,307	Andosoles	Ignimbritas	CLLA	2,317.1	6.77	Suroeste	15.37	1,035.47
12	Agua Zarca	278,579	2,169,262	Andosoles	Ignimbritas	CLLA	2,336.2	11.09	Sur	15.26	1,048.22
13	Agua Zarca	277,495	2,167,792	Andosoles	Ignimbritas	CLLA	2,295.4	4.73	Noreste	15.48	1,020.81
14	Agua Zarca	277,116	2,167,979	Andosoles	Ignimbritas	CLLA	2,310.0	9.37	Noreste	15.40	1,031.02
15	Agua Zarca	278,353	2,168,773	Andosoles	Ignimbritas	CCLA	2,320.6	1.43	Noroeste	15.35	1,037.83
16	Agua Zarca	278,118	2,168,439	Andosoles	Ignimbritas	CCLA	2,320.0	5.43	Sureste	15.35	1,037.40
17	Agua Zarca	277,666	2,168,074	Andosoles	Ignimbritas	CLLA	2,293.3	11.2	Noroeste	15.49	1,019.83
EL TEMAZCAL											
1	Temazcal	294,300	2,174,331	Luvisoles	Basaltos y dacitas	CLM	2,480.0	14.58	Sureste	14.49	1,143.42
2	Temazcal	294,471	2,174,448	Luvisoles	Basaltos y dacitas	CLM	2,527.4	7.47	Sureste	14.25	1,173.52
4	Temazcal	294,552	2,174,537	Luvisoles	Basaltos y dacitas	CLM	2,528.3	18.57	Noroeste	14.24	1,174.53
3	Temazcal	294,569	2,174,565	Luvisoles	Basaltos y dacitas	CLM	2,531.7	19.91	Noroeste	14.22	1,176.77

STIOS	LOCALIDAD	X	Y	SUELOS	GEOLOGIA	GEOFORMAS	ALTITUD	PEND (°)	EXPOS	T MEDIA (°C)	PRECIP (mm)
CERRO MOSO											
20	Cerro Moso	318,231	2,195,672	Luvisoles	Depósitos de caída	CLLA	2,305.0	14.31	Oeste	15.43	1,027.65
19	Cerro Moso	318,201	2,195,886	Luvisoles	Depósitos de caída	CLLA	2,324.0	10.49	Oeste	15.33	1,040.36
18	Cerro Moso	318,486	2,195,824	Luvisoles	Domos dacíticos y riolíticos	CLLA	2,365.0	7.13	Oeste	15.12	1,065.92
LAGUNA VERDE											
23	Agua Verde	328,285	2,194,259	Andosoles	Conos andesíticos	CLLA	2,983.3	9.93			1,473.54
24	Agua Verde	328,294	2,194,192	Andosoles	Conos andesíticos	CLLA	2,995.8	11.04	Noroeste	11.76	1,481.46
21	Agua Verde	328,074	2,194,095	Andosoles	Conos andesíticos	CLLA	3,000.0	10.76	Oeste	11.73	1,485.36
22	Agua Verde	328,276	2,194,089	Andosoles	Conos andesíticos	CLLA	3,022.1	2.07	Noroeste	11.62	1,499.28
LA JOYA											
5	La Joya	267,663	2,156,692	Andosoles	Depósitos superficiales	CLC	2,284.8	6.71	Norte	15.54	1,013.84

