



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES
FACULTAD DE INGENIERÍA
FACULTAD DE PSICOLOGÍA
FACULTAD DE FILOSOFÍA
FACULTAD DE CIENCIAS POLÍTICAS Y SOCIALES
FACULTAD DE QUÍMICA

VALORACIÓN DEL POTENCIAL DE SERVICIOS AMBIENTALES
HIDROLÓGICOS EN VEGETACIONES CONTRASTANTES DE LA SIERRA
GORDA DE QUERÉTARO

TESIS

QUE COMO PARTE DE LOS REQUISITOS PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN GESTIÓN INTEGRADA DE CUENCAS

PRESENTA

GEOG. RENÉ LEONARDO MENDOZA PEDRAZA

DIRIGIDA POR

DR. EUSEBIO JR VENTURA RAMOS

Querétaro, Qro. Mayo 2008

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
BIBLIOTECA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES



No. ADG. 1LH00030

No. TITULO 58

CLASIFI. 333.9116

MS39V



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y FISICAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y ESTADISTICAS
Y ACREDITACION DE SERVICIOS
CARRERA DE CIENCIAS QUIMICAS
QUIMICA ORGANICA

VALORACION DEL POTENCIAL DE SERVICIOS AFILIADOS
HIDROLOGIA Y METEOROLOGIA EN EL ESTADO DE QUERETARO
QUIMICA ORGANICA

TEMA

ESTE TRABAJO FUE DESARROLLADO PARA CUMPLIR EL GRADO DE

MAESTRO EN GESTION INTERAM DE CIENCIAS

PROFESOR

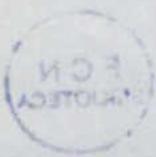
DR. GONZALO MENDOZA TORRES

CIENCIA Y TECNICA

ON BUSCA DE NUEVOS PRODUCTOS

Queretaro, Quintana Roo, Quintana Roo

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO
SECRETARIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y ESTADISTICAS





Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ciencias Naturales
Maestría en Gestión Integrada de Cuencas



VALORACIÓN DEL POTENCIAL DE SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS EN
VEGETACIONES CONTRASTANTES DE LA SIERRA GORDA DE QUERÉTARO

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Maestro en Gestión Integrada de Cuencas

Presenta:

Geog. René Leonardo Mendoza Pedraza

Dirigido por:

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos

SINODALES

Dr. Eusebio Jr. Ventura Ramos
Presidente

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Secretario

Dr. Miguel Ángel Domínguez Cortázar
Vocal

Dr. Alejandro Sánchez Vélez
Suplente

Dr. Enrique Sanjurjo Rivera
Suplente

Firma

Firma

Firma

Firma

Firma

Biol. Jaime Angeles Angeles
Director de la Facultad

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Mayo 2008
México

RESUMEN

El presente estudio fue realizado en sitios de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, en el Estado de Querétaro, con la finalidad de valorar el potencial de servicios ambientales hidrológicos en diversos tipos de vegetaciones mediante la medición de variables meteorológicas e hidrológicas. La precipitación, temperatura y humedad relativa del aire, fueron medidas en forma continua durante el periodo de estudio. Para cada evento de precipitación se midió la erosión y el escurrimiento proveniente de parcelas tipo USLE (Ecuación Universal de Pérdida de Suelos). Los resultados obtenidos de erosión y escurrimiento para una vegetación de Pino se utilizaron para determinar variables hidrológicas de interés para la planeación y manejo de una microcuenca de la Sierra Gorda mediante la herramienta AGWA. La tormenta de diseño tuvo una intensidad de 40 mm y una duración de 1.5 horas. Los resultados indicaron que la vegetación regula de manera importante el efecto adverso de la lluvia en los procesos hidrológicos tales como el escurrimiento, erosión de suelos y concentración de sedimentos. El bosque de pino redujo la escorrentía superficial hasta en un 90%. La pérdida de suelo acumulada medida en las parcelas de erosión durante 2006 para la condición de suelo sin vegetación fue de 88.6 kg/m², mientras que el valor correspondiente para la parcela con vegetación de pino fue de solo 0.3 kg/m², lo que lo hace prácticamente insignificante e implica una reducción del 100% de la erosión. De un total de 1146 mm de precipitación anual durante el 2006, el 33% se convirtió en escurrimiento superficial en la parcela sin vegetación, en comparación con solo un 3.5% para la parcela con pino. Estas dos condiciones implicaron una mejor calidad del agua de escorrentía en el bosque de pino. La intercepción promedio de la lluvia por el pino fue de alrededor del 20%. El bosque de pino redujo también la variación de la temperatura (aumentó la mínima y redujo la máxima) en comparación con la condición sin vegetación. Esto implica que, en adición al servicio hidrológico de reducción de la erosión y escurrimiento y aumento de la calidad del agua, la vegetación regula la temperatura, lo que puede tener un impacto regional positivo ante el calentamiento global.

Palabras clave: Servicios ambientales hidrológicos, monitoreo climático, erosión de suelos, Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Ecosistemas.

SUMMARY

The present study was performed in sites of the Sierra Gorda Biosphere Reserve, in the State of Queretaro, with the purpose of evaluating the potential for environmental hydrological services in different types of vegetation, by measuring meteorological and hydrological variables. Precipitation, temperature and air relative humidity were measured continuously during the study period. For each rainfall event, erosion and runoff from USLE (Universal Soil Loss Equation) - type plots were measured. The obtained erosion and runoff results for pine vegetation were used to determine hydrological variables of interest for planning and management of small watershed in the Sierra Gorda using the tool AGWA. The design storm had an intensity of 40 mm and duration of 1.5 hours. The results indicated that vegetation regulates in a significant way negative effect of rain in hydrological processes, such as runoff, soil erosion and sediment concentration. Pine forest reduced surface runoff up 90%. Cumulative soil loss measured in soil erosion plots during 2006 for the bare soil condition was 88.6 kg/m^2 , while the corresponding value for the pine vegetation plot was only 0.3 kg/m^2 , which is practically insignificant and implies a 100% reduction of erosion. From a total of 1146 mm annual precipitation during 2006, 33% was converted to surface runoff in the bare plot, as compared to only 3.5% in the pine plot. These two conditions implied a greater water quality of runoff from the pine forest. Interception of precipitation by pine vegetation was about 20%. Pine forest also reduced temperature variation (increased minimum and reduced maximum temperature) in comparison with the non-vegetation condition. This implies that, in addition to the hydrological service of reducing soil erosion and runoff and increasing water quality, vegetation regulates temperature, which may have a positive regional impact on global warming.

Key words: Environmental hydrological services, climate monitoring, soil erosion, Sierra Gorda Biosphere Reserve, ecosystems.

Persevera en tu empeño y hallarás lo que buscas, prosigue tu fin sin desviarte
y alcanzarás tu empeño...

Siddhārtha Gautama (563-486 ac)

A mis Padres

A mi Esposa

A mis Hijos

AGRADECIMIENTOS

Les agradezco a todas las personas, amigos y compañeros que con su colaboración y apoyo directo e indirecto ayudaron a la realización del presente trabajo.

A la Universidad Autónoma de Querétaro.

A mis profesores de la maestría, por compartir su conocimiento y tiempo.

Al Dr. Eusebio Ventura Ramos que con su orientación y consejo dirigió el desarrollo de la tesis.

A mis sinodales quienes ampliamente me orientaron para enriquecer la investigación.

A mis compañeros de generación con quienes compartimos este interés por la gestión de cuencas.

A la Dirección de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro y al Grupo Ecológico Sierra Gorda IAP por sus facilidades de tiempo y equipo.

A la Fundación Gonzalo Río Arronte IAP que gracias al proyecto "Restauración integral de cuencas en la Sierra Gorda del Estado de Querétaro" aportó para la instrumentación y monitoreo meteorológico y de erosión de suelos.

Al Fondo Sectorial CONACYT-SEMARNAT que con el proyecto SEMARNAT-2004-C01-0240 titulado "Valoración de los servicios ambientales hidrológicos en cuencas hídricas de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda" apoyó para la realización del presente trabajo.

A los habitantes de la Sierra Gorda que desinteresadamente auxilian siempre y a quienes deseo que los resultados puedan servirles en alguna medida para el disfrute actual y futuro de su gran belleza natural.

INDICE

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1. <i>EL PAGO POR SERVICIOS AMBIENTALES</i>	4
2.2. <i>LOS SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS EN EL MUNDO</i>	6
2.3. <i>LOS SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS EN MÉXICO</i>	8
2.4. <i>EL CICLO HIDROLÓGICO</i>	10
2.5. <i>MODELO DEL SISTEMA HIDROLÓGICO</i>	12
2.6. <i>ECUACIÓN FUNDAMENTAL DE LA HIDROLOGÍA</i>	13
2.7. <i>PRECIPITACIÓN</i>	14
2.8. <i>ESCORRENTÍA</i>	15
2.9. <i>INFILTRACIÓN</i>	16
2.10. <i>INTERCEPCIÓN</i>	16
2.11. <i>HUMEDAD DEL SUELO</i>	18
2.12. <i>EL PAPEL DE LA VEGETACIÓN EN EL CICLO HIDROLÓGICO</i>	19
2.13. <i>VALORACIÓN DE LOS SERVICIOS AMBIENTALES HIDROLÓGICOS</i>	22
HIPOTESIS Y OBJETIVOS	28
HIPÓTESIS	28
OBJETIVO GENERAL	28
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	28
III. METODOLOGIA	29
3.1. <i>CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LOS SITIOS DE ESTUDIO</i>	31
3.2. <i>CARACTERIZACIÓN DE LA VEGETACIÓN: ESTRUCTURA Y COMPOSICIÓN EN SITIOS SELECCIONADOS Y REPRESENTATIVOS</i>	33
3.3. <i>EVALUACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS</i>	35
3.3.1. <i>Intercepción</i>	35
3.3.2. <i>Escurrimiento y erosión hídrica</i>	36
3.3.3. <i>Humedad del Suelo</i>	41
3.4. <i>APLICACIÓN DEL MODELO RUSLE PARA EROSIÓN DE SUELOS A NIVEL MICROCUENCA</i>	42
3.5. <i>APLICACIÓN DE LA HERRAMIENTA AGWA PARA LA EVALUACIÓN DEL ESTADO DE DEGRADACIÓN EN UNA MICROCUENCA</i>	43
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1. <i>ANÁLISIS DE LA TEMPERATURA</i>	44
4.1.1. <i>La temperatura en el sitio de "El Pilón"</i>	44
4.1.2. <i>La temperatura en el sitio "Tancoyolillo"</i>	50
4.2. <i>ANÁLISIS DE LA HUMEDAD RELATIVA</i>	53
4.2.1. <i>La humedad relativa en el sitio "El Pilón"</i>	53
4.2.2. <i>Análisis de la humedad relativa en el sitio de Tancoyolillo</i>	58
4.3. <i>ANÁLISIS DE LA PRECIPITACIÓN</i>	61
4.3.1. <i>La Precipitación en el sitio de El Pilón</i>	61
4.3.2. <i>Precipitación en el sitio Tancoyolillo</i>	63
4.3.3. <i>Precipitación en el sitio Aserradero</i>	65
4.4. <i>ANÁLISIS DEL ESCURRIMIENTO, LA EROSIÓN DEL SUELO Y LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS</i>	67
4.5. <i>INTERCEPCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN Y ESTADO DEL AGUA EN EL SUELO</i>	72
4.6. <i>CARACTERIZACIÓN DE LA VEGETACIÓN</i>	74
4.6.1. <i>Transectos de vegetación en el sitio del Aserradero</i>	74
4.6.2. <i>Transecto de vegetación en el sitio de Tancoyolillo</i>	77
4.7. <i>ESTUDIO DE CASO: APLICACIÓN DE LOS MODELOS RUSLE Y AGWA EN LA MICROCUENCA RÍO ESCANELA</i>	81
4.7.1. <i>Descripción de la microcuena Escanela</i>	81
4.7.2. <i>RESULTADOS</i>	84
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
VI. REFERENCIAS	103

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
2.1	Balance Anual de Agua Global.	12
2.2	Técnicas de valoración ambiental	26

INDICE DE TABLAS

Tabla		Página
4.1	Pendiente de la curva de calentamiento y enfriamiento en un bosque de encinos en El Pílon, Jalpan, Qro.	48
4.2	Comparativo de valores de temperatura de los sensores ubicados dentro y fuera del Bosque Templado de Encinos en El Pílon, Mpio de Jalpan de Serra, Qro.	49
4.3	Valores de los parámetros a y b en la ecuación de regresión $HR (\%) = a + b \text{ TEM } (^{\circ}\text{C})$, donde HR es la humedad relativa y TEM es la temperatura del aire. Caso fuera del Bosque Templado en El Pílon.	57
4.4	Valores de los parámetros a y b en la ecuación de regresión $HR (\%) = a + b \text{ TEM } (^{\circ}\text{C})$, donde HR es la humedad relativa y TEM es la temperatura del aire. Caso dentro del Bosque Templado en El Pílon.	58
4.5	Valores de los parámetros a y b en la ecuación de regresión $HR (\%) = a + b \text{ TEM } (^{\circ}\text{C})$, donde HR es la humedad relativa y TEM es la temperatura del aire. Caso fuera de la Selva Baja Caducifolia.	60

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
2.1	Ciclo Hidrológico con un balance promedio global en unidades relativas a un valor de 100 para la precipitación terrestre.	11
2.2	Esquema conceptual de la relación Hidrodinámica, Morfodinámica y el crecimiento y sucesión de la vegetación	20
3.1	Localización de los sitios de trabajo dentro de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Qro.	30
3.2	Sensor de humedad y temperatura del aire ubicado en el bosque templado de encinos en El Pilón, Jalpan de Serra.	31
3.3	Sensor de humedad y temperatura del aire ubicado fuera del bosque en El Pilón, Jalpan de Serra	35
3.4	Pluviómetro, sin tapa, mostrando el mecanismo de balancín en el Aserradero, Pinal de Amoles.	33
3.5	Estructura Vertical de la Vegetación donde se observan tres estratos	37
3.6	Estructura Horizontal de la Vegetación.	35
3.7	Sistema de canaletas para medición de la intercepción de lluvia por la vegetación	36
3.8	Parcela de referencia o estándar instalada en El Aserradero, Pinal de Amoles.	37
3.9	Parcela de Escurrimiento instalada dentro del bosque de Pino en El Aserradero, Pinal de Amoles.	38
3.10	Medición del volumen con ayuda de una regla de madera en la Parcela de Escurrimiento instalada dentro del bosque de Pino en El Aserradero, Pinal de Amoles.	39
3.11	Registro de la humedad del suelo mediante los sensores Watermark en combinación con el medidor, en El Pilón, Jalpan de Serra	41
4.1	Distribución mensual de la temperatura fuera del Bosque de Encino en El Pilón, Mpio.de Jalpan de Serra, Qro., durante el año 2006.	44
4.2	Variación horaria de la temperatura dentro del Bosque de Encino para los meses del 2006 en El Pilón, Mpio de Jalpan de Serra, Qro.	45
4.3	Distribución mensual de la temperatura dentro de bosque en El Pilón, Mpio.de Jalpan de Serra, Qro., durante el año 2006.	46
4.4	Variación horaria de la temperatura dentro del Bosque de Encino para los meses del 2006 dentro de Bosque de encinos en El Pilón, Mpio de Jalpan de Serra, Qro.	47
4.5	Relación entre la temperatura fuera y dentro del bosque para El Pilón,	49

4.6	Variación de la temperatura durante el año 2006 en el Sitio El Pilón, Municipio de Jalpan de Serra, Qro.	50
4.7	Distribución mensual de la temperatura en Tancoyolillo, Mpio.de Jalpan de Serra, Qro., durante el año 2006.	51
4.8	Variación horaria de la temperatura para los meses del 2006 en Tancoyolillo, Mpio de Jalpan de Serra, Qro.	52
4.9	Variación de la temperatura durante el año 2006 en el sitio Tancoyolillo, Municipio de Jalpan de Serra, Qro.	52
4.10	Variación de la humedad relativa media mensual fuera del Bosque Templado durante el 2006 El Pilón, Mpio. de Jalpan de Serra, Qro.	53
4.11	Variación de la humedad relativa media mensual dentro del Bosque Templado durante el 2006 El Pilón, Mpio. de Jalpan de Serra, Qro.	54
4.12	Distribución diaria de la humedad relativa fuera del Bosque Templado durante el año 2006, en el sitio El Pilón, Municipio de Jalpan de Serra, Qro.	55
4.13	Distribución diaria de la humedad relativa dentro del Bosque Templado durante el año 2006, en el sitio El Pilón, Municipio de Jalpan de Serra, Qro.	56
4.14	Variación de la humedad relativa media mensual fuera de la selva Baja Caducifolia durante el 2006 Tancoyolillo, Mpio. de Jalpan de Serra, Qro.	59
4.15	Distribución diaria de la humedad relativa fuera de la Selva Baja Caducifolia durante el año 2006, en el sitio Tancoyolillo, Municipio de Jalpan de Serra, Qro.	59
4.16	Distribución de la precipitación durante el año 2006, sitio El Pilón, Municipio de Jalpan de Serra, Qro	61
4.17	Duración de los eventos de lluvia durante el año 2006, sitio El Pilón, Municipio de Jalpan de Serra, Qro	62
4.18	Distribución de la precipitación durante el año 2006, sitio Tancoyolillo, Municipio de Jalpan de Serra, Qro	63
4.19	Duración de los eventos de lluvia durante el año 2006, sitio Tancoyolillo, Municipio de Jalpan de Serra, Qro	64
4.20	Distribución de la precipitación durante el año 2006, sitio El Aserradero, Municipio de Pinal de Amoles, Qro	65
4.21	Duración de los eventos de lluvia durante el año 2006, sitio El Aserradero, Municipio de Pinal de Amoles, Qro	66
4.22	Hora de inicio de los eventos de lluvia durante el año 2006, sitio El Aserradero, Municipio de Pinal de Amoles, Qro.	67

4.23	Escurrimiento en mm en una parcela sin vegetación y con vegetación de Pino en el sitio Aserradero, Pinal de Amoles, Qro.	68
4.24	Erosión del suelo en una parcela sin vegetación y con vegetación de Pino en el sitio Aserradero, Pinal de Amoles, Qro.	69
4.25 abc	Escurrimiento, erosión y concentración de sedimentos para una condición sin vegetación y con vegetación de pino en Pinal de Amoles, Qro.	71
4.26	Gráfica de caja y ejes para los valores de intercepción de un árbol de pino en Pinal de Amoles, Qro.	72
4.27	Variación de la tensión del agua en el suelo bajo vegetación de pino y en una parcela sin vegetación en Pinal de Amoles, Qro.	73
4.28	Cobertura por especie en el transecto 1 de bosque de pino en el Aserradero, Pinal de Amoles, Qro.	74
4.29	Dibujo esquematizado de la estructura horizontal (cobertura) y vertical (estratificación) transecto 1 Bosque de Pino en el sitio El Aserradero, Mpio Pinal de Amoles, Qro (Narvaez, A., 2007)	78
4.30	Cobertura por especie en el transecto 2 de bosque de pino en el Aserradero, Pinal de Amoles, Qro.	76
4.31	Dibujo esquematizado de la estructura horizontal (cobertura) y vertical (estratificación) transecto 2 Bosque de Pino en el sitio El Aserradero, Mpio. Pinal de Amoles, Qro (Narvaez, A., 2007)	79
4.32	Cobertura por especie en el transecto 3 de bosque tropical caducifolio en Tancoyolillo, Jalpan, Qro.	77
4.33	Dibujo esquematizado de la estructura horizontal (cobertura) y vertical (estratificación) transecto 3 selva baja caducifolia en el sitio Tancoyolillo, Mpio. Jalpan de Serra, Qro (Narvaez, A., 2007)	78
4.34 abc	Cobertura por frecuencia de individuos para los tres transectos en bosque de pino-encino y selva baja caducifolia	83
4.35	Distribución del Bosque de Pino en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda.	81
4.36	Distribución del Bosque de Pino dentro de la Microcuenca Río Escanela	82
4.37	Distribución de los tipos de suelo de la microcuenca Río Escanela.	83
4.38	Erosión Actual de la Microcuenca utilizando el valor del Factor C que se obtuvo por el monitoreo	84
4.39	Erosión Actual de la Microcuenca utilizando el valor del Factor C reportado en Tablas	85

4.40	Erosión Actual utilizando modelo RUSLE con datos obtenidos por el monitoreo de erosión	89
4.41	Erosión Actual utilizando RUSLE con datos de las tablas establecidas para el modelo	89
4.42	Escenario Hipotético de la erosión en la microcuenca en el supuesto de remover en su totalidad la cubierta de Pino	
4.43	Erosión Actual considerando la remoción de la vegetación de bosque de pino	88
4.44	Volumen de Escurrimiento en la microcuenca Río Escanela	89
4.45	Volumen de Intercepción en la microcuenca Río Escanela	90
4.46	Lamina de escurrimiento (mm) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr con bosque de pino.	91
4.47	Lamina de escurrimiento (mm) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr sin bosque de pino	91
4.48	Lamina de escurrimiento (mm) y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr con bosque de pino	92
4.49	Lamina de escurrimiento (mm) y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr sin bosque de pino	92
4.50	Flujo pico (m^3/s) y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr con bosque de pino	93
4.51	Escurrimiento pico (m^3/s) y distribución de superficies en la microcuenca Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. sin bosque de pino	93
4.52	Escurrimiento pico (m^3/s) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (con bosque de Pino)	94
4.53	Escurrimiento pico (m^3/s) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (sin bosque de Pino)	94
4.54	Infiltración mm y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr con bosque de pino	95
4.55	Infiltración mm y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr sin bosque de pino	95
4.56	Infiltración (mm) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr.(con bosque de Pino)	96

4.57	Infiltración (mm) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (sin bosque de Pino)	96
4.58	Producción de sedimentos (Ton/ha/año) y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (con bosque de Pino)	98
4.59	Producción de sedimentos (Ton/ha/año) y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (sin bosque de Pino)	98
4.60	Producción de sedimentos (Ton/ha/año) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (con bosque de Pino)	99
4.61	Producción de sedimentos (Ton/ha/año) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (sin bosque de Pino)	99

I. INTRODUCCIÓN

La Sierra Gorda, ubicada al norte del estado de Querétaro, es un enorme sistema montañoso formado por las estribaciones de la Sierra Madre Oriental. Se trata de una región accidentada y de pendientes diversas con altitudes que varían desde los 200 hasta los 3,100 msnmm.

Geográficamente, el área se encuentra en línea recta a tan solo ciento sesenta kilómetros de las costas del Golfo de México y, dado que la extensa llanura costera del Golfo por su mínima altitud no constituye ningún obstáculo, las montañas de Sierra Gorda son el primer sitio en el que la humedad proveniente del mar toca tierra y se descarga en ellas en forma de lluvia.

En 1997, ésta región fue declarada como área natural protegida con categoría de Reserva de la Biosfera. Es una de las áreas naturales protegidas prioritarias de México debido a su diversa riqueza biológica establecida en su complejo medio físico natural.

Esta diversidad biológica presenta relaciones con su marcado gradiente altitudinal, que de igual modo influye en las condiciones meteorológicas de la Sierra Gorda. La combinación de estos factores ha favorecido el desarrollo de ecosistemas tan variados como son los matorrales xerófilos, fracciones de bosques mesófilos de montaña, selvas bajas caducifolias, bosques de coníferas, encinares, por mencionar algunos de los 14 tipos de vegetación existentes. Incluso la orientación de sus vertientes propicia el establecimiento de ecosistemas específicos, tal es el caso de la zona llamada semidesértica del poniente de la sierra, la cual está influenciada por el efecto de sombra orográfica provocado por las altitudes del macizo de Pinal de Amoles que llega a alcanzar los 3100 msnmm, donde la humedad se queda hacia la vertiente oriental y provoca que el aire llegue seco a esta zona lo que causa la aridez del paisaje.

Por el lado contrario, encontramos gradientes de precipitación que alcanzan hasta los 1500 mm de lluvia anuales en la porción oriental de la sierra colindante con los municipios de Xilitla y Aquismón de San Luis Potosí.

Sus condiciones de humedad y características geológicas, así como de vegetación, hacen de la Sierra Gorda un lugar de importancia en la prestación de Servicios Ambientales Hidrológicos pues capta y dirige sus aguas a zonas colindantes con la Sierra.

Como otras áreas rurales del país, la región ha sufrido un desarrollo no-sustentable y carente de planeación. Con aproximadamente 384 mil hectáreas, su superficie constituye una tercera parte del territorio del Estado de Querétaro en la cual están asentados alrededor de 94 mil habitantes, que representan el 10% de la población del Estado, y que en muchos casos viven en condiciones de marginación, donde sus tradicionales esquemas de producción no satisfacen del todo sus necesidades básicas, con la consiguiente presión sobre sus valiosos recursos naturales (INE, 1999).

Desafortunadamente, no se han desarrollado de manera extensa estudios que permitan conocer las entradas de agua de lluvia en la zona por las precipitaciones pluviales, la intercepción de ella por diferentes tipos de vegetación y sus efectos en procesos hidrológicos relacionados como la infiltración, el escurrimiento y la erosión bajo diferentes ecosistemas.

En la búsqueda de herramientas para conseguir el manejo sostenible del territorio, en varios países de América Latina se ha utilizado el concepto de Pago por Servicios Ambientales, el cual ha resultado innovador y representa una nueva opción para el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.

Los Servicios Ambientales Hidrológicos pueden ser considerados desde el punto de vista de la disponibilidad y calidad del agua, así como del control de la sedimentación, promoviendo incentivos a los productores de las partes altas de la cuenca para cuidar la calidad y cantidad de agua que aprovechan los usuarios en las partes bajas de la misma cuenca.

Bajo este contexto, el presente estudio tiene como objetivo contribuir a la generación de conocimiento que permita valorar el potencial de oferta de los

Servicios Ambientales Hidrológicos en la Sierra Gorda de Querétaro. Esta valoración es importante porque puede contribuir a la definición de esquemas para el pago por Servicios Ambientales Hidrológicos en la región.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. *El Pago por Servicios Ambientales*

Los instrumentos económicos y de mercado han sido utilizados por varias décadas en la prevención de la contaminación y la conservación de los ecosistemas. La mayor parte de ellos tratan de prevenir externalidades ambientales negativas, una externalidad se define como los costos o beneficios de la actividad económica externa al mercado, por la que no se paga ni se recibe algo a cambio por parte de aquellos agentes involucrados en la transacción. Existen externalidades positivas y negativas. Las externalidades existen cuando los derechos de propiedad no son definidos, estos se obtienen cuando se tienen derechos de exclusividad sobre el uso de una propiedad. Por ejemplo, se tiene derecho de propiedad de un automóvil pero no se tiene al aire que se contamina,; La prevención de las externalidades es por medio de impuestos o derechos ecológicos u otras herramientas sustentadas en el principio de que "el que contamina, paga". En el decenio pasado los nuevos enfoques se han centrado en la generación de externalidades ambientales positivas por medio de los incentivos económicos pertinentes, la mayor parte de las veces por medio de subsidios u otro tipo de programas ambientales, por ejemplo programas agroambientales (Mayrand y Paquin, 2004).

El Pago por Servicios Ambientales (PSA) es uno de estos nuevos enfoques orientados al apoyo de las externalidades ambientales positivas por medio de la transferencia de recursos financieros de los beneficiarios de ciertos servicios ambientales hacia quienes proporcionan dichos servicios, o son fiduciarios de los recursos ambientales. En la década pasada, el uso de esquemas de PSA ha ganado popularidad para cuencas hídricas, diversidad biológica, secuestro de carbono y belleza de paisaje.

La mayor parte de los esquemas de PSA son relativamente nuevos, ya que pocos de ellos tienen más de 10 años, y muchos continúan siendo experimentales en alcance o están aún en etapa piloto. En general, poco más de

300 esquemas específicos en 2002 se han puesto en marcha a la fecha. (Pagiola y Platais, 2002).

Los mecanismos de Pago por Servicios Ambientales, consistentes en incentivar la conservación de predios forestales relevantes para la generación de algún beneficio derivado del funcionamiento del ecosistema (como la conservación de la biodiversidad o de las cuencas hidrológicas) a través de un pago a los propietarios de los bosques, han funcionado con buenos resultados en varios continentes, incluyendo varios países latinoamericanos, como Costa Rica y Brasil. La base del mecanismo de PSA es el espejo del principio "el que contamina paga": en este caso "el que conserva recibe una compensación".

Los servicios ambientales son todos los beneficios que proporcionan los distintos ecosistemas por el simple hecho de existir, ya sea en estado prístino o bajo manejo sustentable. Los beneficios que se generan por la presencia de los bosques y selvas se obtienen principalmente de los procesos y funciones biológicas propias del ecosistema que, además de influir directamente en el equilibrio ecológico, generan beneficios específicos tanto para las personas y las comunidades que habitan los ecosistemas como para la sociedad global en general, como en el caso de la captura de carbono.

Los principales servicios ambientales que nos brindan los bosques y las selvas a través de su manejo sustentable son:

- La provisión del agua en calidad y cantidad adecuadas
- La captura de carbono
- La generación de oxígeno
- El amortiguamiento del impacto de fenómenos naturales como deslaves e inundaciones
- La modulación o regulación climática
- La protección de la biodiversidad, los ecosistemas y formas de vida
- La protección y recuperación de suelos
- El paisaje y la recreación, entre otros

Entre la gama de servicios ambientales que un ecosistema forestal puede generar, el análisis de los Servicios Ambientales Hidrológicos ha resultado prioritario por considerar el problema de escasez de agua como el principal problema ambiental de nuestro país.

Entre los Servicios Ambientales Hidrológicos destacan:

- La recarga de los mantos acuíferos
- El mejoramiento de la calidad del agua
- El incremento de los flujos hídricos
- La prevención de desastres naturales, como inundaciones o deslaves
- La reducción de la erosión y sedimentación.

La provisión de estos cinco servicios ambientales, así como muchos otros, se mejorará en la medida que se logre la conservación de los recursos forestales a través de su conservación como cubierta primaria o de su manejo sustentable (INE, 2005).

2.2. Los Servicios Ambientales Hidrológicos en el Mundo

La conservación en las áreas altas de las cuencas para el mantenimiento de los servicios hídricos es una estrategia puesta en práctica en varios países de América Latina y el Caribe, entre ellos Brasil, Colombia, Costa Rica, República Dominicana, Ecuador, Honduras y Panamá (World Bank y WWF, 2003). En la mayor parte de los casos el enfoque preferido es el establecimiento de áreas protegidas, más que la creación de sistemas de PSA para mejorar las prácticas de gestión entre los usuarios. No obstante, los esquemas de PSA con base en cuencas hídricas son de uso creciente y se han puesto a funcionar en varios países, entre ellos Estados Unidos, México, Colombia, Ecuador, Costa Rica, Honduras y Brasil.

Uno de los ejemplos más famosos es el sistema que estableció la ciudad de Nueva York para proteger sus fuentes de agua potable. A finales de los años 90's, dicha urbe incrementó nueve por ciento sus derechos de agua para invertir

en la protección de las cuencas hídricas Catskill/Delaware y Croton. Ello se realizó principalmente por medio de un programa de adquisición de terrenos y servidumbres de conservación que amplían el área protegida de la cuenca hídrica a 121,500 hectáreas. Además, los agricultores y productores silvícolas reciben compensación dentro de nuevos programas para retirar de la producción áreas sensibles o para mejorar las prácticas de gestión agrícolas o silvícolas (World Bank y WWF, 2003).

Otro bien conocido ejemplo es el del Fondo Nacional del agua (Fonag) en Ecuador. El Fonag recolecta contribuciones de los usuarios del agua, incluido el organismo de manejo hídrico de la ciudad de Quito y una central hidroeléctrica, para financiar prácticas de conservación en la parte alta de la cuenca que abastece de agua potable a Quito (Echevarría et al., 2002). También en Ecuador, la municipalidad de San Pedro de Pimampiro, de la provincia de Imbabura, tiene en desarrollo un proyecto piloto orientado a la protección de las fuentes de agua potable mediante el pago a los usuarios de terrenos en la parte alta de la cuenca para que mejoren su gestión forestal en la zona (WWF y Danida, 2003).

En el valle Cauca, en Colombia, diversas asociaciones de productores agrícolas iniciaron un sistema de PSA para abordar preocupaciones relacionadas con el abasto sustentable de agua de riego (Tsen, 2002). Desde su inicio, el esquema ha llevado a la adopción de medidas de conservación en más de un millón de hectáreas. El sistema tiene ingresos por \$600,000.00 euros por derechos de uso del agua (Landell, 2002). De modo similar, productores agrícolas de la cuenca hídrica del río Guabas, Colombia, negociaron un acuerdo con usuarios corriente arriba para mejorar las prácticas de uso del suelo y mantener los flujos durante la temporada de secas. El sistema se financia con derechos adicionales por uso del agua (Bishop, 2002).

En las entidades de Paraná y Minas Gerais, en Brasil, las municipalidades reciben 5 por ciento del impuesto estatal de ventas para financiar programas de conservación en la parte alta de la cuenca y proteger así las fuentes de agua potable. Este programa ha llevado a la conservación de un millón de hectáreas de

terreno en el estado de Paraná y más de un millón de hectáreas en Minas Gerais (May, 2002). También en Brasil, el organismo de manejo de agua de Sao Paulo acordó contribuir con uno por ciento de sus ingresos para financiar actividades de conservación y restauración forestal en la cuenca hídrica Corumbatai.

En Honduras, se estableció un esquema de PSA en la cuenca hídrica de El Escondido, para proteger las fuentes de agua potable de la ciudad de Santa Bárbara, la segunda más grande del país (Cohen, 2002).

2.3. *Los Servicios Ambientales Hidrológicos en México*

Todas las sociedades se han beneficiado de los servicios ambientales. Sin embargo, hasta hace unos años no existía conciencia sobre la necesidad de compensar a los propietarios de los recursos forestales quienes hacen posible que tales servicios se generen.

En nuestro país, el tema de los servicios ambientales es relativamente nuevo y los esquemas que se han desarrollado en torno a su provisión son escasos. En el ámbito municipal destacan los esfuerzos de Coatepec, Veracruz (que puso en marcha un programa para generar Servicios Ambientales Hidrológicos) y de algunas comunidades de Oaxaca, que han promovido la captura de carbono. A nivel federal, en 2003 la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) lanzó el Programa de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos (PSAH) y en 2004 complementó su cartera de programas relacionados con servicios ambientales con el Programa para Desarrollar el Mercado de Servicios Ambientales por Captura de Carbono y los Derivados de la Biodiversidad y para Fomentar el Establecimiento y Mejoramiento de Sistemas Agroforestales (PSA-CABSA), que al día de hoy han recibido una respuesta positiva de parte de los propietarios y poseedores legítimos de bosque y selva de nuestro país.

No obstante, a pesar de los avances alcanzados en las diferentes esferas para el desarrollo de esquemas de pago por servicios ambientales, en la actualidad persisten algunos problemas asociados a la generación de estos mecanismos. En este sentido destacan:

- Los servicios ambientales que generan los bosques tienen un mercado muy pequeño e incipiente.
- No existe un precio que refleje los beneficios que generan los servicios ambientales, hacen falta estudios de valoración económica.
- Técnicamente es difícil cuantificar los servicios ambientales proporcionados por los bosques y existe una carencia de datos sobre la relación entre la oferta y la demanda de los mismos.
- El programa federal existente determina una "zona elegible", con principios válidos nacionalmente, pero que no incluyen zonas que pudieran ser relevantes en el ámbito local.

Entre los ejemplos de PSA que se pueden mencionar en México tenemos:

- Chiapas: Organizaciones campesinas venden la captura de carbono a una compañía francesa que promueve carreras de autos.
- Michoacán: Ejidatarios venden un paquete que incluye el cuidado del hábitat de los animales que los compradores cazan.
- Oaxaca: Campesinos indígenas ofrecen su conocimiento y conservación *in situ* de plantas con un potencial medicinal a institucionales de investigación y compañías farmacéuticas.
- Proyectos para evaluar los servicios ambientales dentro de la Subcuenca Cuxtepeques: Hidrología Superficial de la Subcuenca y Valor Económico de los Servicios Ambientales. Ambos proyectos, apoyados actualmente por el Programa Jóvenes por México (SEDESOL), otorga becas a prestadores de servicio social de Escuelas Públicas.
- Otro proyecto que es parte de las acciones de la SEMARNAT para fomentar el manejo integral de cuencas es la: Elaboración del Plan de Manejo Integral en la Microcuenca Cuxtepeques Alta, Municipio La Concordia, Chiapas. En atención a la problemática identificada en la microcuenca la Comisión Federal de Electricidad (CFE) apoyará con un presupuesto de 2.4 millones de pesos para dar cumplimiento a medidas de restauración establecidas en las autorizaciones de cambio de uso de suelo para líneas de transmisión eléctrica. El trabajo se llevará a cabo en coordinación con la Reserva de la

Biosfera el Triunfo, CNA, Gobierno del Estado, el Municipio la Concordia, Productores de la Región y Servicios Sociales; la Universidad Autónoma de Chapingo es la encargada de la elaboración de este plan. Las actividades por realizar bajo este proyecto son:

- Evaluación de los recursos naturales y Ordenamiento Ecológico del Territorio.
- Evaluación rural participativa.
- Caracterización hidrológica de la cuenca.
- Evaluación de la erosión de suelos.
- Diseño de proyectos productivos tipo.
- Diseño de obras tipo.
- Capacitación a técnicos y productores.
- Integración del programa de manejo en la microcuenca. (Ventura et al., 2006).

Tal parece que existen dos condiciones para ofertar servicios ambientales hidrológicos: i) Una fuente original adecuada y suficiente del recurso hídrico (precipitación) y ii) una cobertura vegetal conservada y estratificada de tal manera que contribuya significativamente a una mayor intercepción del agua de lluvia, una mayor infiltración en el suelo y una reducción de la erosión y sedimentación. Es por eso importante conocer los componentes y procesos del ciclo hidrológico para poder realizar una valoración objetiva del potencial para el pago de los servicios ambientales hidrológicos.

2.4. El Ciclo Hidrológico

En la Tierra, el agua existe en un espacio llamado hidrosfera, que se extiende desde unos quince kilómetros arriba en la atmósfera hasta un kilómetro por debajo de la litosfera o corteza terrestre. El agua circula en la hidrosfera a través de un laberinto de caminos que constituyen el ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología. El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua. El agua se

evapora desde los océanos y desde la superficie terrestre para volverse parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y *precipita* sobre la superficie terrestre o los océanos; el agua precipitada puede ser *interceptada* por la vegetación, convertirse en *flujo superficial* sobre el suelo, *infiltrarse* en él, correr a través del suelo como *flujo subsuperficial* y descargar en los ríos como *escorrentía superficial*. La mayor parte del agua interceptada y de escorrentía superficial regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar profundamente para *recargar* el agua subterránea de donde emerge en manantiales o se desliza hacia ríos para formar la escorrentía superficial, y finalmente fluye hacia el mar o se evapora en la atmósfera a medida que el ciclo hidrológico continúa (Figura 2.1) (Chow, 1988).

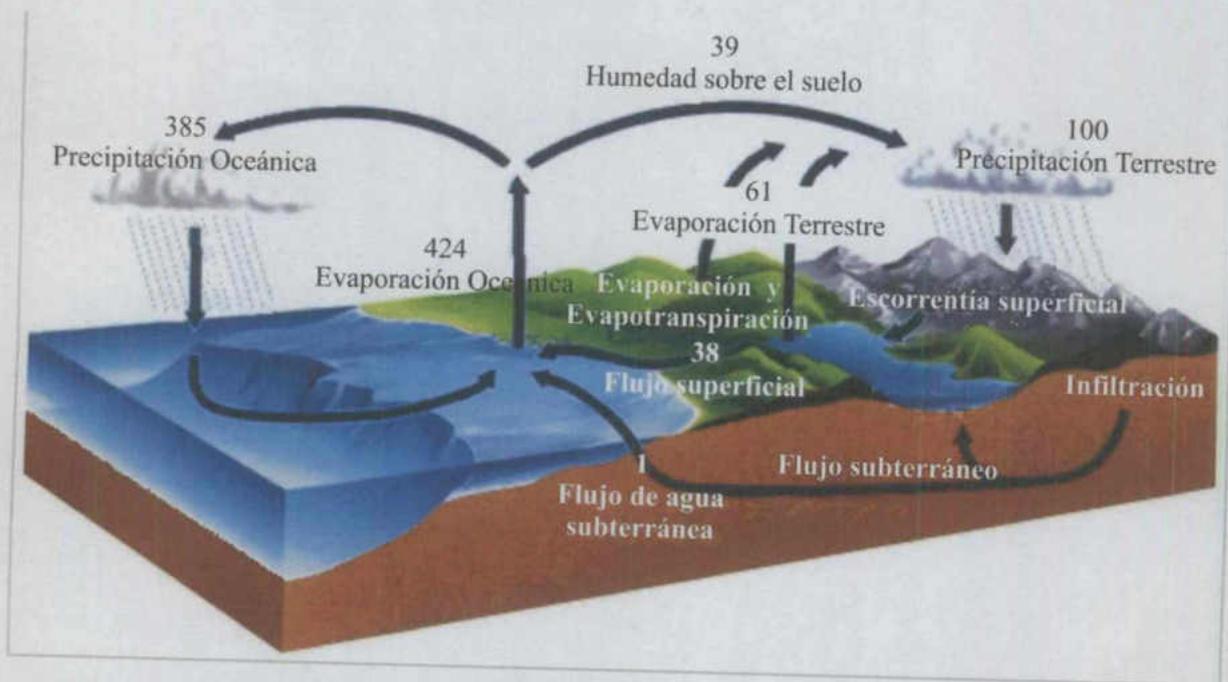


Figura 2.1. Ciclo Hidrológico con un balance promedio global en unidades relativas a un valor de 100 para la precipitación terrestre.

Cerca del 96.5% del agua del planeta se encuentra en los océanos. Del resto, el 1.7% se encuentra en los hielos polares, el 1.7% en manantiales subterráneos y solamente el 0.1% en los sistemas de agua superficial y atmosférica. El sistema de agua atmosférica, que es la fuerza motriz de la hidrología del agua superficial, tiene solamente 12,900 km³ de agua, es decir, menos de una parte en 100,000 de toda el agua de la tierra. A pesar de que el

contenido de agua en los sistemas superficiales y atmosféricos es relativamente pequeño, inmensas cantidades de agua pasan anualmente a través de ellos. La evaporación desde la superficie terrestre consume el 61% de esta precipitación, y el restante 39% conforma la escorrentía hacia los océanos, principalmente como agua superficial. La evaporación desde los océanos constituye cerca del 90% de la humedad atmosférica. El análisis del flujo y almacenamiento de agua en el balance global de agua proporciona una visión de la dinámica del ciclo hidrológico (Cuadro 2.1.) (Chow, 1988).

Cuadro 2.1. Balance Anual de Agua Global.

		Océano	Tierra
Área (km ²)		361,300,000	148,800,000
Precipitación	(km ³ /año)	458,000	119,000
	(mm/año)	1,270	800
Evaporación	(km ³ /año)	505,000	72,000
	(mm/año)	1,400	484
Escorrentía hacia los océanos			
Ríos	(km ³ /año)	----	44,700
Agua subterránea	(km ³ /año)	----	2,200
Escorrentía total	(km ³ /año)		47,000
	(mm/año)		316

2.5. Modelo del sistema hidrológico

El objetivo del análisis del sistema hidrológico es estudiar la operación del sistema y predecir su salida. Un modelo de sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas medibles y su estructura es un conjunto de ecuaciones que conectan las entradas y las salidas. Las entradas y las salidas pueden expresarse como funciones del tiempo, $I(t)$ y $Q(t)$ respectivamente, donde t pertenece al rango de tiempo en

consideración. El sistema realiza una transformación de la entrada en la salida representada por

$$Q(t) = \Omega I(t) \quad (1)$$

la cual se conoce como ecuación de transformación del sistema. El símbolo Ω es una función de transferencia entre la entrada y la salida. Si esta relación puede representarse mediante una ecuación algebraica, entonces Ω es un operador algebraico.

$$Q(t) = CI(t) \quad (2)$$

donde C es una constante, entonces la función de transferencia es el operador

$$\Omega = \frac{Q(t)}{I(t)} = C \quad (3)$$

Si la transformación es descrita por una ecuación diferencial, entonces la función de transferencia sirve como un operador diferencial (Chow, 1988).

2.6. Ecuación fundamental de la Hidrología

La Ecuación fundamental de la Hidrología se representa por

$$I - O = \Delta S / \Delta t \quad (4)$$

En palabras significa: "Lo que entra menos lo que sale es igual al cambio de almacenamiento". La ecuación se calcula para un determinado período de tiempo y para un volumen de control. Considerando una cuenca hidrográfica:

Las Entradas (I) son:

- Precipitación
- Importación de agua
- Escorrentía superficial desde otras cuencas
- Aguas subterráneas desde otras cuencas

Las Salidas (O) son:

- Evaporación
- Transpiración
- Escorrentía superficial hacia otras cuencas
- Exportación de agua
- Aguas subterráneas hacia otras cuencas
- Infiltración

El Cambio de Almacenamiento (S) está dado por:

- Almacenamiento de aguas subterráneas
- Almacenamiento por cambio de humedad del suelo
- Almacenamiento superficial en embalses, canales y en la propia escorrentía superficial.

2.7. *Precipitación*

Precipitación es, en general, el término que se refiere a todas las formas de humedad, emanadas de la atmósfera y depositadas en la superficie terrestre, tales como lluvia, granizo, rocío, neblina, nieve o helada.

La cantidad de lluvia se expresa como la altura caída y acumulada sobre una superficie plana e impermeable. Para dichas mediciones se utilizan los pluviómetros y los pluviógrafos. Las medidas características son normalmente la Altura pluviométrica, en mm, la Intensidad de precipitación, en mm/h, y la Duración de la tormenta expresada en horas o minutos. Recientemente, con la ayuda de pluviómetros digitales se ha puesto mucho interés en la evaluación de la distribución de intensidades dentro de un evento de lluvia.

Las lluvias presentan una gran variación en el espacio y en el tiempo. Estas pueden representarse por mapas de isoyetas; una isoyeta es un contorno de lluvia constante. Los mapas de isoyetas se construyen interpolando información de lluvia que se registra en sitios con pluviógrafos. Un registro de pluviógrafo está compuesto por un conjunto de profundidades de lluvia que se registra para incrementos de tiempos sucesivos. Un hietograma de lluvia es una gráfica de profundidad de lluvia o intensidad en función del tiempo. Sumando los incrementos

de lluvia a través del tiempo se produce un hietograma de lluvia acumulada, o curva de masa de lluvia.

2.8. *Escorrentía*

La escorrentía superficial consiste en la ocurrencia y el transporte de agua en la superficie terrestre. La mayoría de los estudios hidrológicos están ligados al aprovechamiento del agua superficial y a la protección contra los fenómenos provocados por su movimiento.

De la precipitación que alcanza el suelo, parte queda retenida ya sea en depresiones o como película en torno a partículas sólidas. Del excedente de agua retenida, parte se infiltra y parte escurre superficialmente. Se define como exceso de precipitación, la precipitación total caída al suelo menos la retenida e infiltrada. Puede ocurrir que el agua infiltrada posteriormente aflore en la superficie como fuente de una nueva escorrentía superficial.

La escorrentía superficial comprende el exceso de la precipitación que ocurre después de una lluvia intensa y se mueve libremente por la superficie del terreno, y la escorrentía de una corriente de agua, que puede ser alimentada tanto por el exceso de precipitación como por las aguas subterráneas.

El caudal, Q , definido como el volumen de escorrentía superficial por unidad de tiempo, $Q=V/t$, es la principal variable que caracteriza la escorrentía superficial. Se expresa normalmente en m^3/s . Existe el Caudal específico, q , definido como el caudal Q dividido por el área de drenaje. Se expresa en $m^3/s/km^2$.

Existe también la modalidad de evaluar la escorrentía superficial en forma de lámina, expresada en mm, lo que se logra dividiendo el volumen de escurrimiento entre el área de colección.

El Coeficiente de Escurrimiento, C , es la relación entre el volumen de agua de escorrentía superficial total y el volumen total de agua precipitado, en un intervalo de tiempo determinado. Este coeficiente se puede definir como relativo a una lluvia aislada o a un intervalo de tiempo en donde ocurren varias lluvias. Se

debe aclarar que conociendo el coeficiente de escorrentía para una determinada lluvia con cierta intensidad y cierta duración en un área dada, se puede determinar la escorrentía superficial de otras precipitaciones de intensidades diferentes, desde que la duración de la lluvia sea la misma.

2.9. *Infiltración*

Es el proceso por el cual el agua penetra desde la superficie del terreno en el suelo; se distingue del proceso de percolación porque éste último es el movimiento hacia abajo de agua desde o a través de la zona no saturada hasta el nivel freático o zona saturada. La lluvia que cae se consume totalmente en intercepción, detención superficial o almacenamiento en depresiones, humedad del suelo, precipitación directa sobre la corriente de agua que sirve de drenaje al área considerada, agua subterránea, flujo subsuperficial y escorrentía superficial.

Durante un evento de lluvia, para un terreno sin vegetación, si se descarta la evapotranspiración, la infiltración (I) puede determinarse como la diferencia entre la precipitación (P) y el escurrimiento superficial (E), de manera que

$$I = P - E \quad (5)$$

2.10. *Intercepción*

La intercepción comprende el volumen de lluvia que no alcanza a llegar al suelo dado que es interceptado por el follaje y las estructuras de la vegetación de donde se evapora posteriormente.

Cuando la vegetación limita el paso directo de la precipitación al suelo, inicia el proceso de intercepción, en cualquiera de sus formas y se le denomina precipitación incidente, la cual se divide en tres flujos principales: traslocación (flujo por goteo desde la cubierta vegetal), escurrimiento cortical (escurrimiento por ramas y troncos) e intercepción neta (evaporación retenida y almacenada de la cubierta). La estructura de cada vegetación determina la partición de los tres flujos en el balance de masa o hídrico, como la densidad de la biomasa, ángulo de las

hojas y de las ramificaciones y rugosidad de la corteza, incluso las características de los episodios de la precipitación y la velocidad del viento.

Debido al tamaño de las hojas de los árboles, usualmente se requiere hasta 4 mm de precipitación para que las superficies de las hojas de un árbol estén completamente mojadas. A partir de este momento de saturación, las gotas que caen sobre las hojas crecen tanto que el agua supera la tensión superficial de las hojas y cae al suelo.

Teniendo esto en cuenta, notamos que la pérdida de agua por intercepción varía de acuerdo al tipo de hoja que tiene cada árbol y de acuerdo a la época del año en la cual se caen las hojas de los árboles.

Un efecto importante de la vegetación, aunque todavía poco conocido en ambientes semiáridos, es la intercepción de las precipitaciones que en forma de lluvia, rocío, granizo, etc., quedan parcialmente retenidas por las hojas, ramas o tronco de la cubierta vegetal y de ahí se evaporan nuevamente a la atmósfera.

La parte aérea de la vegetación tiene la propiedad de actuar de barrera capaz de interceptar las precipitaciones, variando su influencia y distribución bajo el área de influencia de su cobertura (Mateos y Schnabel, 1997). Se pueden definir cuatro flujos de agua (precipitación incidente, precipitación interceptada, traslocación y escorrentía cortical) que responde a la siguiente relación:

$$I = P - (T+E) \quad (6)$$

Donde: I = Agua interceptada por el arbolado
P = Agua de precipitación incidente o bruta
T = Agua de traslocación
E = Agua de escorrentía cortical

Precipitación incidente (*P*) Representa la cantidad total de agua que cae sobre la cubierta de los árboles.

Agua interceptada (*I*): es la parte de la precipitación que queda retenida por el árbol y pasa de nuevo a la atmósfera por evaporación.

Agua de traslocación (*T*): Corresponde a la precipitación que llega directamente al suelo entre las hojas de los árboles o cae, después de ser interceptada por goteo.

Agua de escorrentía cortical: Es el agua que una vez captada por el árbol escurre a lo largo del tronco

El estudio de las pérdidas de agua por intercepción tiene gran importancia en el balance hídrico de una cuenca, en especial cuando las precipitaciones son escasas, poco intensas o irregulares y el porcentaje interceptado y evaporado es elevado.

2.11. *Humedad del Suelo*

La humedad del suelo es el volumen de agua que hay en un terreno, la cual se infiltra y antes de alcanzar el nivel freático es removida del suelo por las raíces de las plantas o por evaporación.

Los métodos que se utilizan para su estimación usan alguna propiedad física del suelo que cambia con la humedad, pudiendo ser:

- El peso de suelo
- La tensión del agua dentro del suelo
- La humedad del aire dentro del suelo
- La dispersión de la radiación que entra al suelo
- La atenuación de la radiación que entra al suelo
- La constante dieléctrica del suelo
- La resistencia eléctrica del suelo
- La textura del suelo
- La energía para cambiar la temperatura del suelo

Los tipos de métodos de medición de humedad de suelo son:

- Métodos directos: miden la cantidad de agua que hay en el suelo
- Métodos indirectos: calculan la humedad mediante una calibración entre humedad y una propiedad que es más fácil de medir (ej. tensión) (Fac. de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile, 2000).

2.12. *El Papel de la Vegetación en el Ciclo Hidrológico*

La destrucción de la vegetación incrementa las tasas de erosión por el incremento de la generación de escurrimientos superficiales y de igual forma rompe el equilibrio de los ecosistemas (Griffiths, 1969; Jane y Green, 1983; Wallis y James, 1972).

El efecto de la pérdida de la vegetación forestal y el manejo de los recursos hídricos especialmente en zonas de montaña es una preocupación científica de actualidad y de interés público. Las relaciones entre el manejo forestal y la erosión es bien conocido cualitativamente, incluso existe cierta sensibilidad del problema.

El desarrollo de los centros urbanos, la construcción de carreteras y los incendios forestales impactan en la en las tasas de erosión porque incrementan la cantidad de sedimentos disponibles para ser transportados y en volumen de escurrimientos superficiales. La vegetación removida favorece la erosión de las superficies descubiertas y el lavado de la materia orgánica de los suelos, ya sea permanentemente o temporalmente hasta que se restablezca la vegetación. En especial la carreteras modifican el régimen de hidrológico de la cuencas porque modifican los procesos de interceptación y redirección los escurrimientos superficiales (Collen *et al.*, 2006).

Entre las acciones de control de la erosión y restablecimiento de la vegetación destacan las estructuras de amortiguamiento de energía, que permiten controlar los mecanismos que controlan el transporte y de erosión, así como la restauración de la vegetación. La construcción del sistema reduce el transporte de

sedimentos y la eficiencia de las estructuras está sujeta a las condiciones climáticas locales y el medio geomorfológico, el régimen de lluvias y especialmente de escurrimientos superficiales, la tasa potencial de suministro de sedimentos y el diámetro medio de las partículas.

En la actualidad, modelos hidrodinámicos y hidromorfológicos son aplicados conjuntamente con modelos de sucesión de la vegetación y los cambios de hábitat de los peces. Un nuevo aspecto de acoplamiento con el cambio de rugosidad por la presencia de vegetación y sus efectos hidrodinámicos y hidromorfológicos son esquematizados en la Figura 2.2.

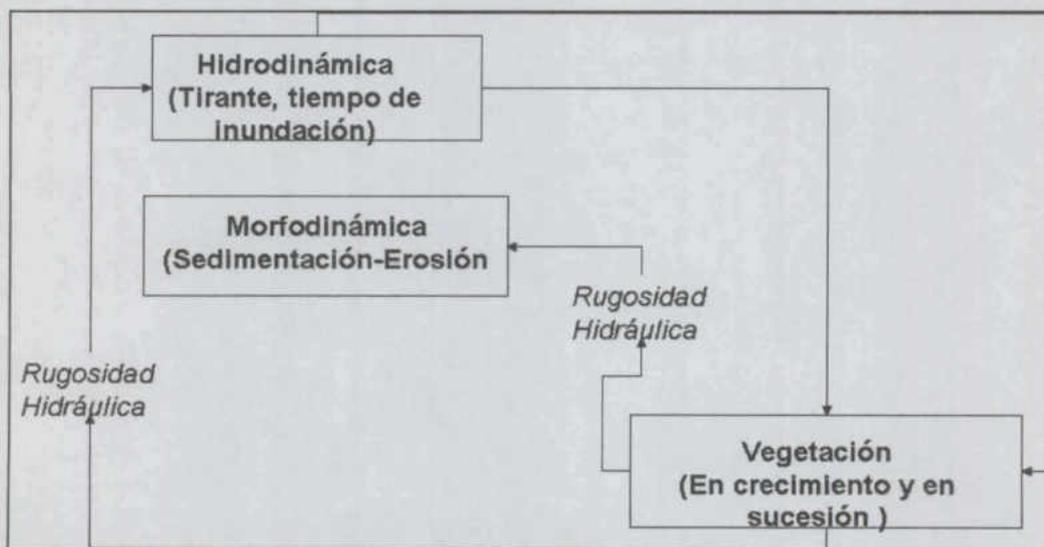


Figura 2.2 Esquema conceptual de la relación Hidrodinámica, Morfodinámica y el crecimiento y sucesión de la vegetación

Es ampliamente conocido que las cubiertas vegetales sean naturales o artificiales, sin importar sus propiedades físicas, hidrotérmicas y ópticas reducen el efecto erosivo de las lluvias y controlan los mecanismos de transferencia de masa entre la atmósfera y el suelo. Existe un buen número de trabajos acerca de las cubiertas vegetales relacionados con los procesos erosivos y el cultivo de hortalizas. Sin embargo, en las últimas décadas ha despertado otro interés científico, conocer su papel en el ciclo anual del agua y sus consecuencias en la disponibilidad del agua, esencialmente en regiones semidesérticas. Los trabajos

de investigación se han enfocado a los procesos de degradación y erosión del suelo, pero poco se conoce acerca de los mecanismos de transferencia de masa entre la atmósfera y la vegetación suelo y el papel que tienen en la conservación de los recursos hídricos, quizá porque no es tan evidente. En el contexto científico, es coincidente que la preservación y la restitución de las cubiertas vegetales es una forma adecuada de mitigar la erosión y degradación de suelos. Las cubiertas vegetales juegan un papel fundamental en la preservación y generación de suelo, reducen la evaporación de la superficie del suelo (González Sosa et al., 2001), favorece el desarrollo de microclimas y en consecuencia el desarrollo de seres vivos ligados a la vegetación, producción de materia orgánica, etc.

En los últimos años, se ha reconocido el papel de la cubierta vegetal en la preservación de los recursos hídricos y los mecanismos de transferencia entre el suelo y la vegetación (Tromble, 1988; Belmonte-Serrato y Romero-Días, 1993, 1994, 1997). Estudios en regiones semiáridas y áridas demuestran que las cubiertas vegetales también intervienen en la distribución espacial la lluvia que alcanza el suelo, genera hasta un 40% de pérdidas por evaporación de la lluvia interceptada, así mismo por transpiración, aun en años secos, ya que las plantas extrae agua de las capas profundas (Trimble y Wery, 1987).

Generalmente la reforestación es la técnica más utilizada para recuperar la cubierta vegetal y mitigar los procesos de erosión y degradación suelo, eliminado al mismo tiempo el matorral preexistente o nativo, sin tomar en cuenta que al mediano plazo resulta contraproducente con consecuencias imprevisibles a escala local y regional. Trimble y Weirich (1987) mencionan que se presenta una reducción del escurrimiento superficial por efecto de la reforestación. Meuser (1990) estima que unas décadas después de efectuada la reforestación, los escurrimientos superficiales se reducen en 50%, la transpiración aumenta en un 35%, en consecuencia la recarga disminuye hasta un 40%. Francis y Thornes (1990) mencionan que el costo por reforestación en el ciclo anual del agua podría ser elevado, siendo de primera importancia para países con recursos hídricos limitados.

2.13. Valoración de los Servicios Ambientales Hidrológicos

Durante las últimas décadas la preocupación por el medio ambiente ha despertado interés en los diferentes sectores debido a que el deterioro y degradación del ambiente demuestra serios impactos sobre la naturaleza, el bienestar de las personas y sobre el desarrollo sostenible en general. El concepto de sustentabilidad implica que el uso de los recursos naturales a corto plazo debe ser sustituido por uno de largo plazo, para hacerlos disponible a las necesidades de generaciones futuras. Una de las bases que sustentan el desarrollo son los recursos naturales (suelo, agua, bosque y biodiversidad), y de su buen manejo y uso apropiado dependen la calidad ambiental y el bienestar del hombre. Estos recursos proporcionan beneficios no ambientales (por ejemplo en el caso del recurso forestal estos son la madera, leña frutas) y beneficios ambientales (secuestro de carbono, protección de suelos, agua, biodiversidad, etc.).

El desconocimiento del valor económico de los recursos naturales ha contribuido a su deterioro, por lo cual una valoración adecuada de los beneficios ofrecidos por los recursos naturales como bienes no ambientales con precio y mercado, así como de los bienes ambientales sin precio, sin mercado y no transables, facilita el diseño e implementación de políticas acordes a las necesidades de la población urbana y rural, salvaguardando la naturaleza y los sistemas productivos que posibilitan el desarrollo.

El conocer este valor por parte de los poseedores de los recursos generadores del servicio ambiental permite establecer una base en el arreglo con los beneficiarios ya que se espera que ambos conciben que son en cierto grado recíprocamente dependientes.

Un bien tiene precio y valor. El precio es el punto en el que coinciden los costos del productor con la valoración subjetiva del consumidor en una economía de mercado, el cual generalmente es una ponderación promedio de los costos en que se incurre, los costos también son variables, cada productor puede enfrentar

costos distintos; el valor es la apreciación subjetiva del bien que hace cada persona o sector, por lo cual es variable.

El concepto de bien económico que se le confiere a un recurso (agua, bosque, etc.) constituye el motivo básico del interés de establecer su valoración económica. Este interés aumenta conforme aumenta la escasez relativa del recurso, en este sentido la estimación de su valor económico puede ayudar a diseñar estrategias que permitan un mejor uso. El precio no incorpora todo el valor de las funciones ecológicas de los recursos, siendo estos subvalorados, lo cual debe ser corregido a través de la generación de información al respecto y del perfeccionamiento de técnicas para valoración o creación de mercados de bienes ambientales que no tienen mercado explícito. El análisis de costo-beneficio es una manera simple de diagnosticar si un proyecto o actividad de desarrollo es viable o no; se basa en la apreciación de que vale la pena llevar a cabo un proyecto si los beneficios que se obtendrán del mismo son mayores que los costos en que se incurre. En lo que respecta al ambiente, existen métodos que intentan cuantificar los costos y beneficios ambientales (al menos estimaciones).

En el análisis económico para la medición de costos y beneficios ambientales, se deben considerar cuatro aspectos básicos: determinación de impactos, valorización de los impactos, tasa de descuento, riesgo e incertidumbre (Banco Mundial, 1980).

La determinación de los impactos y relaciones físicas consiste en definir los impactos del proyecto o las políticas sobre el medio ambiente y los recursos naturales; esta tarea es compleja porque algunas relaciones físicas pueden ser desconocidas o casuales u ocurrir en el largo plazo.

La valorización de los efectos en términos monetarios consiste en hacer una estimación del valor del ambiente y los recursos naturales. Debido a que estos bienes no tienen precio de mercado, su valoración se hace a través de diferentes metodologías de estimación. Esta etapa requiere de rigurosa identificación de

beneficios y costos, para de esta forma incorporar los costos y beneficios de las externalidades.

Riesgo e incertidumbre. Los riesgos se relacionan con las probabilidades asignadas al acontecimiento de un evento; la incertidumbre describe una situación en la que se conoce poco o nada. Cuando los proyectos crecen e introducen sustancias al nuevo ambiente, el riesgo se vuelve menos importante y la incertidumbre más importante. El riesgo puede contarse como un costo, la incertidumbre con una política de cuidado general.

Valores económicos

“El valor económico lo forman dos tipos de valores: los de uso pasivo y los valores de uso activo. Los primeros son aquellos que los individuos otorgan a un bien, aunque no hagan un uso activo del mismo; este tipo de valores se suele subdividir en valores de herencia y valores de existencia. Los valores de herencia se refieren al valor de legar los beneficios a las generaciones futuras y los de existencia a asignar un valor a un recurso simplemente porque existe. Por ejemplo, un individuo puede estar dispuesto a hacer una donación para proteger alguna especie en peligro de extinción que habita en un lugar lejano, aunque no tenga intenciones de conocer o visitar dicho sitio.

Por su parte, los valores de uso activo se dividen en dos: los valores de uso futuro y los de uso presente. Los de uso futuro son aquellos que se otorgan por la posibilidad de que en algún momento se le encuentre utilidad para algún elemento que hoy carece de valor en el mercado. Por su parte, los valores de uso presente son aquellos que, ya sea en el mercado o al margen de éste, tienen un uso activo en la actualidad.

A su vez los valores de uso activo presente se encuentran divididos en valores de uso directo y valores de uso indirecto. Los primeros son el tipo de valor que tiene un fundamento teórico más sólido y sobre el que existe menos discusión, ya que son valores de bienes y servicios que se reconocen de manera inmediata a través de su consumo o del disfrute directo del servicio. Algunos

autores (Munasinghe y Lutz 1993) clasifican a los valores de uso directo en valores de uso extractivo y valores de uso no extractivo. Entre los primeros se encuentran [En el caso de los ecosistemas de Mangle] la leña, la madera y los taninos. El principal uso de la leña es el doméstico, y aún en hogares con gas se llega a utilizar la madera de mangle; además del uso de la leña en el hogar tiene aplicaciones comerciales como la venta de pescado tatemado en madera de mangle, que es un manjar que gusta a los turistas y una fuente de ingreso local. Otros de los usos directos de la madera es su aprovechamiento en forma de varas para las cercas del ganado, el secado del tabaco, tutorados para la siembra de hortalizas, construcción de casas y enramadas, guacales para transportar frutas y construcción de trampas para la pesca ribereña de camarón. Finalmente, los taninos generados por el mangle (principalmente por el mangle rojo) son utilizados por la industria de la curtiduría para dar tratamiento a las pieles. En lo que se refiere a los valores de uso directo no extractivo, destaca el disfrute de los servicios recreativos y paisajísticos así como la observación de aves.

Los valores de uso indirecto se refieren a los beneficios que recibe la sociedad a través de los servicios de los ecosistemas y de las funciones del hábitat. A diferencia del valor de uso directo, el indirecto generalmente no requiere del acceso físico del usuario al recurso natural, pero sí de la presencia del recurso en buenas condiciones. Los valores de uso activo indirecto se pueden clasificar en valores ambientales y valores ecosistémicos (CONABIO 1998).

Entre los servicios ambientales destacan el filtrado de aguas residuales, la protección contra tormentas y el funcionamiento del ecosistema como criadero de especies pesqueras. Por otra parte, entre los valores ecosistémicos se encuentran la captura de carbono, la fijación de nitrógeno en el suelo y la auto preservación del ecosistema."(Sanjurjo y Welsh, 2005)

Técnicas de Valoración

Debido a la falta de mercado para servicios ambientales, se hace necesario el uso de técnicas de valoración y así conocer el valor monetario de

estos (cuadro 2.2). La valoración es subjetiva y sensible a la disponibilidad de datos y tiempo. A pesar de estas deficiencias, en la actualidad estas técnicas son las existentes y las utilizadas.

Cuadro 2.2. Técnicas de valoración ambiental

	Directas	Indirectas
Mercado	Directas de mercado	Indirectas de mercado
No mercado	Directas de no mercado	Indirectas de no mercado

Adaptado de Mitchell y Carson 1989.

Los métodos directos de mercado se refieren a las formas de medición basadas en precios que se pueden obtener directamente en los mercados, como el precio de reemplazar el servicio ambiental con algún sustituto, los costos de reponerse de alguna enfermedad causada por la baja calidad ambiental o la pérdida en producción de algún producto con precio en el mercado. Por su parte, los métodos indirectos de mercado son aquellos que, basados en mercados existentes obtienen el valor de bienes o servicios sin precio en el mercado; por ejemplo, obtener el valor de un paisaje a través del mercado inmobiliario, o el valor del disfrute recreativo de paraje natural lejano a través del mercado de transporte. Las técnicas de no mercado son aquéllas en las que no se utilizan mercados reales sino que a través de encuestas, se descubre el comportamiento de las personas ante mercados hipotéticos. Por una parte están las técnicas directas de no mercado, en las que se pregunta a los encuestados por su disposición a pagar por cierto bien o servicio que no tiene precio en el mercado. Por otra parte, están las técnicas indirectas de no mercado, en las que se usa el mercado hipotético para descubrir el valor de un atributo del bien o servicio a valorar. (Sanjurjo e Islas, 2007)

Todo país cuenta con recursos naturales. Estos en muchos de ellos son fuentes de ingresos, por lo cual un mejor uso y valorización óptima se hace necesario. En este sentido los lineamientos básicos para una estrategia de desarrollo ambiental incluyen las etapas de cuantificación, valoración, categorización y comercialización.

- Cuantificación. Es conocer la cantidad y tipo de recursos forestales con que se cuenta.
- Valoración. Consiste en estimar el valor económico que aporta el recurso natural.
- Categorización. Consiste en priorizar aquellas áreas que por su ubicación, características, valor, etc., son de mayor importancia para el país.
- Comercialización. Consiste en hacer todas las gestiones necesarias que permitan el pago por los beneficios ambientales ya sea a nivel nacional (pago por servicios ambientales, incentivos, etc.) o internacional (implementación conjunta, desarrollo limpio). Flores-Benítez (2007).

Conocer la magnitud de los procesos hidrológicos es de suma importancia para poder tener una monetización más precisa de los servicios. Es por eso que ese estudio tiene como propósito la generación de información cuantitativa que permita el posterior diseño de esquemas para el pago de los servicios ambientales hidrológicos que ofrece la vegetación de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro.

HIPOTESIS Y OBJETIVOS

Hipótesis:

La hipótesis planteada en el presente estudios es:

La respuesta hidrológica de los tipos de vegetaciones contrastantes, ubicados en diferentes gradientes altitudinales, depende de su cobertura y estructura, así como de las entradas de precipitación y su distribución en el tiempo, lo cual puede ser usado para valorar cuantitativamente la oferta de servicios ambientales hidrológicos.

Objetivo General:

El objetivo general del presente estudio es contribuir a la generación de información para evaluar el potencial de oferta de Servicios Ambientales Hidrológicos para diferentes tipos de vegetaciones en la Sierra Gorda de Querétaro.

Los Objetivos Específicos son:

- Caracterizar el área de estudio dentro de la Sierra Gorda de Querétaro en términos de la valoración de variables climáticas como la precipitación, temperatura y humedad relativa.
- Evaluar las características de la vegetación, específicamente su estructura y composición en sitios seleccionados y representativos.
- Determinar el efecto de la vegetación en el comportamiento de variables y procesos hidrometeorológicos relacionadas con los servicios ambientales en sitios seleccionados.
- Valorar el proceso de la erosión hídrica en sitios de vegetaciones contrastantes.

III. METODOLOGIA

El Presente estudio se realizó en tres sitios ubicados en el territorio de la Sierra Gorda del Estado de Querétaro los cuales de manera general se describen a continuación.

Sitio El Pilón, Municipio de Jalpan de Serra, Qro. Se le nombra así al predio que actualmente alberga a la Estación Biológica de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, se le conoce de este modo por contener un cerro de peculiar forma. Está ubicado al noreste del municipio, muy cercano a la localidad de Valle Verde, en las coordenadas cartográficas (UTM) 482,594 y 2,377,486. El tipo de vegetación predominante es el bosque templado de encino-pino, tiene una altitud sobre el nivel medio del mar de 1,100 m, su característica principal es que se ubica en la vertiente de mayor precipitación de la Sierra. Para llegar al lugar se accede por diversos tramos carreteros, primeramente, partiendo de la cabecera municipal de Jalpan de Serra a través de la Carretera Federal 120 a la altura de la localidad de La Vuelta, municipio de Landa de Matamoros se toma el camino estatal que dirige a Tancoyol; Aproximadamente 8 kilómetros después del entronque, se toma la desviación a la comunidad de Zoyapilca, Municipio de Jalpan. A partir de este punto se recorren 30 km de terracería pasando por diversas comunidades como La Soledad de Guadalupe, La Cuchilla, El Cañón, La Bajadita; 3.5 kilómetros después del entronque a la comunidad de San Juan de los Durán se encuentra la entrada al predio.

Sitio Tancoyolillo, Municipio de Jalpan de Serra, Qro. Se le nombró así a este sitio por haberse instalado los instrumentos en la localidad del mismo nombre. Se encuentra ubicado en las coordenadas cartográficas (UTM) 456,640 y 2,345,015. El tipo de vegetación predominante es la selva baja caducifolia, lo cual determino que se estableciera este sitio por tratarse de una de las vegetaciones representativas de la Sierra. Su altitud sobre el nivel medio del mar es de 1120 m. Se accede al lugar partiendo de la Cabecera municipal de Jalpan de Serra, a través de la Carretera Federal 120, después de 3.7 km parte una terracería rumbo

a la localidad de Malila; 2.5 km más adelante se encuentra la desviación a la localidad de Tancoyolillo.

Sitio El Aserradero, Municipio de Pinal de Amoles, Qro. Se le denominó así a este sitio por haberse colocado los instrumentos dentro del predio donde está instalado el Aserradero de la Unión de Ejidos Forestales "Benito Juárez". Está ubicado en las coordenadas cartográficas (UTM) 430,240 y 2,335,918, su altitud sobre el nivel medio del mar es de 2600 m, se accede al lugar por la Carretera Federal 120 a la altura de la comunidad de Puerto de los Velázquez se encuentra la desviación que lleva de inmediato al lugar. Su vegetación predominante es la de bosque templado de pino-encino, su selección se hizo debido a su tipo de vegetación y por encontrarse en la zona de mayor altitud de la Sierra (Figura 3.1.).

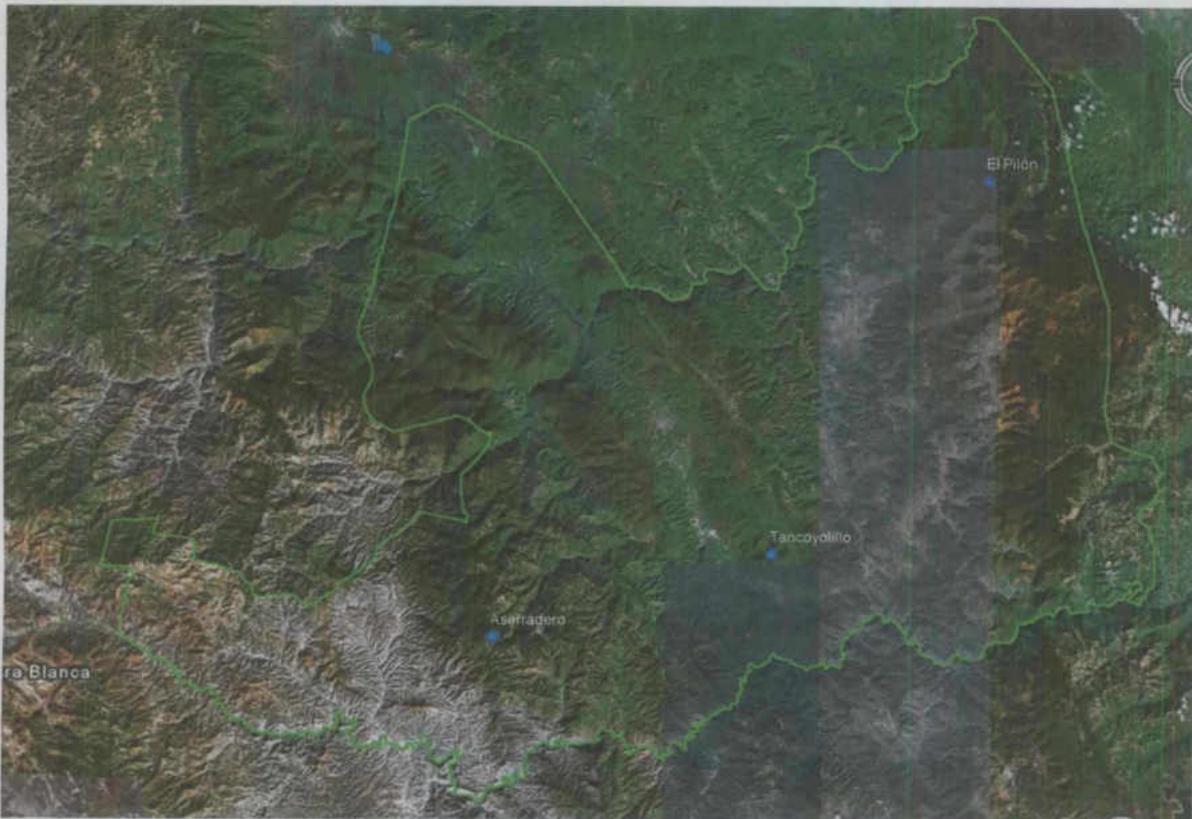


Figura 3.1 Localización de los sitios de trabajo dentro de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda, Qro.

La metodología usada para el desarrollo de la investigación incluye:

3.1 Caracterización Climática de los Sitios de Estudio.

Como parte de la caracterización de los sitios de estudio se midieron las siguientes variables:

a) Temperatura y Humedad Relativa: Se instalaron sensores digitales de humedad y temperatura del aire marca Watchdog modelo 150, con datalogger integrado. Se colocaron dentro de protectores de radiación solar para que ésta no interfiriera con los datos registrados. Su circuito electrónico tiene un laminado especial para cuando se usa en ambientes húmedos. Los dispositivos fueron colocados a una altura de 1.5 m. Su instalación fue dentro y fuera de vegetación (Figuras 3.2. y 3.3.) para conocer la diferencia entre los dos ambientes. Los intervalos de medición y los horarios fueron simultáneos y permitieron comparar la evolución y desarrollo de las variables de temperatura y humedad relativa en ambientes geográficamente similares con condiciones de cobertura vegetal natural y condición alterada. El intervalo de medición de temperatura y humedad relativa fue cada 10 minutos para obtener detalladamente durante el transcurso del día y de las estaciones del año las variaciones de temperatura y humedad relativa.



Figura 3.2. Sensor de humedad y temperatura del aire ubicado en el bosque templado de encinos en El Pilón, Jalpan de Serra.



Figura 3.3. Sensor de humedad y temperatura del aire ubicado fuera del bosque en El Pílon, Jalpan de Serra.

b) Precipitación: La precipitación fue medida con pluviómetros digitales de tipo cubo-balancín auto-evacuante de la marca Watchdog, los cuales cumplen con los requisitos de la Organización Meteorológica Mundial, con un recolector de 20 centímetros de diámetro. Un datalogger Watchdog registró la lluvia acumulada durante cada intervalo de tiempo. El intervalo de tiempo de registro de los eventos de lluvia fue cada 5 minutos con lo cual se captó con máximo detalle la evolución y comportamiento de cada tormenta. El software SpecWare se usó para iniciar el registrador y para leer y analizar los datos de lluvia registrados. El registrador estuvo almacenado dentro del recolector de lluvia y permaneció aislado de la humedad. El pluviómetro fue colocado en un poste de madera insertado en el suelo en forma vertical, se usó un nivel de burbuja para asegurarse de la verticalidad del poste, con la parte superior a una distancia final del suelo no menor de 1.50 m. No hubo interferencia de la lluvia por parte de árboles, casas, o edificios. se colocaron cerca de las parcelas de referencia o estándar, y no en la parcela con vegetación bajo árboles existentes que interceptaran la lluvia (Figura 3.4.).



Figura 3.4. Pluviómetro, sin tapa, mostrando el mecanismo de balancín en el Aserradero, Pinal de Amoles.

3.2 Caracterización de la vegetación: estructura y composición en sitios seleccionados y representativos.

Para el estudio de la abundancia de una determinada especie, fue necesario fijar si lo que se estudió tiene una estructura de población cerrada o abierta, ya que ello condicionó la técnica a emplear. Una de las técnicas estadísticas para estudiar la abundancia de una determinada especie animal o vegetal en poblaciones cerradas es el muestreo por transectos lineales, se aplicó esta técnica de muestreo botánico por la cual se eligió una línea de máximo 1 m de ancho a lo largo de la cual se analizaron las especies vegetales con las que toparon o cruzaron esa línea y se obtuvo un inventario de la estructura y composición de los estratos.

La instrumentación de técnicas de cálculo para la obtención de los parámetros de cada vegetación se hizo siguiendo los conceptos de Weaver y Clements (1951), con modificaciones para su aplicación por Cox (1985), Krebs (1999) y Davies *et al.* (2001). Los indicadores para vegetación y diversidad

florística agrupan datos de la estructura de la vegetación que resultaron adecuados para describir y monitorear la intercepción de agua y protección del suelo y el valor ecológico de la vegetación.

a) Estructura vertical de la vegetación

Fue la distribución y el arreglo vertical de las plantas leñosas en algún sitio, resultando en una serie de estratos formados por el dosel (copas) de los árboles o arbustos (Figura 3.5). Para la estimación de la estructura vertical se trazaron transectos tipo Gentry de 2 x 50 m, según el tipo de vegetación por sitio, y se registró la posición y altura de cada especie leñosa (perenne) en el transecto. Se consideró que este parámetro está íntimamente relacionado con la intercepción de agua de lluvia por acción de cada estrato y su captura en suelo. Por lo que a mayor número de estratos la captación de agua fue mayor y la velocidad con que llegan las gotas de lluvia al suelo, menor. Este parámetro junto con la cobertura vegetal constituyeron los rasgos más importantes de la vegetación con relación directa a la captura de agua de lluvia y a la protección de los suelos.

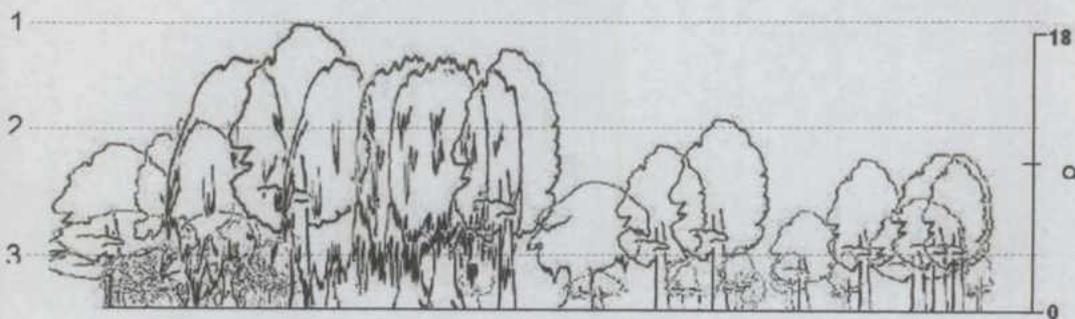


Figura 3.5. Estructura Vertical de la Vegetación donde se observan tres estratos.

b) Estructura horizontal de la vegetación (Cobertura Vegetal)

Fue la distribución y el arreglo las plantas leñosas en algún sitio, pero en este caso en forma horizontal, resultando en lo que se conoce como cobertura vegetal, formada por el dosel (copas) de los árboles en cada estrato. Por esta razón la suma de porcentajes de cobertura de los estratos fue casi siempre mayor al 100% del área en donde se ubicaron estas plantas (Figura 3.6.). Para su estimación se utilizaron los mismos transectos tipo Gentry de 2 x 50 m por tipo de

vegetación por cuenca, registrando la posición de cada especie leñosa (perenne) en el transecto y sus diámetros copa. Como se mencionó, la cobertura vegetal o estructura horizontal de la vegetación representó uno de los parámetros más importantes para la captura de agua y la conservación de suelo. Cada estrato formado por las copas de árboles o arbustos formó una capa parecida a una esponja que recibió el agua de la lluvia. Esto, además de interceptar la precipitación, redujo los espacios desnudos en el suelo en unidades de área, reduciendo al mínimo la exposición y susceptibilidad de erosión del suelo.

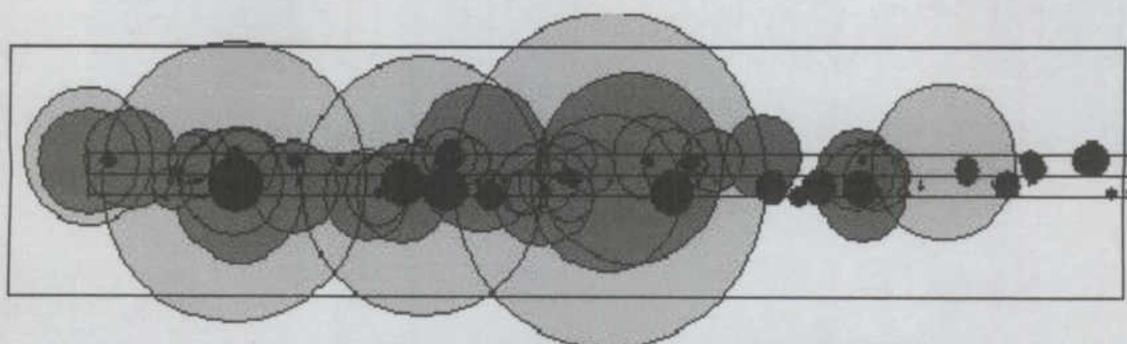


Figura 3.6. Estructura Horizontal de la Vegetación.

La Figura 3.6 es la representación gráfica de la cobertura de las copas de los árboles (dosel) por estratos. Al superponerse varias capas, el porcentaje total de cobertura vegetal es generalmente mayor al 100% del área que cubren.

3.3 Evaluación de procesos hidrológicos

3.3.1 Intercepción

La valoración de la intercepción se hizo mediante la instalación de tres canaletas de PVC distribuida en todo el cuadrante y apoyadas sobre bases paralelas fabricadas de varilla y enterradas en el suelo, las bases mantuvieron una pendiente suave que dirigieron la captación de la lluvia interceptada por la vegetación y escurrida desde las canaletas hacia depósitos de plástico de 20 lts de capacidad someramente enterradas en el suelo (Figura 3.7.). Así, la capacidad de intercepción del dosel se determinó relacionando la precipitación incidente (P) contra la precipitación directa (P_d). El escurrimiento fustal (E_f) no fue determinado.



Figura 3.7 Sistema de canaletas para medición de la interceptación de lluvia por la vegetación.

3.3.2 *Escurrimiento y erosión hídrica*

En cada sitio seleccionado de vegetación contrastante (bosque de pino - matorral xerófito) se estableció un modulo hidrológico que contiene las parcelas de erosión tipo USLE. Las dimensiones de las parcelas establecidas fueron por lo menos de 7.5 m² de superficie por 1.5 m de ancho en el sitio de colocación del vertedor y se ubicaran en terrenos con pendientes similares de aproximadamente 9%.

Se establecieron dos parcelas contiguas por sitio, la primera correspondió a la Parcela Estándar. En dicha parcela, la vegetación y la pedregosidad superficial, cuando las hubo, fueron removidas y se realizó una remoción y rompimiento del suelo hasta una profundidad de 30 cm en la que se obtuvieron condiciones del suelo similares al uso de barbecho continuo durante dos años y labranza a favor de la pendiente. Con suelo desnudo, libre de malezas y de encostramiento superficial, con el fin de lograr una capa homogénea similar a la de la definición de parcela estándar de acuerdo con Wischmeier y Smith (1978). Esta condición se supuso que fue extrema en cuanto a que representó las condiciones

más favorables para la erosión. La segunda parcela o Parcela Tratamiento se manejó de manera tal que la condición de la superficie actual o real de la zona se mantuvo, sin eliminar la vegetación.

Para la delimitación de la parcela se usó tabicón del tipo utilizado para construcción (7.5 cm x 13 cm x 26 cm), semienterrado en el suelo con el fin de aislar el área de cualquier tipo de escurrimiento proveniente de las zonas contiguas. Al final, en la parte baja de la parcela se colocó un vertedor de lámina conectado a un sistema de desagüe para la colección de muestras (Figuras 3.8. y 3.9.). La guía para la preparación y mantenimiento de parcelas naturales de escurrimiento fue dada en 1961 por D.D. Smith (Römken, 1985).



Figura 3.8. Parcela de referencia o estándar instalada en El Aserradero, Pinal de Amoles.



Figura 3.9. Parcela de Esgurrimiento instalada dentro del bosque de Pino en El Aserradero, Pinal de Amoles.

La colocación de recipientes en la parte baja del vertedor fue para captar la erosión y el escurrimiento. Estos recipientes se interconectaron y se colocaron, uno en la parte superior de la pendiente con capacidad de 20 litros (Cubeta 1), que captó material grueso y escurrimientos pequeños. Este recipiente se colocó dentro de un tanque con capacidad de 200 litros, para captar el excedente de escurrimiento y el material erosionado más fino. En tormentas fuertes, el tanque funcionó como una caja de distribución a partir del cual se hicieron cuatro orificios de salida, uno de los cuales se conectó a un recipiente adicional de 20 litros (Cubeta 2), que captó todo el material en suspensión.

El volumen total colectado se calculó multiplicando el volumen del recipiente final (Cubeta 2) por el número de subdivisiones más el volumen del tanque. En el caso del arreglo mencionado arriba el volumen colectado fue de 280 litros.

Frecuencia y Toma de los registros: Fue necesario hacer registros diarios para su agrupación en totales mensuales. Debido a que existen diversas maneras

de manejar el suelo y el agua en los tanques, donde el problema principal era saber cómo tomar una muestra representativa de una mezcla de agua y partículas de suelo de diferentes tamaños. El método alternativo para la colección de muestras fue:

a). Método Combinado: En el caso específico de este estudio se siguió el siguiente procedimiento: Después de cada tormenta, a las 8 de la mañana, se visitaron con la valiosa ayuda de un habitante local capacitado para este fin, los sitios de los lotes y habiendo determinado si existió escurrimiento con erosión. Se procedió a extraer la cubeta # 1 y determinar el volumen de escurrimiento + sedimentos. Enseguida se procedió a evaluar el volumen correspondiente en el tanque con la ayuda de una regla, midiendo la altura. Con el área del tanque se determinó el volumen escurrido de agua + sedimentos. Se agitó completamente el escurrimiento en el tanque y se tomó una muestra representativa de aproximadamente 1 litro (el volumen exacto se determinó por volumetría o gravimetría). En el caso de la cubeta # 2 se procedió a medir el volumen de escurrimiento ya sea por gravimetría o volumetría (Figura 3.10.).



Figura 3.10. Medición del volumen con ayuda de una regla de madera en la Parcela de Esgurrimiento instalada dentro del bosque de Pino en El Aserradero, Pinal de Amoles.

Después de obtener los datos de peso seco y realizar la ponderación respectiva, el cálculo de la pérdida de suelo se reportó en kilogramos de suelo o sedimentos por metro cuadrado (kg/m^2) en forma diaria para todos los lotes de escurrimiento.

El escurrimiento superficial e infiltración del agua en el suelo fue determinado con la toma de muestras de sedimentos necesariamente, pues involucró una valoración del volumen escurrido del lote de escurrimiento. Ya en el apartado del establecimiento de las parcelas de escurrimiento se mencionó la forma de evaluar el volumen de escurrimiento en litros. La división de este volumen entre 1000 nos dio el escurrimiento en m^3 . Este valor se dividió entre el área de la parcela de escurrimiento (7.5 m^2) y se multiplicó por 1000 con lo que se obtuvo el valor del escurrimiento diario en mm. Este valor diario se acumuló mensualmente y se reporta en el apartado de discusión y resultados.

Una vez valorado el escurrimiento por cada tormenta o evento de lluvia y con la medición de la precipitación en cada sitio se pudo determinar la Infiltración del agua considerando la siguiente relación:

Infiltración del Agua en el Suelo (mm) = Precipitación (mm) –
Escurrecimiento (mm).

Es por eso que fue importante la medición de la precipitación y del escurrimiento a las 8 de la mañana del siguiente día del evento, sobre todo si consideramos que este balance no considera la evapotranspiración, por lo que no deben dejarse períodos largos de tiempo después de que ocurren los eventos de lluvia.

Con los datos del volumen de escurrimiento en m^3 y la pérdida de suelo total del lote de escurrimiento en kilogramos para cada evento, se pudo determinar otro parámetro derivado de gran significancia para la valoración de los servicios ambientales: la concentración de sedimentos. La operación matemática que

definió a esta variable fue la división de la pérdida de suelo entre el volumen total de escurrimiento y se reportó en Kg. de suelo por litro de escurrimiento.

3.3.3 Humedad del Suelo

El método usado para este estudio fue el de los sensores de humedad de suelo marca Watermark en combinación con un medidor. Se colocó un sensor por parcela de escurrimiento, de 25-50 cm de profundidad. Se realizaron mediciones constantes en cada visita a los sitios al momento de descargar la información de los instrumentos de medición de lluvia y temperatura, durante todas durante las épocas del año (Figura 3.11.).

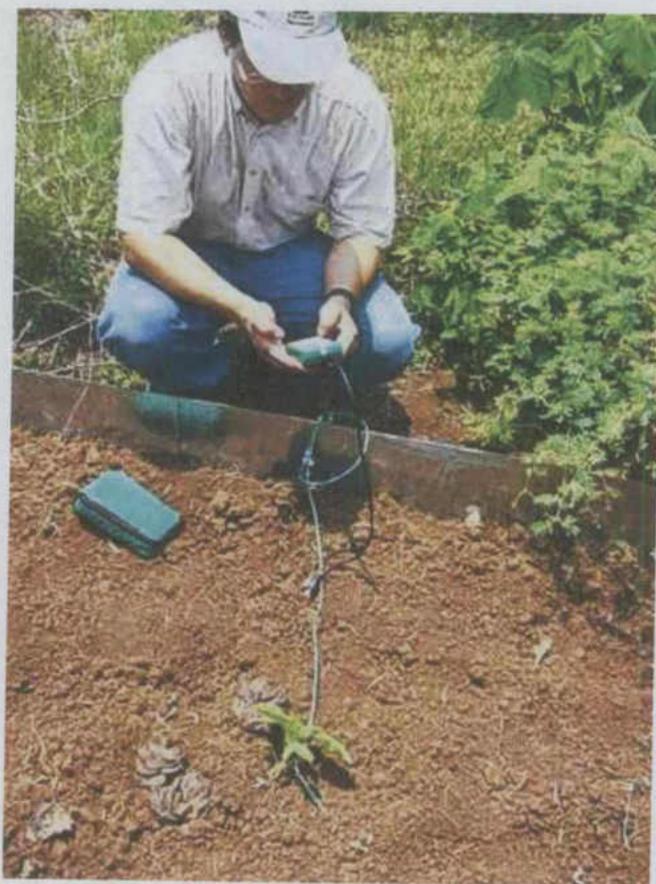


Figura 3.11. Registro de la humedad del suelo mediante los sensores Watermark en combinación con el medidor, en El Pílon, Jalpan de Serra.

3.4 Aplicación del modelo *RUSLE* para erosión de suelos a nivel microcuena

El modelo de la Ecuación Universal Revisada de Pérdida de Suelos (*RUSLE*, Revised Universal Soil Loss Equation) fue aplicado a una microcuena seleccionada con el objetivo de usar los valores obtenidos en las mediciones anteriores y hacer una aplicación con base en un Sistema de Información Geográfica (*SIG*) a nivel microcuena y establecer políticas de planeación y manejo de recursos naturales.

RUSLE cuantifica la erosión debida a las gotas de lluvia sobre la superficie, en flujo laminar y concentrado en pequeños canales (Wischmeier and Smith, 1978) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$E_h = R \cdot K \cdot LS \cdot C \cdot P \quad (3.1)$$

donde E_h es la pérdida de suelo promedio anual, (ton/ha/año); R es el factor anualizado de lluvia expresado en unidades de índice erosivo para una localidad específica, (MJ·mm/(ha·h)/año); K es el factor de erodabilidad del suelo, expresado como la pérdida de suelo por unidad de índice erosivo, (ton·h/(MJ·mm)); LS es el factor de longitud y grado de la pendiente (adimensional); C es el factor de cobertura y manejo de cultivos, que se expresa como la relación entre la pérdida de suelo de una condición específica y un lote de referencia (adimensional); y P es el factor de práctica de conservación, expresado como una relación entre la erosión de una parcela específica y la erosión en un terreno sin práctica (adimensional).

La determinación de los factores de la ecuación se hizo siguiendo los procedimientos establecidos por Figueroa et. al. (1984) para su aplicación en México, y en específico, puede observarse para este estudio en el trabajo de Rodríguez-Vazquez et. al. (2008), anexo en esta tesis. La microcuena seleccionada fue Río Escanela.

3.5 Aplicación de la Herramienta AGWA para la evaluación del estado de degradación en una microcuenca

Para la determinación de indicadores de la degradación de la microcuenca y de los procesos hidrológicos que en ella ocurren se utilizó la herramienta AGWA (Automated Geospatial Watershed Assessment) cuyo Manual de Usuarios y Documentación se reporta por Scott et al. (2006). AGWA es una extensión para las versiones de ArcView 3.x de ESRI (Environmental Systems Research Institute), que permite simular escurrimiento y erosión durante eventos de lluvia específicos, en una cuenca determinada. Cuenta con dos modelos para su aplicación dependiendo principalmente de la superficie de la microcuenca a la que se pretenda aplicar. El primer modelo es el KINEROS (Kinematic Runoff and Erosion Model) de Woolhiser et al. (1990), de tipo determinístico, designado para simulaciones durante eventos de lluvia simples y que se utiliza en microcuencas menores a aproximadamente 100 km² (10,000 hectáreas) y de condiciones predominantemente semiáridas. El segundo modelo es SWAT (Soil and Water Assessment Tool) de Arnold et al. (1994), también de tipo determinístico, de simulación a largo plazo y se utiliza en microcuencas mayores a 1000 km² (100 000 hectáreas).

En este caso de estudio, el modelo seleccionado por el tamaño y la condición climática de la microcuenca fue el KINEROS (<http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>).

El modelo fue aplicado a la microcuenca mencionada en el apartado del modelo RUSLE y los procedimientos pueden ser consultados en Rodríguez-Vázquez et al. (2008), anexo en esta tesis.

El programa genera los siguientes resultados: Flujo pico (mm/h), Escurrimiento (mm), Infiltración (mm), Producción de sedimentos (kg/ha) y Descarga pico de sedimentos (kg/s).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis de la Temperatura

En este apartado se analizan y discuten los resultados de la medición de la temperatura del aire tanto dentro como fuera del bosque para los sitios de estudio de El Pílon y Tancoyolillo para el año 2006.

4.1.1. La temperatura en el sitio de "El Pílon"

Para el sitio de El Pílon, la temperatura promedio anual durante el 2006 evaluada fuera del bosque fue de 17.7 °C, con una mínima registrada durante el año de -2.7 °C ocurrida el día Juliano 44 que correspondió al 13 de Febrero a las 5:00 am. Para el caso de la temperatura máxima, ésta se registró el día Juliano 129 (9 de Mayo) con un valor de 39.3 °C a las 14:30 hrs. Respecto a los valores medios mensuales, el mes más caluroso para este sitio fue Mayo con una temperatura media de 21.1 °C, mientras que el mes más frío fue Diciembre con una temperatura media de 11.8 °C. La distribución de la temperatura media mensual se observa en la Figura 4.1.

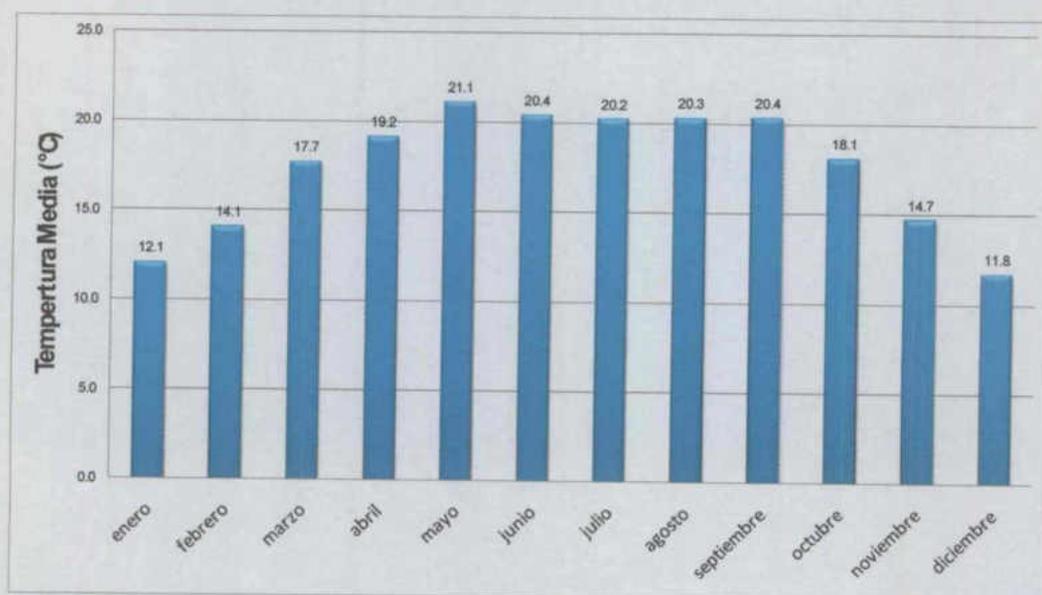


Figura 4.1. Distribución mensual de la temperatura fuera del Bosque de Encino en El Pílon, Mpio.de Jalpan de Serra, Qro., durante el año 2006.

La distribución de la temperatura media mensual es muy típica de esta región con veranos cálidos de Mayo a Septiembre en el rango de los 20 °C de temperatura media, e inviernos frescos en el rango de los 15 °C, respectivamente.

Si se analiza la variación horaria de la temperatura en este sitio de estudio, el promedio para todos los meses del 2006 se presenta en la Figura 4.2. Se observa que para todos los meses la temperatura mínima se presenta alrededor de las 7:00 hrs, iniciándose un incremento pronunciado a partir de esta hora y logrando valores máximos alrededor de las 14:00 hrs. En el rango de las 12:00 a las 16:00 horas no existen cambios significativos de la temperatura, comenzando a disminuir con una pendiente menos pronunciada que el incremento referido anteriormente, lo que implica un calentamiento rápido y un enfriamiento lento.

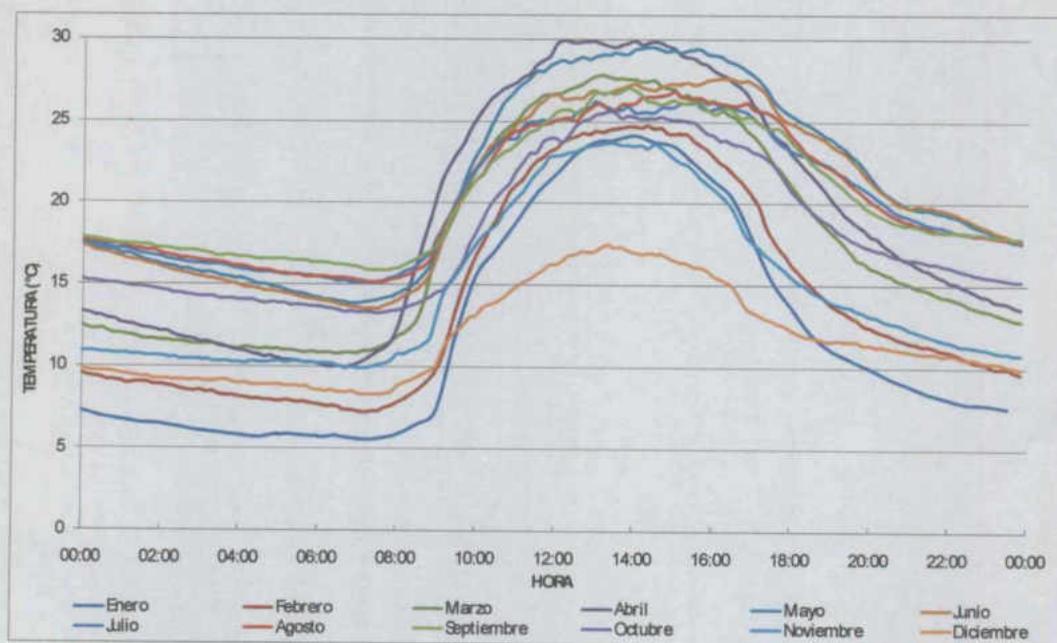


Figura 4.2. Variación horaria de la temperatura dentro del Bosque de Encino para los meses del 2006 en El Pilón, Mpio de Jalpan de Serra, Qro.

Para el sensor ubicado dentro del bosque templado en el sitio de El Pilón, la temperatura promedio anual durante el 2006 fue de 17.3 °C. La mínima registrada durante el año fue de 0.1 °C y ocurrió el día Juliano 44 que corresponde al 13 de febrero a las 7:10 am. Para el caso de la temperatura máxima, se registró

el día Juliano 129 que corresponde al 9 de mayo con un valor de 37.1 °C a las 15:30 hrs. Respecto a la variación mensual, el mes más caluroso para este sitio fue Mayo con una temperatura media de 20.9 °C, mientras que el mes más frío es Diciembre con una temperatura media de 12.1 °C. La distribución de la temperatura media mensual dentro del bosque se observa en la Figura 4.3.



Figura 4.3. Distribución mensual de la temperatura dentro de bosque en El Pílon, Mpio.de Jalpan de Serra, Qro., durante el año 2006.

Al comparar los valores de temperatura media mensual fuera (Figura 4.1) y dentro (Figura 4.3) del bosque se observa un ligero aumento dentro del bosque en comparación con el punto fuera del bosque durante los meses invernales (diciembre, enero, febrero, marzo, y abril), y una ligera disminución en los puntos respectivos durante el resto de los meses (mayo a noviembre). Aunque pareciera que la vegetación refresca el aire durante los meses calientes y lo calienta durante los mese fríos, las diferencias en la temperatura media mensual dentro y fuera del bosque de encino no fueron estadísticamente significativas ($p=0.8865$), de acuerdo a la *prueba de t* de comparación de medias.

La variación correspondiente de la temperatura horaria para el sensor colocado dentro del bosque de encinos en el sitio de El Pílon se presenta en la

Figura 4.4. Se observa que los tiempos de ocurrencia de las temperaturas mínimas y máximas son muy similares tanto dentro como fuera del bosque. Sin embargo, en el primer caso, la pendiente tanto de incremento como de decremento son menos pronunciadas que para el caso del punto fuera de bosque, lo que implica un amortiguamiento del aumento de la temperatura por la vegetación.

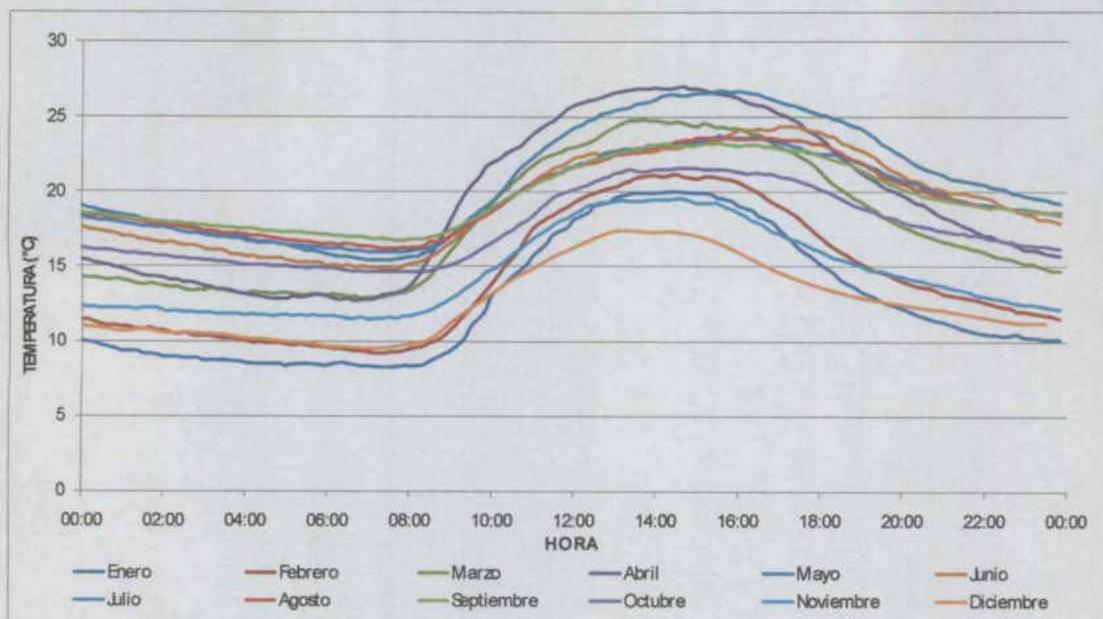


Figura 4.4. Variación horaria de la temperatura dentro del Bosque de Encino para los meses del 2006 dentro de Bosque de encinos en El Pílon, Mpio de Jalpan de Serra, Qro.

La pendiente de la línea de ascenso (Calentamiento) y de descenso (enfriamiento) dentro y fuera del bosque se presenta en la Tabla 4.1. El valor de la pendiente indica la tasa de aumento de la temperatura por unidad de hora en el periodo referido. Los datos presentados indican que el calentamiento del aire, desde alrededor de las 7:00 hrs, cuando se alcanza la temperatura mínima, hasta alrededor de las 14:00 hrs, cuando se alcanza la temperatura máxima, es más acentuado fuera del bosque que dentro del bosque. La tasa de calentamiento en este periodo fue en promedio de 2.1 °C/h fuera del bosque, comparado con un valor medio de 1.2 °C/h dentro del bosque. Estos valores son diferentes estadísticamente ($p=0.0005$), de acuerdo a la *prueba de t* para la comparación de medias. A partir de las 14:00 horas y hasta las 7:00 horas del día siguiente, el aire

se enfría a una tasa media de 0.8 °C/h fuera del bosque y de 0.6 °C/h dentro del bosque. Aunque la diferencia parece no muy notable, estadísticamente ($p=0.003$) si son diferentes, de acuerdo a la *prueba de t* de comparación de medias.

Tabla 4.1. Pendiente de la curva de calentamiento y enfriamiento en un bosque de encinos en El Pílon, Jalpan, Qro.

MES Año 2006	Pendiente de calentamiento °C/h		Pendiente de enfriamiento °C/h	
	Fuera	Dentro	Fuera	Dentro
Enero	2.7	1.6	1.1	0.7
Febrero	2.4	1.7	1.0	0.7
Marzo	2.4	1.8	1.0	0.7
Abril	3.6	1.8	1.1	0.9
Mayo	2.2	1.3	0.9	0.7
Junio	1.6	1.0	0.9	0.7
Julio	1.8	0.9	0.6	0.5
Agosto	1.6	0.9	0.7	0.5
Septiembre	1.8	0.8	0.6	0.4
Octubre	1.8	1.0	0.7	0.4
Noviembre	2.2	1.0	0.8	0.5
Diciembre	1.2	1.0	0.6	0.5
MEDIA	2.1	1.2	0.8	0.6

Otro aspecto importante que se observa en las Figuras 4.2 y 4.4. es la amplitud de los valores de temperatura. El rango de la temperatura, definido en este caso como la diferencia entre la temperatura máxima y mínima diaria, fue mayor para el sensor colocado afuera del bosque que el sensor colocado dentro del bosque para todos los meses de observación (Tabla 4.2). Es importante notar que el valor promedio de temperatura fue muy similar, lo que indica entonces que el rango disminuyó por una reducción de la temperatura máxima y un aumento de la temperatura mínima diaria en magnitud muy similar, lo que hizo que la temperatura media no cambiara significativamente.

Tabla 4.2 Comparativo de valores de temperatura de los sensores ubicados dentro y fuera del Bosque Templado de Encinos en El Pílon, Mpio de Jalpan de Serra, Qro.

TEMPERATURA °C								
MES	MAXIMA		MINIMA		RANGO		MEDIA	
	FUERA	DENTRO	FUERA	DENTRO	FUERA	DENTRO	FUERA	DENTRO
ENERO	24.2	20.1	5.6	8.3	18.6	11.8	12.1	12.7
FEBRERO	24.8	21.2	7.2	9.2	17.5	14.2	14.1	14.2
MARZO	27.8	24.9	10.8	12.9	17.1	12.0	17.7	17.9
ABRIL	29.9	27.0	9.9	12.7	20.0	14.3	19.0	19.3
MAYO	29.5	26.8	13.8	15.4	15.7	11.4	21.1	20.9
JUNIO	27.7	24.4	13.5	14.9	14.2	9.6	20.4	19.4
JULIO	26.2	23.8	15.1	16.0	11.1	7.8	20.2	19.6
AGOSTO	26.8	23.7	15.1	16.2	11.7	7.4	20.3	19.7
SEPTIEMBRE	27.0	23.3	15.8	16.8	11.2	6.6	20.4	19.7
OCTUBRE	25.6	21.6	13.3	14.6	12.4	7.0	18.1	17.6
NOVIEMBRE	23.7	19.6	9.9	11.5	13.8	8.1	14.7	14.5
DICIEMBRE	17.5	17.4	8.3	9.5	9.2	7.9	11.8	12.7

Los datos anteriores prueban el beneficio de este tipo de vegetación (bosque templado de encino) en la regulación de la temperatura del ambiente, haciendo que las temperaturas máximas sean de menor magnitud y que las temperaturas mínimas sean menos frías, lo que potencialmente puede afectar los procesos de evapotranspiración. Las temperaturas medias diarias, y máximas y mínimas diarias fuera y dentro del bosque para los doce meses de de observación durante el 2006 se muestran en el Figura 4.5, con lo cual queda probado el efecto de la vegetación en la regulación de la temperatura.

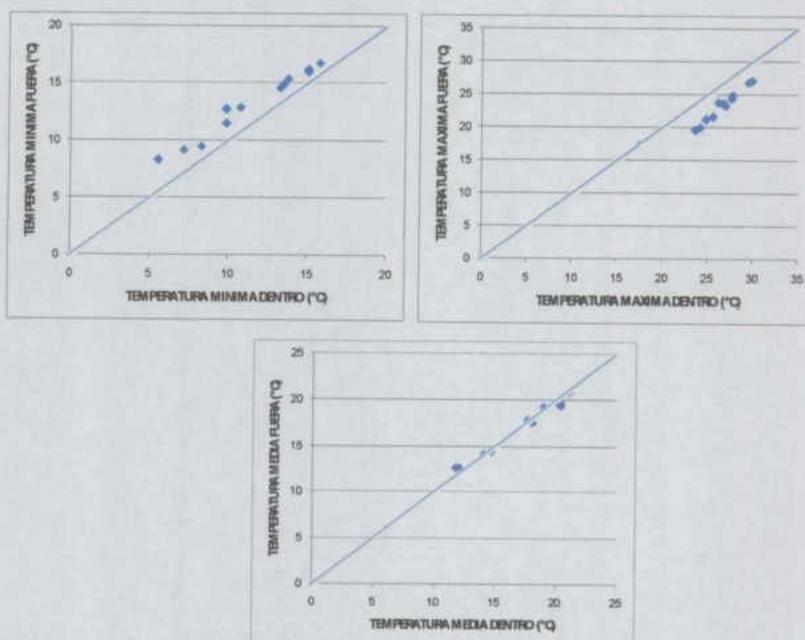


Figura 4.5. Relación entre la temperatura fuera y dentro del bosque para El Pílon,

Este efecto puede estar relacionado con el servicio ecosistémico de confort o frescura proporcionado por los bosques (Bermúdez et al. 2000). El fenómeno se puede visualizar a diferentes escalas. La Figura 4.6. presenta la variación de la temperatura durante todo el año de las temperaturas máximas, mínimas y medias diarias. Igualmente se puede observar que las temperaturas son mas extremosas afuera que dentro del bosque templado de encino.

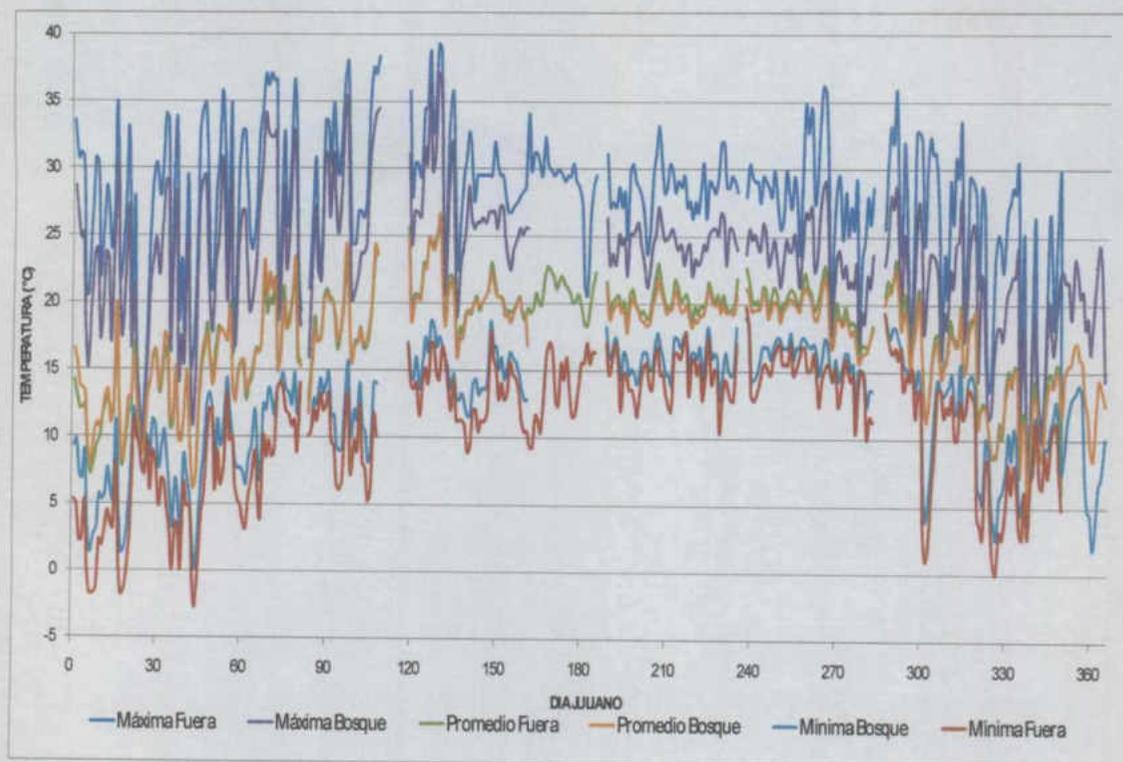


Figura 4.6. Variación de la temperatura durante el año 2006 en el Sitio El Pílon, Municipio de Jalpan de Serra, Qro.

4.1.2. La temperatura en el sitio "Tancoyolillo"

En el sitio de Tancoyolillo solo se colocó un sensor fuera de la selva baja caducifolia para monitorear la temperatura del aire, por lo que los resultados en este apartado solo son descriptivos para el sitio. La temperatura promedio anual en el 2006 fue de 20.5°C para este sitio. La mínima registrada durante el año fue de 3.2°C y ocurrió el día juliano 44 a las 7:00 hrs. La temperatura máxima se registró el día juliano 129 a las 16:30 hrs con un valor de 40.6 °C. En relación a la variación mensual, el mes más caluroso para este sitio fue Mayo con una

temperatura media de 24.2 °C, mientras que el mes más frío es diciembre con una temperatura media de 14.3 °C. La distribución de la temperatura media mensual se observa en la Figura 4.7.



Figura 4.7. Distribución mensual de la temperatura en Tancoyolillo, Mpio. de Jalpan de Serra, Qro., durante el año 2006.

La variación horaria de la temperatura para este sitio se presenta en la Figura 4.8 para cada uno de los meses del año. Se observa que para todos los meses la temperatura mínima se presenta alrededor de las 7:00 hrs; se inicia un incremento más suavizado que en el caso del pilón a partir de esta hora y hasta las 14:00 hrs. A partir de las 16:00 hrs comienza a disminuir la temperatura de manera suave y muy similar al incremento matutino.

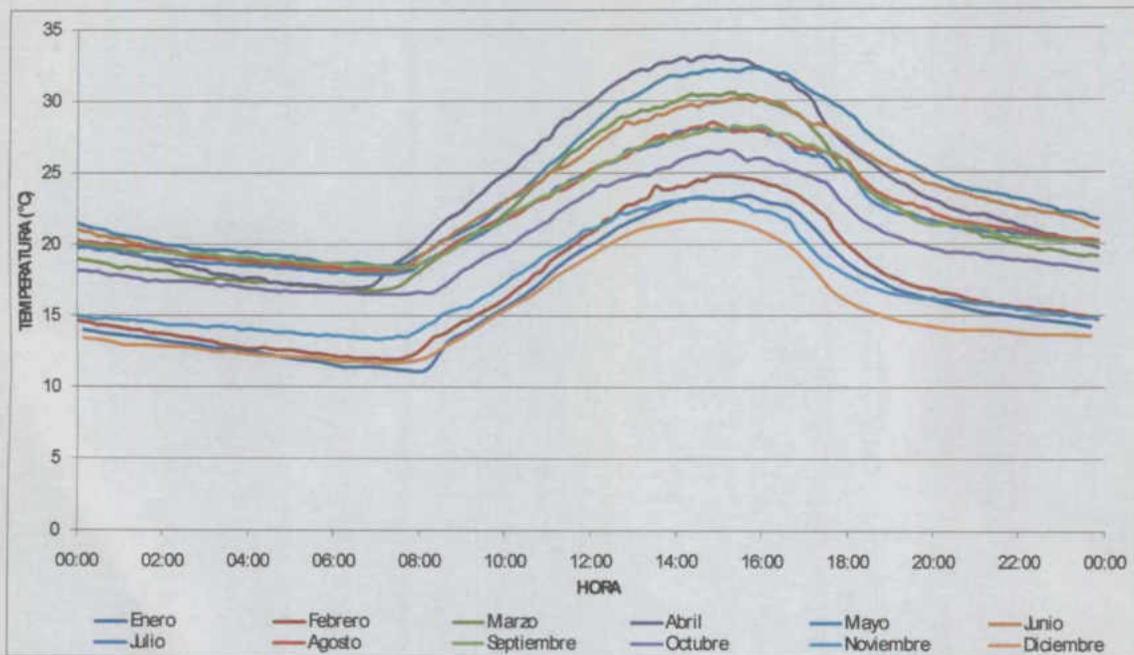


Figura 4.8. Variación horaria de la temperatura para los meses del 2006 en Tancoyolillo, Mpio de Jalpan de Serra, Qro.

El rango entre las temperaturas máximas, mínimas y promedio diarias durante el año puede observarse en la Figura 4.9. Se observa en la grafica que del día juliano 140 al 260, las variaciones de los valores no son significativos, es decir correspondiente al lapso del periodo de lluvias.

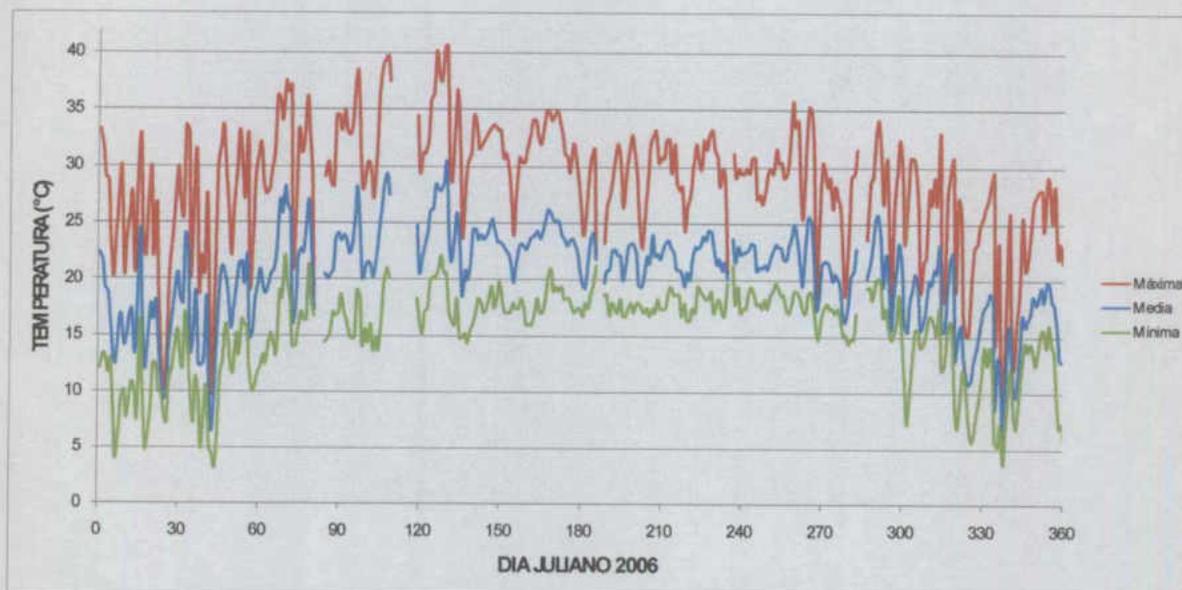


Figura 4.9. Variación de la temperatura durante el año 2006 en el sitio Tancoyolillo, Municipio de Jalpan de Serra, Qro.

4.2. Análisis de la Humedad Relativa

En este apartado se analizan y discuten los resultados de la medición de la humedad relativa del aire tanto dentro como fuera del bosque para los sitios de estudio de El Pilón y Tancoyolillo para el año 2006.

4.2.1. La humedad relativa en el sitio "El Pilón"

La variación de la humedad relativa media mensual el El Pilón se muestra en la Figura 4.10. El mes con la humedad relativa más baja fue Abril, con un valor de alrededor de 74%. La humedad relativa aumentó en los meses subsiguientes con la temporada de lluvias y registró su máximo valor el Diciembre con un porcentaje de humedad relativa de alrededor de 94%.

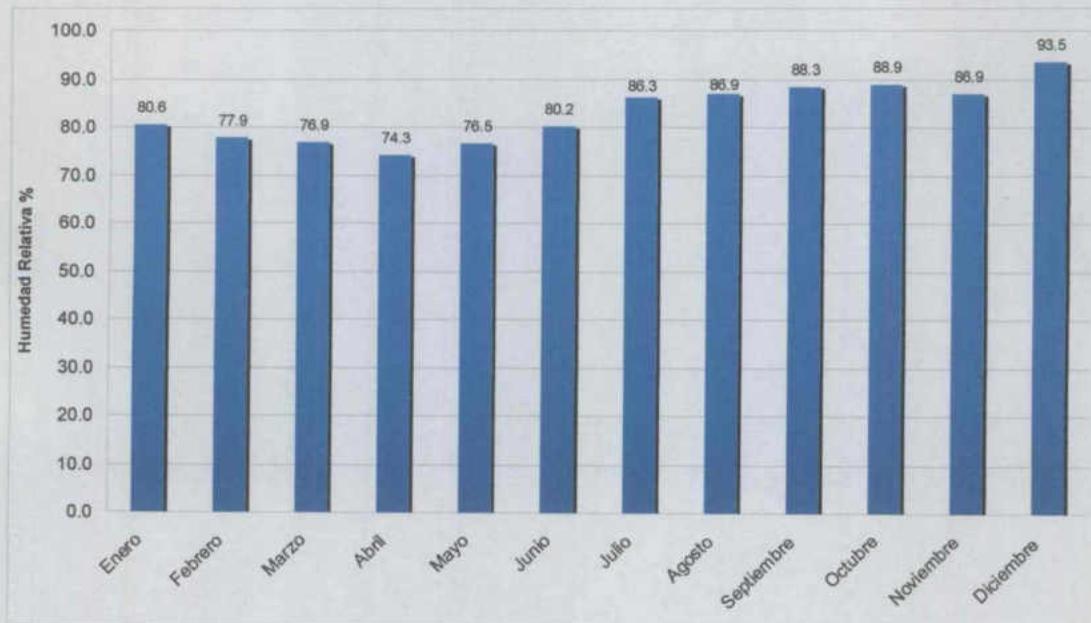


Figura 4.10. Variación de la humedad relativa media mensual fuera del Bosque Templado durante el 2006 El Pilón, Mpio. de Jalpan de Serra, Qro.

En lo que respecta a la variación mensual de la humedad relativa dentro del bosque, los resultados se presentan en la Figura 4.11. El comportamiento es muy similar al del punto fuera del bosque, con ligeras variaciones en la magnitud. El mes con la humedad relativa más baja es igualmente Abril, con un valor de alrededor de 71%, mientras que el valor más alto correspondió a Septiembre y Octubre con un valor de alrededor de 92%.

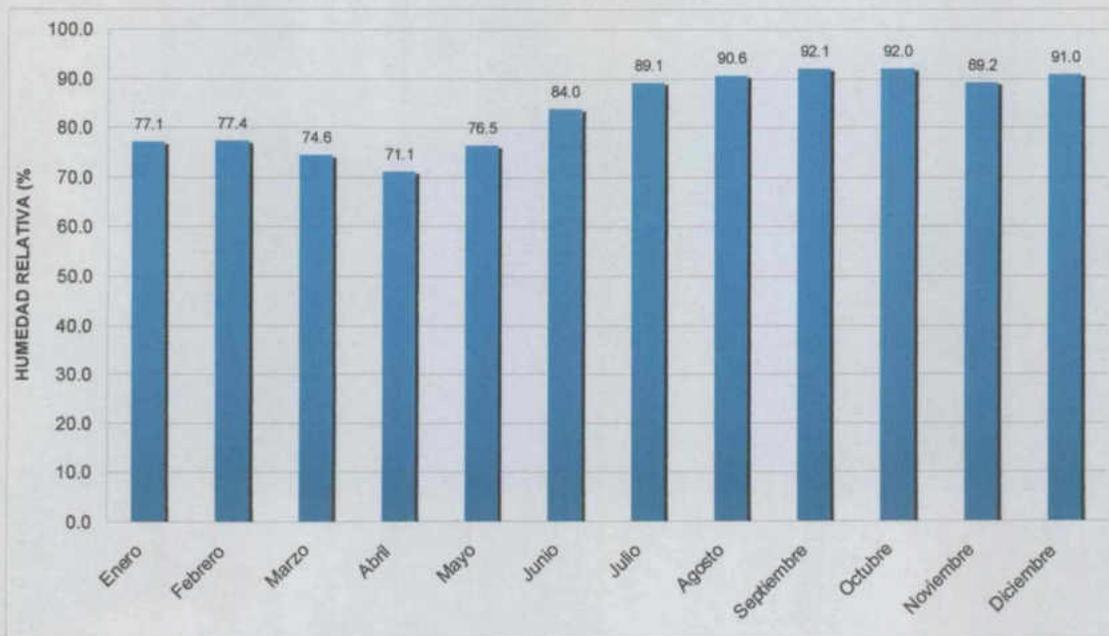


Figura 4.11. Variación de la humedad relativa media mensual dentro del Bosque Templado durante el 2006 El Pilón, Mpio. de Jalpan de Serra, Qro.

Uno de los aspectos importantes de este estudio es evaluar la variación de la humedad relativa durante el día para los meses monitoreados del 2006. Esto generó más detalle en el comportamiento de esta variable. La humedad relativa medida en el área fuera del Bosque Templado de acuerdo a los registros durante el 2006 se mantiene alrededor del 100% sin cambios significativos desde las 00:00 hrs hasta las 9:30 hrs para todos los meses de observación. A partir de las 9:30 hrs la humedad decrece rápidamente en forma parabólica invertida muy similar para todos los meses pero con diferente magnitud. El valor mínimo alcanzado fue de alrededor del 36% y correspondió al mes de Abril (Figura 4.12). De Enero a Mayo la humedad relativa presenta valores de alrededor de 50%, mientras que de Julio a Octubre la humedad mínima se mantiene en el rango del 60 al 70%. Junio y Noviembre son meses transitorios entre los dos periodos mencionados.

Se observa en la gráfica de la Figura 4.12 que existen tres etapas de comportamiento de la humedad relativa. Una, de alrededor de las 0:00 horas hasta las 9:00 hrs donde no hay cambios significativos de la humedad relativa y los valores son máximos; una segunda cuando la humedad relativa disminuye rápidamente hasta alcanzar un mínimo alrededor de las 14:00 hrs; y finalmente

una fase de aumento de alrededor de las 14:00 hrs a las 24:00 hrs donde la humedad relativa vuelve a aumentar.

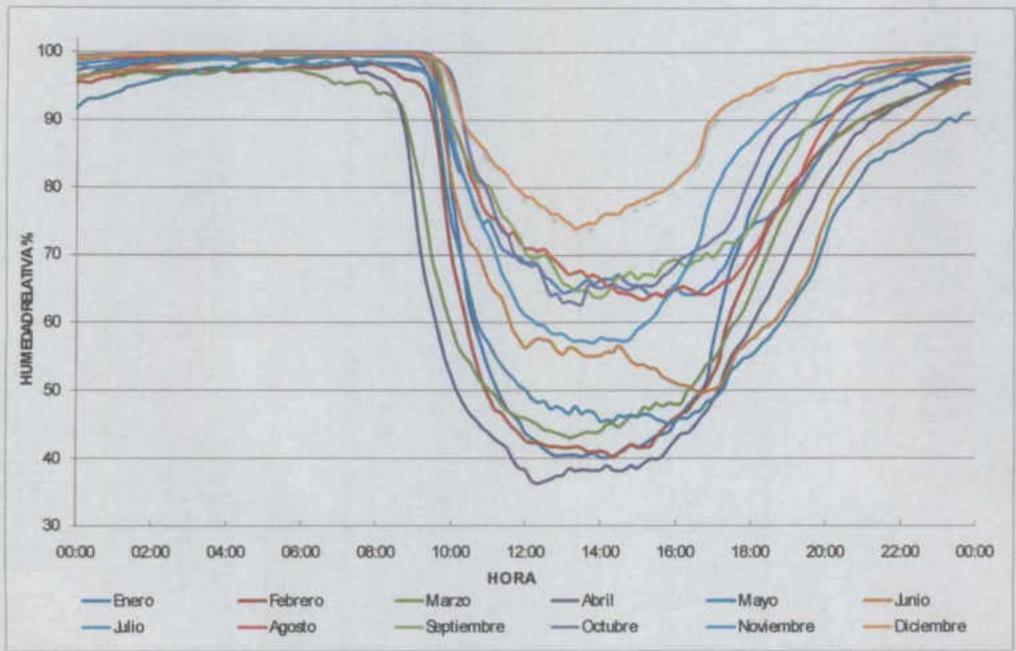


Figura 4.12. Distribución diaria de la humedad relativa fuera del Bosque Templado durante el año 2006, en el sitio El Pílon, Municipio de Jalpan de Serra, Qro.

La humedad dentro del Bosque templado muestra diferencias entre cada mes en el horario de las 00:00 a las 9:30. El mínimo alcanzado fue en el mes de Abril con un valor de alrededor de 43 % que ocurrió a las 14:00. Los valores máximos se presentaron en los meses de Julio a Octubre, en el horario de 5:00 a 9:00 de la mañana, coincidente con las horas de menor temperatura (Figura 4.13).

Los meses de Enero a Mayo presentaron sus mínimos valores en un rango de 42 a 54%. De Julio a Diciembre los valores mínimos fluctuaron en el rango de 70 a 80%.

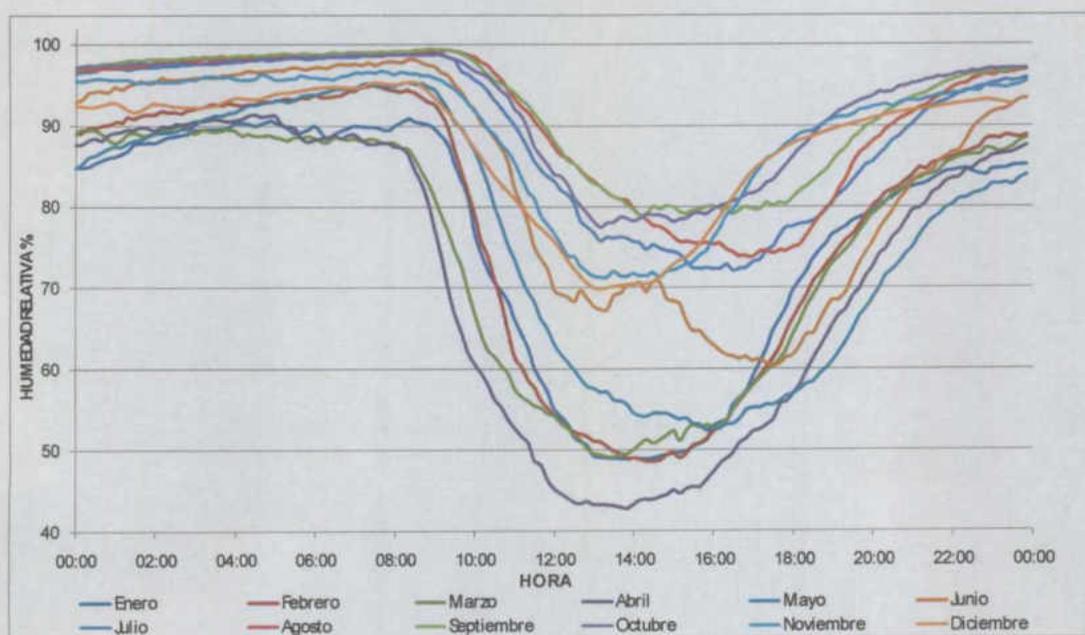


Figura 4.13. Distribución diaria de la humedad relativa dentro del Bosque Templado durante el año 2006, en el sitio El Pílon, Municipio de Jalpan de Serra, Qro.

De manera general se establece que el porcentaje de humedad dentro del bosque es diferente al porcentaje de humedad relativa fuera del bosque. Las dos tendencias encontradas son a valores de humedad relativa mayores dentro del Bosque Templado que fuera durante las horas más calientes del día, por lo que se puede mencionar que la vegetación ayuda a mantener el aire más húmedo al interior del bosque, lo que modifica el microclima y puede ayudar al crecimiento de especies que prefieren de estas condiciones.

Se observa que el comportamiento de la humedad relativa está muy relacionado con la distribución de la temperatura, tendiendo a ser menor durante las calientes y mayor durante las horas más frías del día. La relación entre la humedad relativa y temperatura del aire ya se ha establecido con anterioridad (Kitinoja, L. y Kader, A. 1995).

La relación inversa entre la temperatura del aire y la humedad relativa para el sitio El Pílon, se estudió mediante análisis de regresión. Los resultados se muestran en el Tabla 4.3 para el sensor fuera del bosque.

Tabla 4.3. Valores de los parámetros a y b en la ecuación de regresión $HR (\%) = a + b \text{ TEM}$ ($^{\circ}\text{C}$), donde HR es la humedad relativa y TEM es la temperatura del aire. Caso fuera del Bosque Templado en El Pílon.

MES	Parámetro b	Parámetro a	R ²
Enero	-3.400	121.0	0.977
Febrero	-3.589	128.4	0.986
Marzo	-3.365	136.5	0.987
Abril	-3.406	139.5	0.979
Mayo	-3.747	155.7	0.975
Junio	-3.765	157.1	0.948
Julio	-3.480	156.7	0.957
Agosto	-3.427	156.6	0.951
Septiembre	-3.498	159.6	0.971
Octubre	-3.158	146.1	0.964
Noviembre	-3.052	131.9	0.959
Diciembre	-2.919	127.9	0.925

El parámetro b en la ecuación es la pendiente de la recta de regresión e indica la disminución de la humedad relativa por cada aumento de un grado centígrado en la temperatura del aire. El valor de este parámetro varía de alrededor de 3.0 en Diciembre a un máximo de alrededor de 3.7 en Mayo y Junio. El valor promedio para todo el año fue de -3.4. Los valores altos del coeficiente de determinación indican una asociación muy estrecha entre las dos variables analizadas.

Para el sensor colocado dentro del Bosque Templado los resultados del análisis de regresión se muestran en la Tabla 4.4. En este caso los valores del coeficiente b variaron de alrededor de -3.0 a alrededor de -4.0. Los valores mayores correspondieron a los meses de Mayo y Junio, al igual que fuera del bosque, pero la magnitud fue ligeramente mayor. El valor medio anual para el punto dentro del bosque (-4.5), sin embargo, no fue estadísticamente significativo al valor medio fuera del bosque.

Tabla 4.4. Valores de los parámetros a y b en la ecuación de regresión $HR (\%) = a + b \text{ TEM } (^{\circ}\text{C})$, donde HR es la humedad relativa y TEM es la temperatura del aire. Caso dentro del Bosque Templado en El Pílon.

MES	Parámetro b	Parámetro a	R ²
Enero	-3.537	120.8	0.990
Febrero	-4.003	134.0	0.990
Marzo	-3.463	136.6	0.973
Abril	-3.473	138.3	0.975
Mayo	-3.967	159.3	0.985
Junio	-4.057	162.3	0.952
Julio	-3.554	158.9	0.943
Agosto	-3.383	157.4	0.915
Septiembre	-3.263	156.4	0.947
Octubre	-2.941	143.9	0.939
Noviembre	-2.975	132.4	0.944
Diciembre	-3.054	126.2	0.940

4.2.2. Análisis de la humedad relativa en el sitio de Tancoyolillo

En este sitio no se colocó sensor de humedad relativa dentro de la vegetación de selva baja caducifolia presente en el lugar, pero se describirán los valores obtenidos durante el 2006 para referencia. Los datos medios mensuales para este sitio se presentan en la Figura 4.14.

El valor medio mensual de humedad relativa más bajo fue de 53% y correspondió al mes de Abril, mientras que el valor medio mensual más alto fue de alrededor de 82% y correspondió al mes de Diciembre. El comportamiento mensual de Tancoyolillo es muy similar al de El Pílon, pero la magnitud de los valores es muy diferente. Tancoyolillo es un sitio con un aire más seco.

La variación diaria para los meses de evaluación del 2006 se presenta en la Figura 4.15. En este sitio no se observan las tres fases o etapas del comportamiento registrado en El Pílon, solo las fases de disminución y aumento, lo que indica que la humedad relativa máxima no se mantiene por periodos de tiempo largo en este sitio.

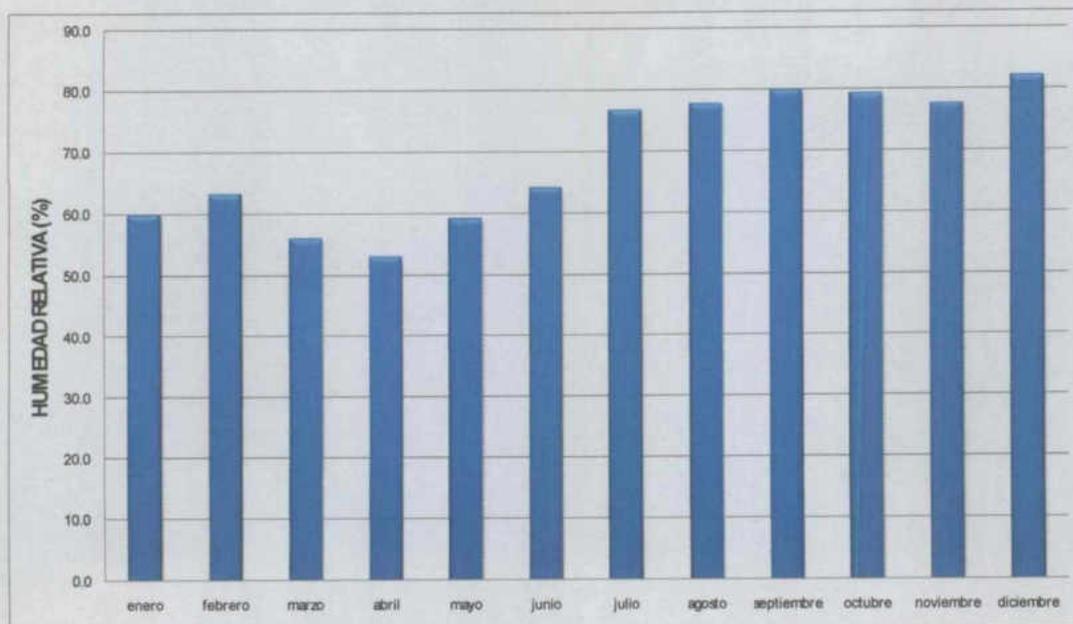


Figura 4.14. Variación de la humedad relativa media mensual fuera de la selva Baja Caducifolia durante el 2006 Tancoyolillo, Mpio. de Jalpan de Serra, Qro.

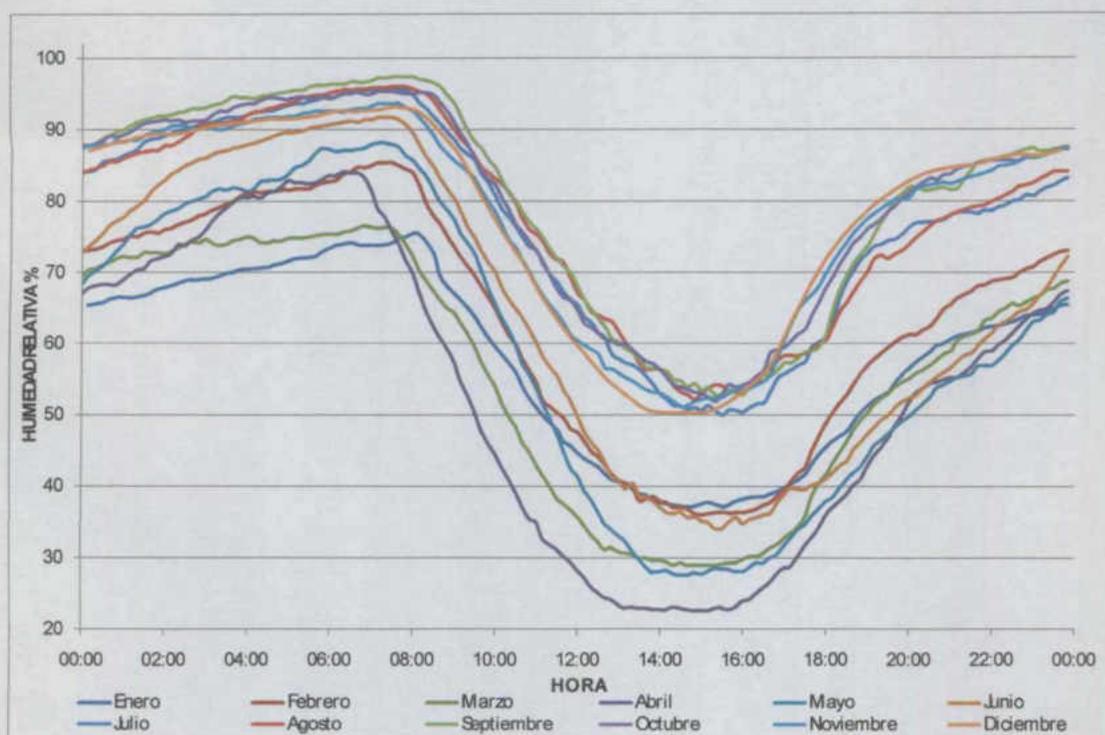


Figura 4.15. Distribución diaria de la humedad relativa fuera de la Selva Baja Caducifolia durante el año 2006, en el sitio Tancoyolillo, Municipio de Jalpan de Serra, Qro.

Solo para tener información de referencia, la relación entre la temperatura y la humedad relativa en Tancoyolillo también mostró ajustes muy significativos, con

valores del coeficiente b que variaron de alrededor de -3.2, en los meses más fríos, a alrededor de -4.8 en los meses más calientes y secos.

Tabla 4.5. Valores de los parámetros a y b en la ecuación de regresión $HR (\%) = a + b \text{ TEM } (^{\circ}\text{C})$, donde HR es la humedad relativa y TEM es la temperatura del aire. Caso fuera de la Selva Baja Caducifolia.

MES	Parámetro b	Parámetro a	R ²
Enero	-3.215	110.0	0.983
Febrero	-3.912	129.9	0.988
Marzo	-3.687	137.9	0.986
Abril	-3.854	144.6	0.971
Mayo	-4.400	165.8	0.971
Junio	-4.873	177.8	0.958
Julio	-4.355	172.4	0.978
Agosto	-4.230	171.7	0.972
Septiembre	-4.545	180.5	0.985
Octubre	-4.319	166.6	0.997
Noviembre	-4.379	152.3	0.989
Diciembre	-4.446	146.0	0.995

4.3. Análisis de la Precipitación

En este apartado se analizan las condiciones de la lluvia en los sitios de El Pílon, Tancoyolillo y El Aserradero

4.3.1. La Precipitación en el sitio de El Pílon.

El comportamiento de la precipitación en el año de 2006 para este sitio se muestra en la Figura 4.16. En el año llovió un total de 1468.5 mm, el mes más lluvioso fue junio con un total de 285.2 mm, el más seco fue abril con tan solo 18.0 mm. Es interesante observar que para el mes de julio hubo una precipitación menor en comparación de los meses de junio y agosto, lo cual no es normal en comparación con el registro histórico de la precipitación en la estación de Jalpan (INEGI, 2004).

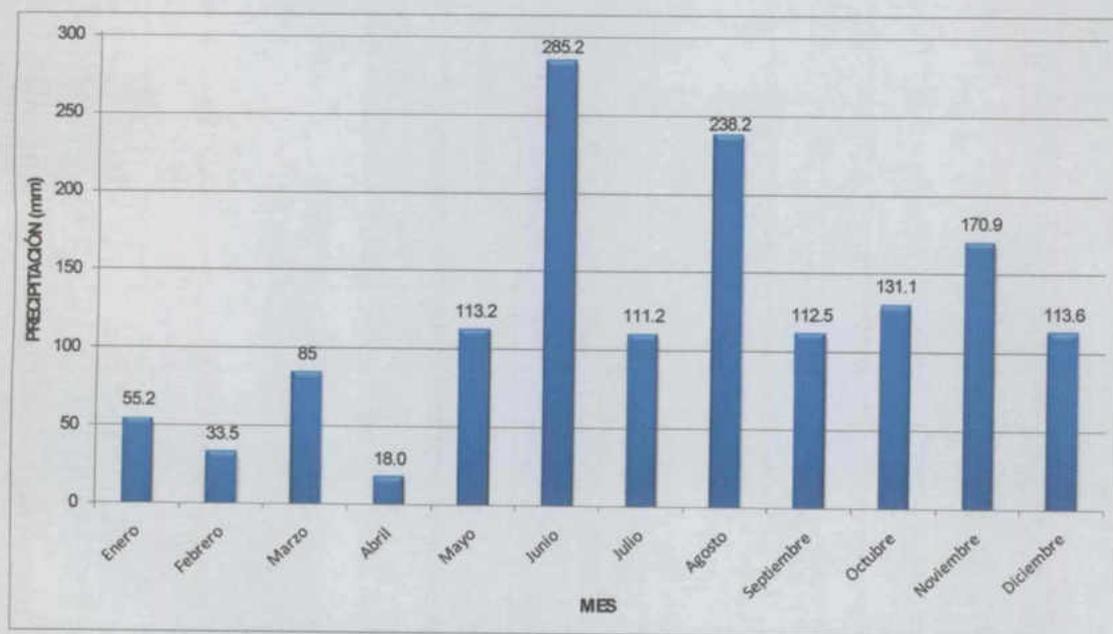


Figura 4.16. Distribución de la precipitación durante el año 2006, sitio El Pílon, Municipio de Jalpan de Serra, Qro

En el año ocurrieron 157 eventos de lluvia, 122 de ellos tuvieron (el 81%) en el rango 0 a 10 mm. De los eventos totales, 14 (alrededor del 9%), tuvieron valores dentro del rango de 10-20 mm, lo que quiere decir que para el año de registro en este sitio, el 90% de los eventos fueron de menos de 20 mm.

En lo que respecta a la duración de los eventos en El Pilón para el 2006, la mayoría tuvieron una duración de 0 a 120 minutos (alrededor del 58%). El número de eventos disminuyó para los siguientes rango de duración de forma exponencial, pero se observa un aumento en el número de eventos con duración mayor a los 720 minutos (Figura 4.17), lo cuales están asociados a la presencia de huracanes, ciclones, u otras masas de aire provenientes del Golfo de México.

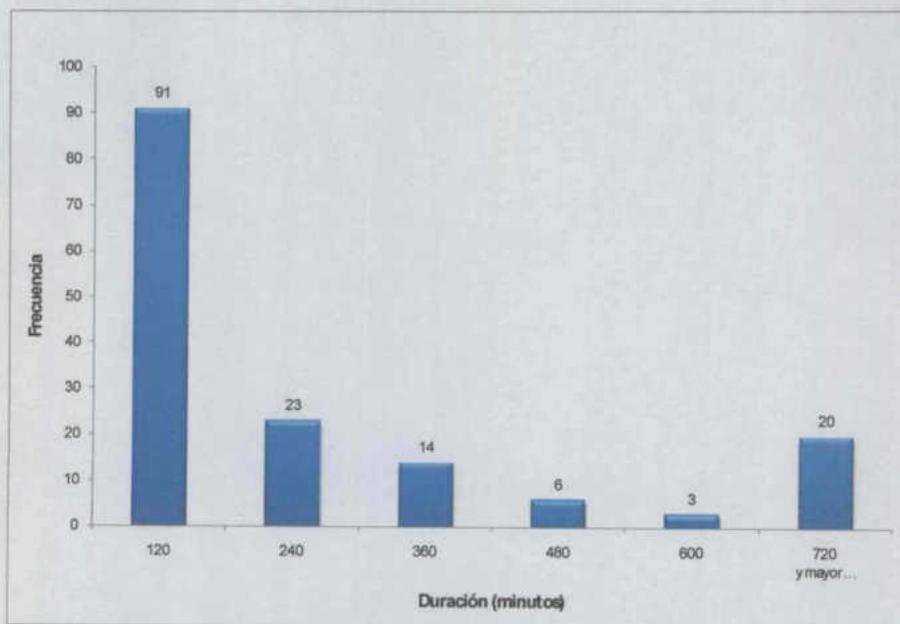


Figura 4.17. Duración de los eventos de lluvia durante el año 2006, sitio El Pilón, Municipio de Jalpan de Serra, Qro

En lo que se refiera a la intensidad media de los eventos, la gran mayoría de los eventos (147 de 157 ó alrededor del 94%) tuvieron una intensidad media en el rango de 0 de 10 mm/h. Tan solo 9 eventos (alrededor del 6%) registraron una intensidad en el rango de 10 a 20 mm/h, y existe solo un evento que destaca por haber presentado una intensidad media de más de 100 mm/h.

En general se puede mencionar que los eventos del sitio El Pilón son de intensidad baja (< 20 mm/h).

En general, el 85% de los eventos en El Pilón ocurrieron durante el año de observación de las 18:00 a las 9:00 hrs del día siguiente, un menor número de eventos ocurrió entre las 9:00 y 18:00 horas. Se puede mencionar que el

comienzo de las lluvias mantiene relación con el periodo del día donde inicia tanto la disminución de la temperatura como con el horario donde se presentan las mínimas temperaturas en las primeras horas de la mañana.

4.3.2. Precipitación en el sitio Tancoyolillo

En este sitio durante el año 2006 llovieron un total de 893 mm. Este sitio fue menos lluvioso que El Pilón. El mes más lluvioso fue Agosto con 181.7 mm de precipitación, el mes más seco fue Abril con tan solo 8.6 mm. La distribución de la lluvia durante el año se observa en la figura 4.18.

Para este sitio se observa una distribución normal de Mayo a Diciembre, con el periodo seco definido entre Enero y Abril.

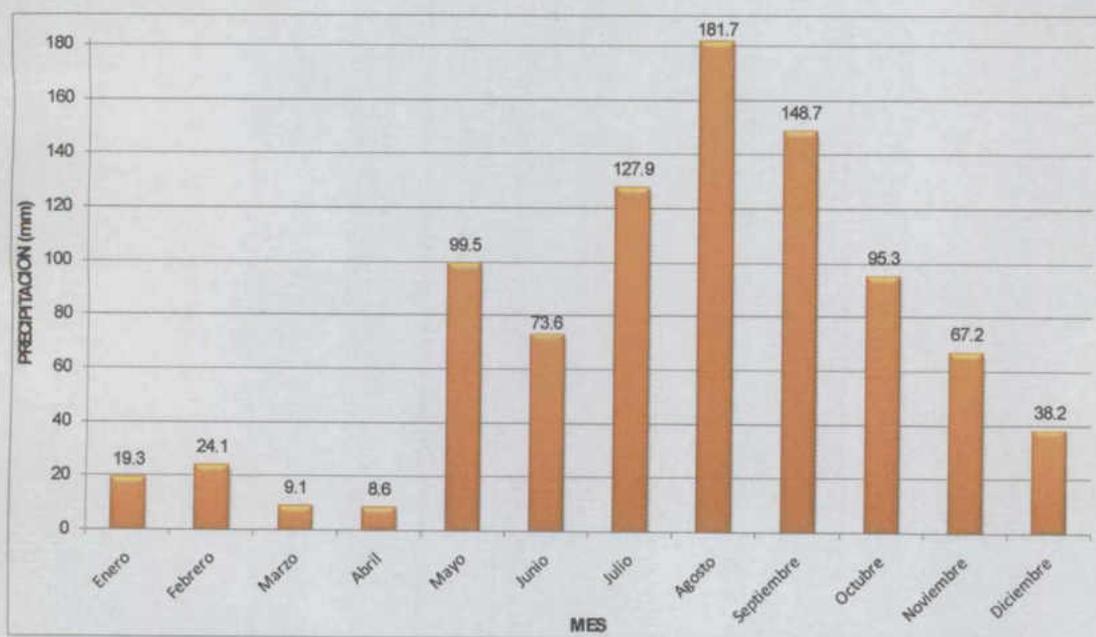


Figura 4.18. Distribución de la precipitación durante el año 2006, sitio Tancoyolillo, Municipio de Jalpan de Serra, Qro

De los 128 eventos de lluvia ocurridos en Tancoyolillo, 98 (alrededor del 77%) de ellos cayeron en el rango de precipitación de entre 0 a 10 mm, 13 eventos (alrededor del 10%) entre 10 y 20 mm, y el resto tuvieron precipitaciones de 20 a 60 mm. No hubo eventos mayores a este límite superior, y se puede mencionar que alrededor del 87% de los eventos en el sitio presentaron láminas menores a los 20 mm.

En términos de la duración de los eventos la distribución fue muy similar a la presentada en El Pilón. La mayor cantidad de eventos tuvieron una duración entre 0 y 120 minutos (74 de 128, o casi el 58%). Para los rangos mayores el numero comenzó a disminuir, con la peculiaridad nuevamente de contar con 20 eventos mayores a 720 minutos (Figura 4.19), que corresponden a los mismos eventos de El Pilón y que se asocian igualmente a la presencia de huracanes, ciclones, u otras masas de aire provenientes del Golfo de México.

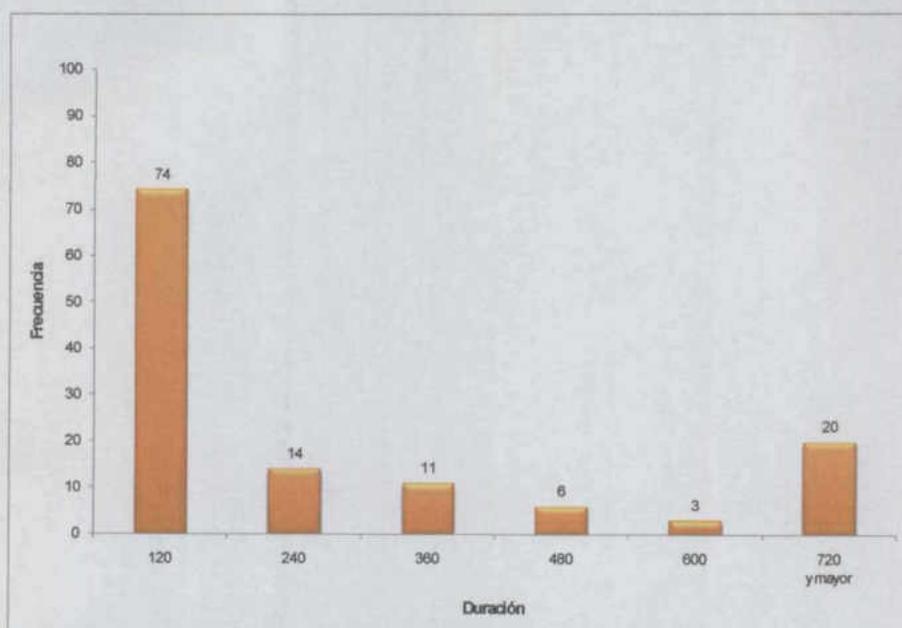


Figura 4.19. Duración de los eventos de lluvia durante el año 2006, sitio Tancoyolillo, Municipio de Jalpan de Serra, Qro

En lo referente a la intensidad media, casi la totalidad de los eventos, 121 de 128 (alrededor del 95%) estuvieron en el rango de 0 a 10 mm/h, 4 eventos (alrededor del 3%) tuvieron intensidades medias entre 10 y 20 mm/h, y el resto entre 20 y 40 mm/h de intensidad media. Se puede mencionar que el 98% de los eventos en este sitio presentaron intensidades medias menores de 20 mm/h.

La hora de inicio de los eventos ocurrió de la misma manera que los presentados en el Pilón, el mayor número de ellos inician en el periodo de las 18:00 a las 9:00 hrs (alrededor del 90%). Después de las 9:00 a antes de las 18:00 horas es cuando inician el menor número de eventos en este sitio.

4.3.3. Precipitación en el sitio Aserradero

El comportamiento mensual de la precipitación en el año 2006 para el sitio Aserradero, en el Municipio de Pinal de Amoles se observa en la Figura 4.20. En el año llovieron 1146 mm; el mes más lluvioso fue Septiembre con 275 mm de lluvia, mientras que el mes más seco fue Febrero con tan solo 13.5 mm. No se obtuvieron datos para el mes de junio debido a la pérdida de carga de la batería que hace funcionar el registrador del pluviómetro.

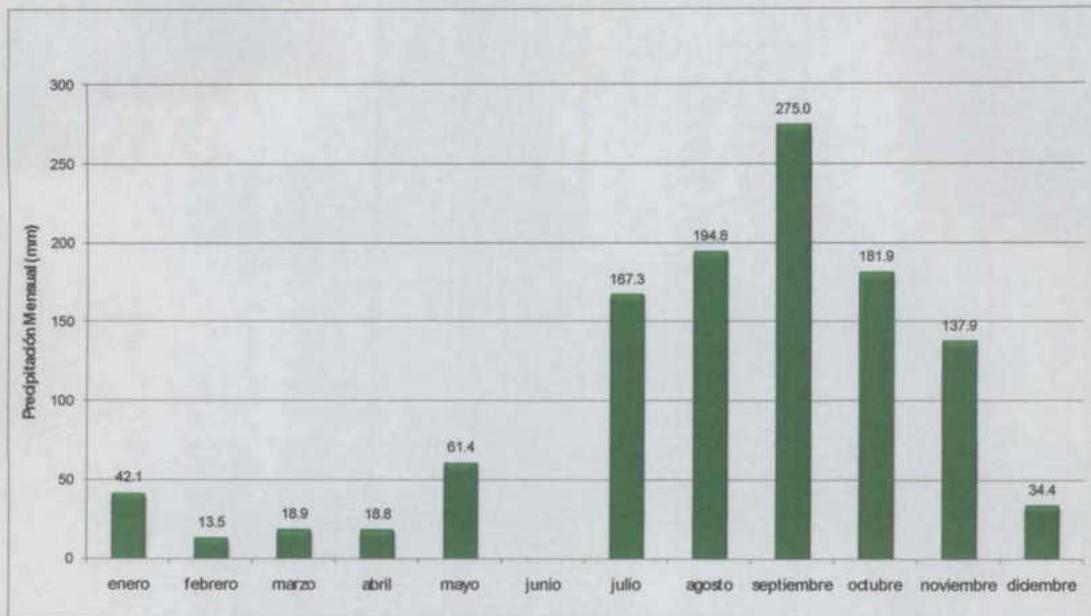


Figura 4.20. Distribución de la precipitación durante el año 2006, sitio El Aserradero, Municipio de Pinal de Amoles, Qro

En el año ocurrieron 120 eventos, 87 (alrededor del 73%) de ellos acumularon una lámina entre 0 y 10 mm, 18 eventos (el 15%) acumularon una lámina entre los 10 y 20 mm, y mayores a 20 mm. Solo hubo un evento con una lámina de más de 100 mm de lluvia. De forma muy similar a los sitios de El Pilón y Tancoyolillo, un gran porcentaje (el 88%) de los eventos en Aserradero son de menos de 20 mm.

En términos de duración de los eventos, un gran porcentaje de eventos tuvieron una duración dentro del rango de 0 a 120 minutos (47 de 120 o el 40%). Este porcentaje es menor que en los dos sitios anteriores. En el Aserradero los eventos se distribuyeron mas uniformemente por su duración, pero resalta también que el numero de eventos mayores a los 720 minutos es muy similar (20 eventos)

geográficamente, las zonas de máximo escurrimiento se presentaron en las unidades de la parte baja de la cuenca, donde en el caso de la condición carente vegetación se concentró hacia la parte noreste (Figuras 4.46 y 4.47).

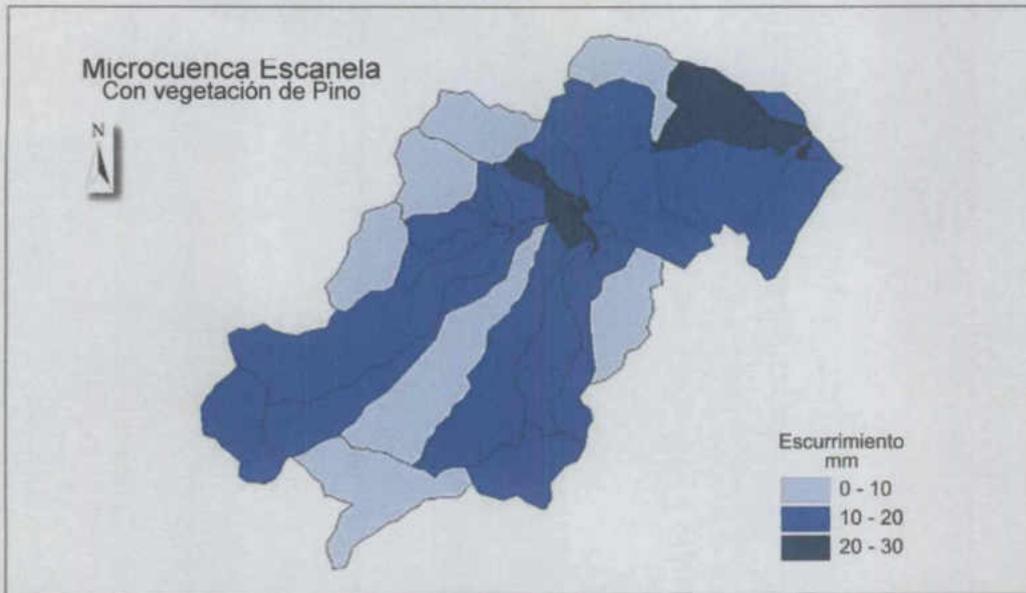


Figura 4.46 Lamina de escurrimiento (mm) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr con bosque de pino.

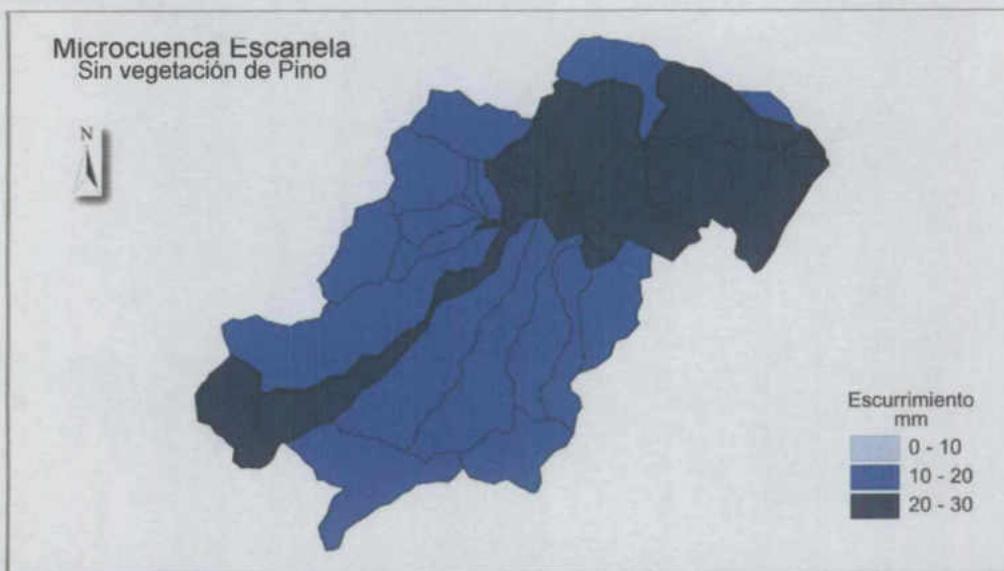


Figura 4.47 Lamina de escurrimiento (mm) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr sin bosque de pino.

El cambio de la superficie de la cuenca de acuerdo a la lámina de escurrimiento para las dos condiciones se observa en las Figuras 4.48 y 4.49.

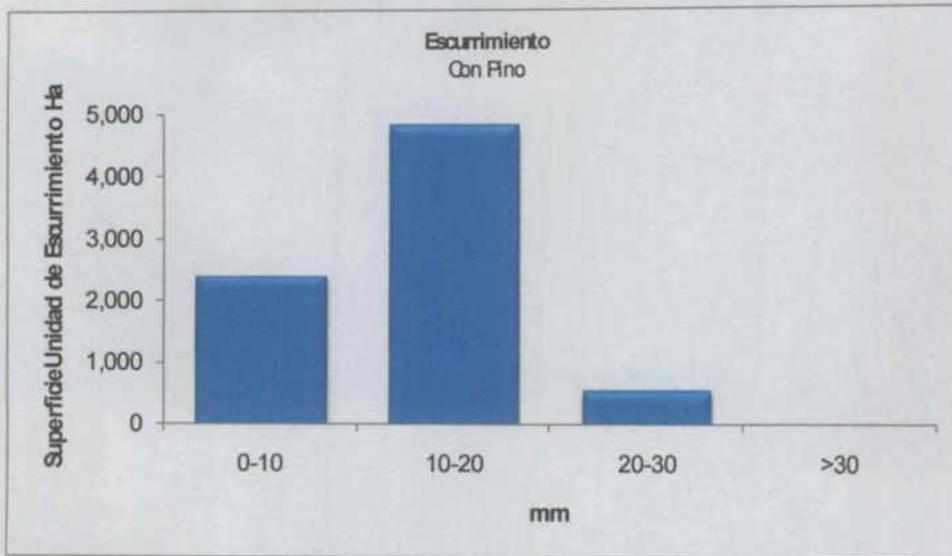


Figura 4.48 Lamina de escurrimento (mm) y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr con bosque de pino

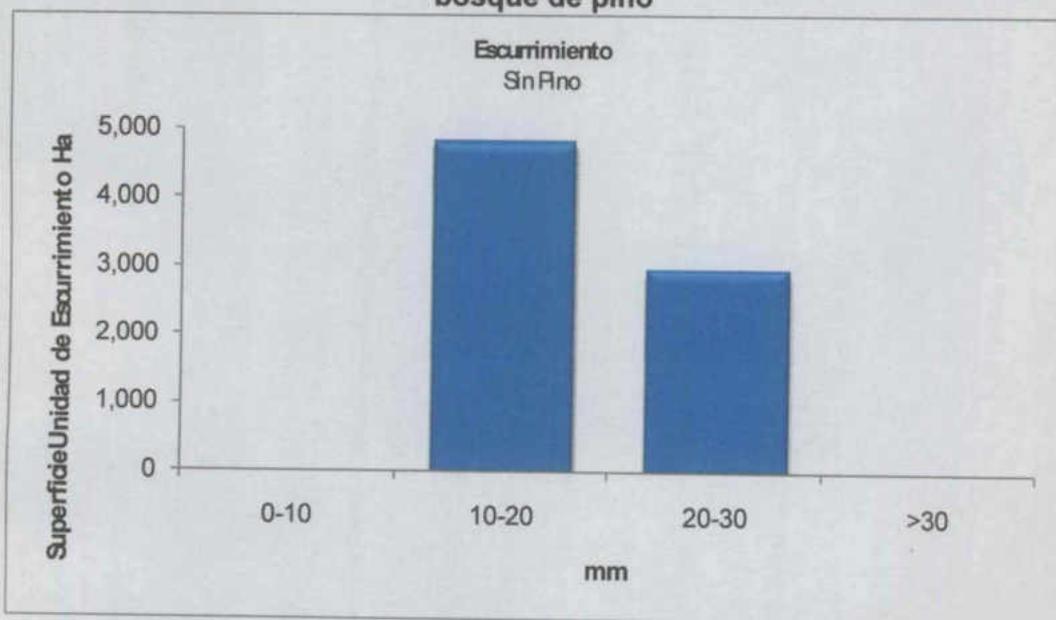


Figura 4.49 Lamina de escurrimento (mm) y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr sin bosque de pino

En lo que respecta al escurrimento pico o flujo pico en m^3/s , el promedio para la microcuenca fue de aproximadamente $43.2 m^3/s$ en condición de vegetación y $44.9 m^3/s$ en carencia de ella. Con rangos entre 0.172 a $43.2 m^3/s$ y 0.910 a $154.1 m^3/s$, respectivamente (Figuras 4.50 y 4.51).

En las gráficas comparativas se observa que para la condición de ausencia de bosque de pino, la superficie de la microcuenca con el rango de valores mayores a 30 m³/s domina ampliamente la superficie de la microcuenca, en comparación con el escenario de una microcuenca con vegetación de pino conservado (Figuras 4.52 y 4.53).

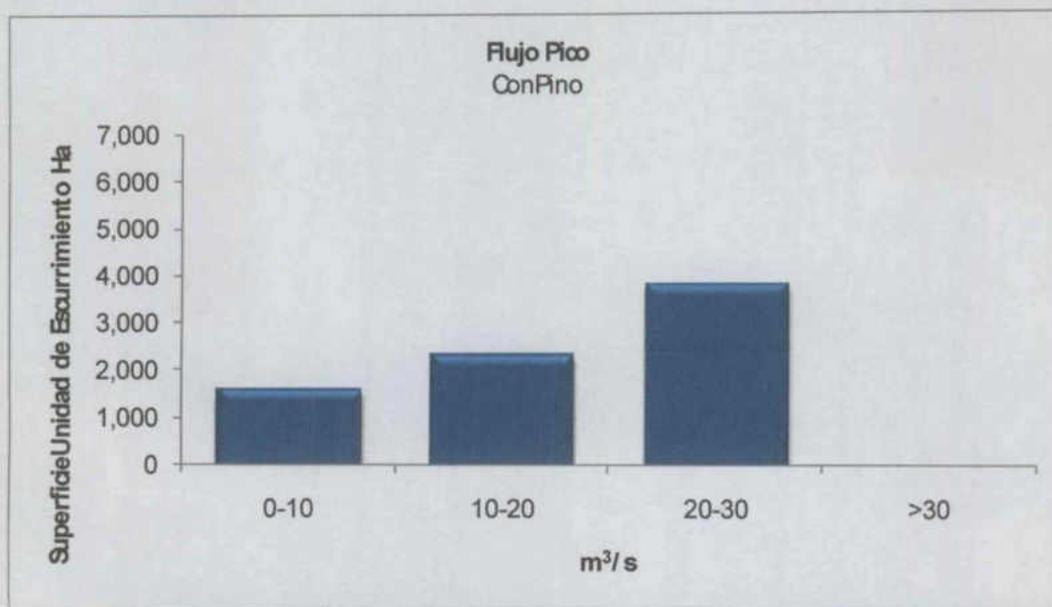


Figura 4.50. Flujo pico (m³/s) y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr con bosque de pino

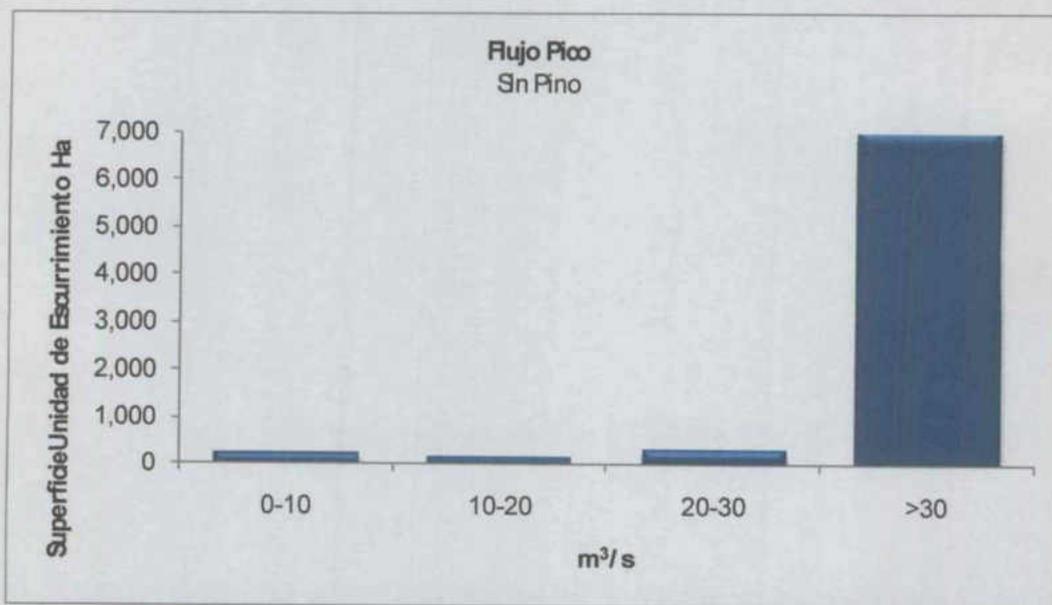


Figura 4.51 Escurrimiento pico (m³/s) y distribución de superficies en la microcuenca Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. sin bosque de pino

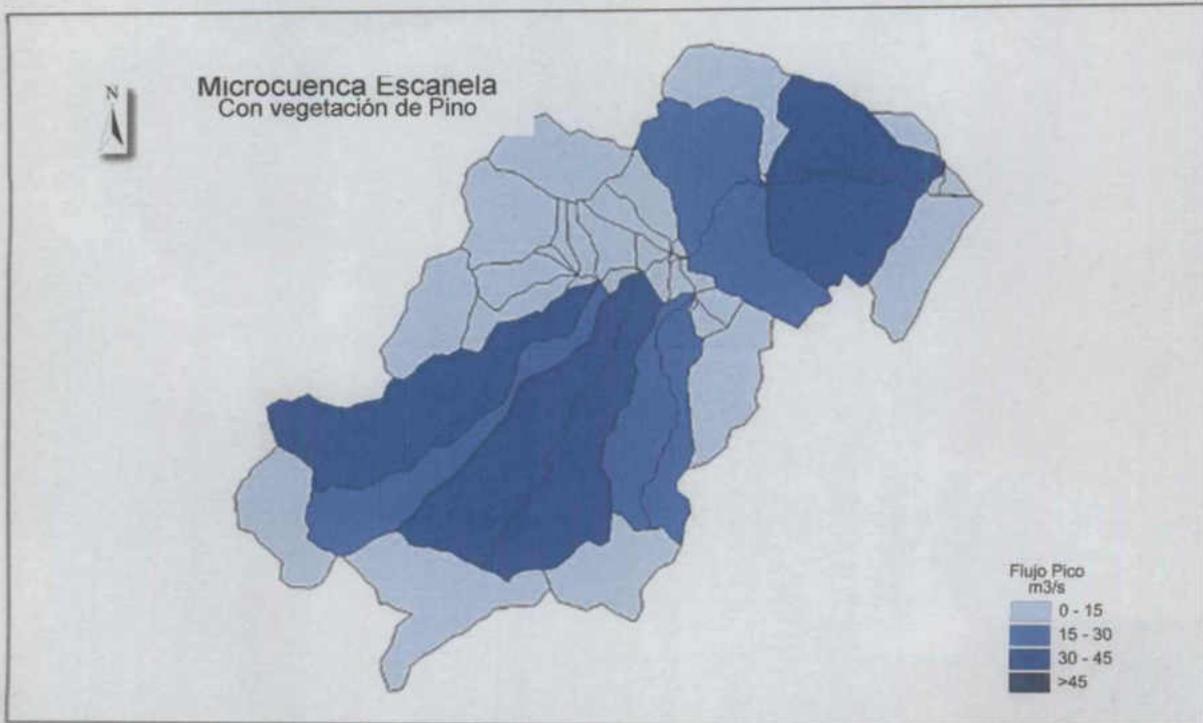


Figura 4.52. Esgurrimiento pico (m³/s) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (con bosque de Pino)

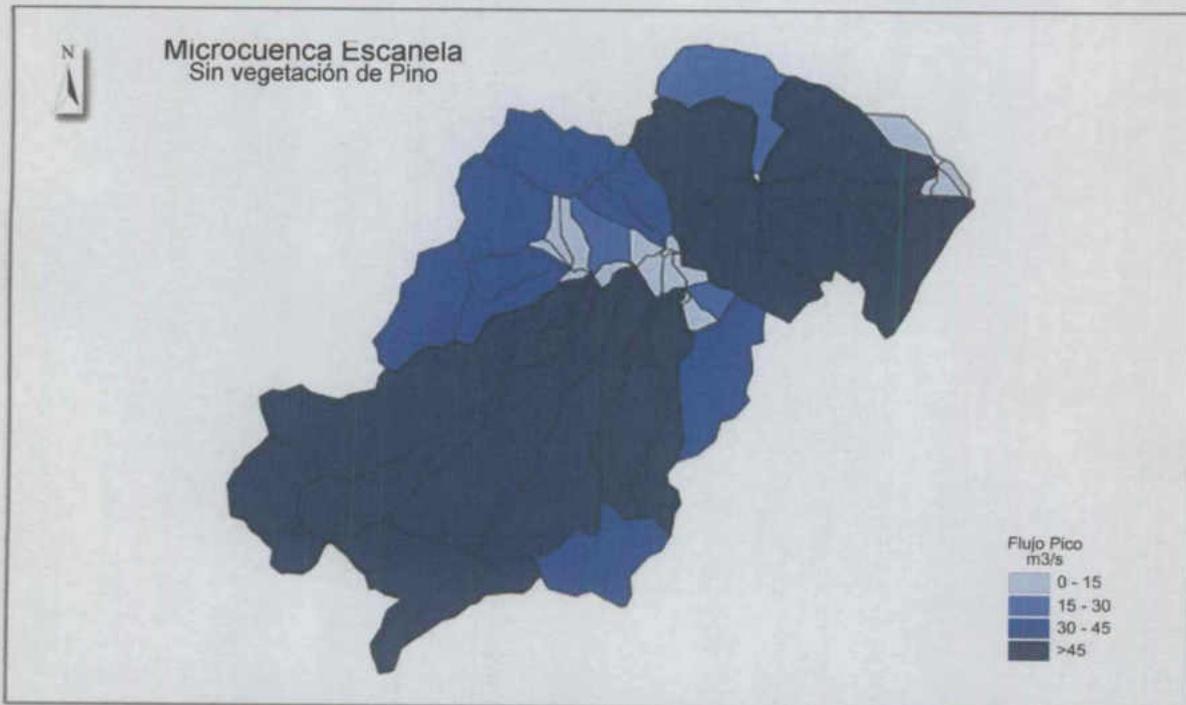


Figura 4.53. Esgurrimiento pico (m³/s) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (sin bosque de Pino)

Como proceso inverso al escurrimiento, la infiltración de la lluvia tuvo un valor promedio para la microcuenca Río Escanela de 23 mm con variaciones de 15 mm a 30 mm en la condición de bosque de pino y de 23 mm en promedio y variaciones de 10 mm a 23 mm en el caso de ausencia de pino. Se observa que los valores extremos disminuyeron aunque el promedio fue coincidente (Figuras 4.54 y 4.55).

Las gráficas comparativas muestran que la superficie de la microcuenca con mayor infiltración disminuyó en un 36% en relación con el caso de ausencia de vegetación de pino.

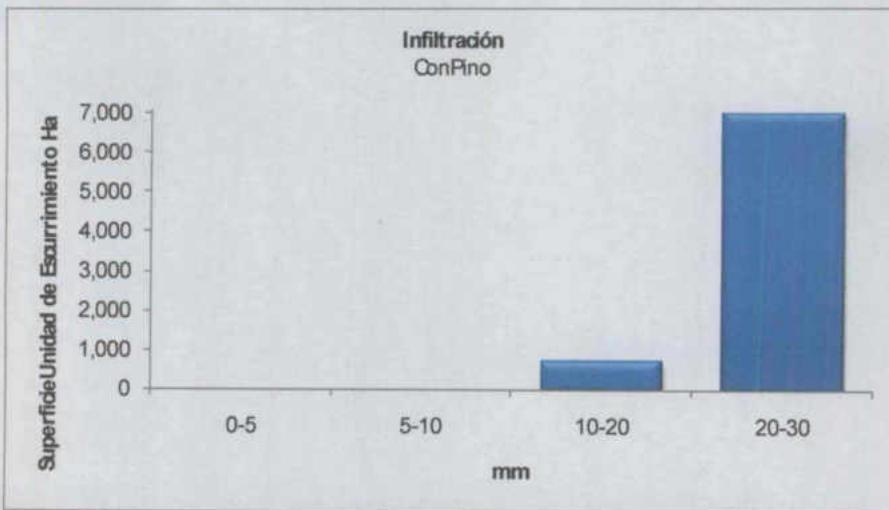


Figura 4.54. Infiltración mm y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr con bosque de pino

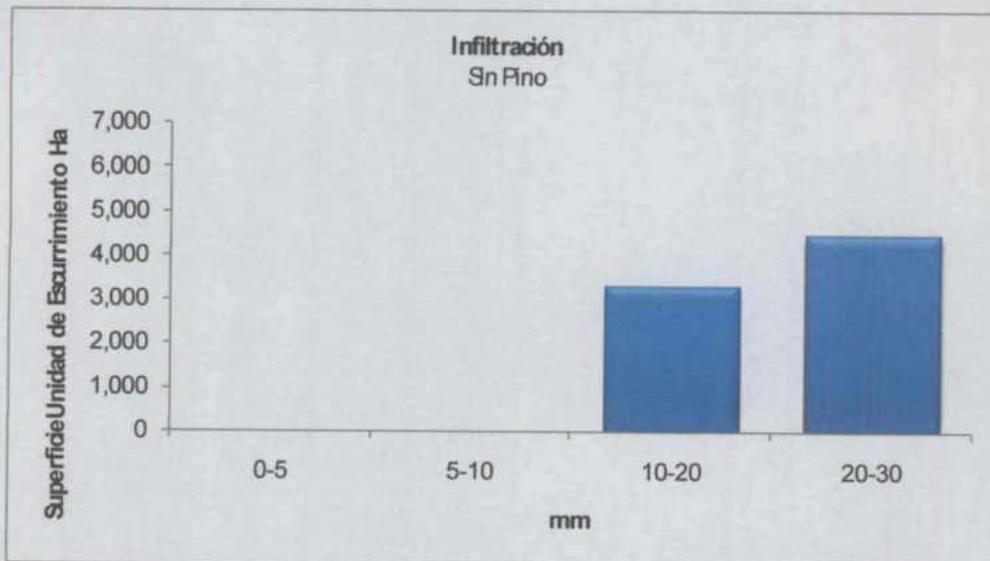


Figura 4.55. Infiltración mm y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr sin bosque de pino

Las unidades de escurrimiento con mayor infiltración corresponden completamente a las unidades con menor escurrimiento, lo que corrobora la importancia del estado conservado de la vegetación en estas áreas. Por otro lado, también existe correspondencia entre las unidades con mayor tasa de escurrimiento y las de menor infiltración (Figuras 4.56 y 4.57).

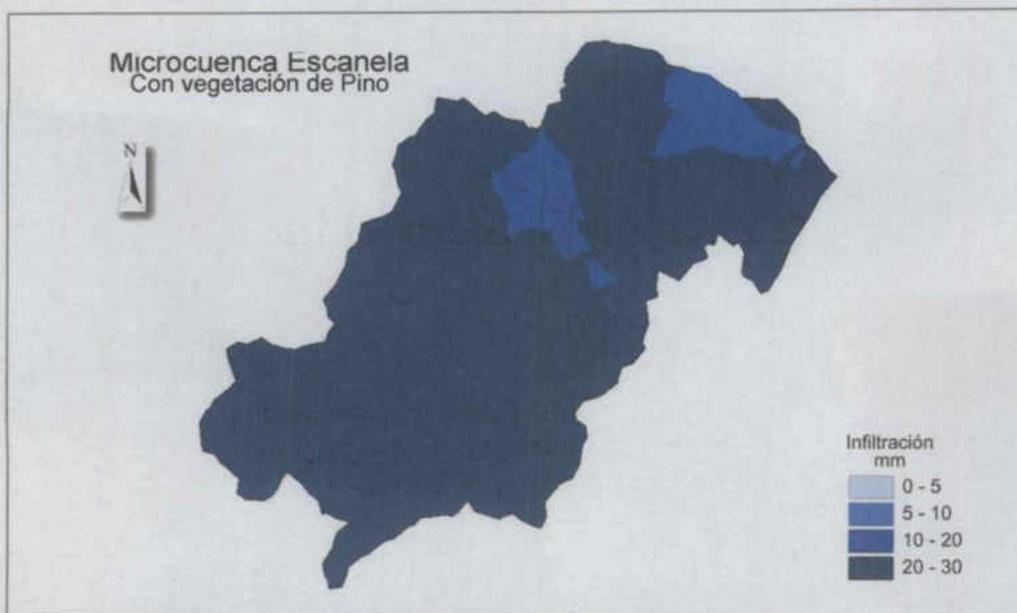


Figura 4.56. Infiltración (mm) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr.(con bosque de Pino)

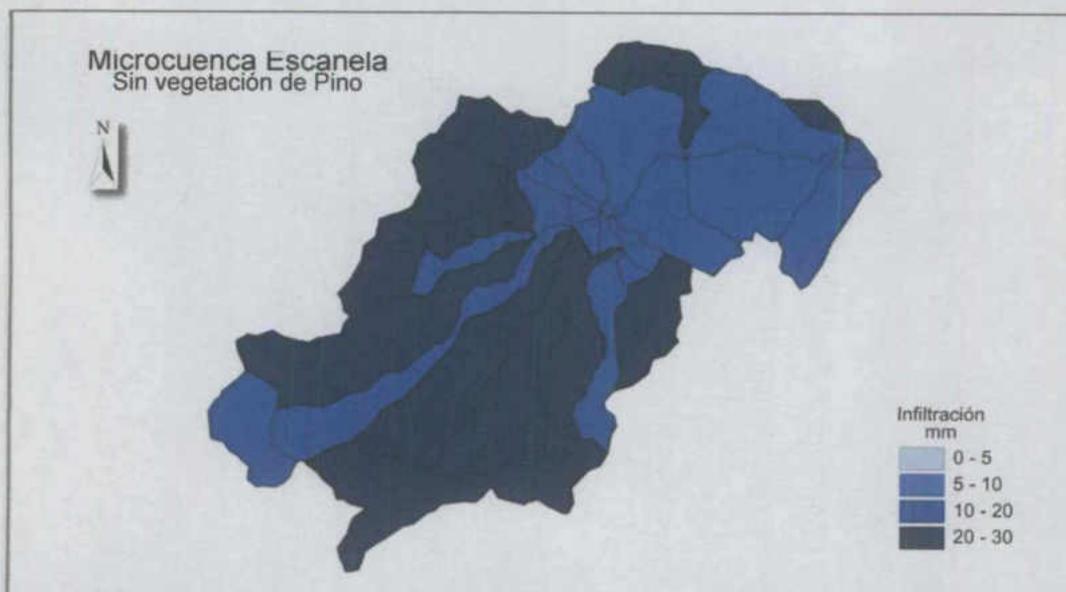


Figura 4.57. Infiltración (mm) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (sin bosque de Pino)

La producción de sedimentos (kg/ha) en la microcuenca Río Escanela estimada por el modelo KINEROS para la tormenta de diseño evaluada muestra que, para el caso de presencia de pino, los valores varían de 19 ton/ha hasta 271 ton/ha con un valor promedio de 145 ton /ha. En el caso de ausencia de vegetación los valores varían de 41 ton/ha hasta 588 ton/ha con valor promedio de 243 ton/ha

La pendiente de los terrenos tiene una influencia muy significativa ya que en promedio, por efecto de la pendiente, la erosión de esta microcuenca se aumenta en 20 veces si se compara con la erosión generada en terrenos con una pendiente del 9% y longitud de 20 m.

Observando las graficas comparativas con presencia y ausencia de pino (Figuras 4.58 y 4.59) se observa que la superficie de la cuenca con valores altos de producción de sedimentos aumenta si fuese removido el bosque, alcanzando valores superiores a 500 ton/ha en 620 ha de la microcuenca, siendo que el máximo valor actual de producción de sedimentos es de máximo de 271 ha y se presenta en tan solo 375 ha de la microcuenca.

Las unidades con menor producción de sedimentos corresponden a zonas con porciones significativas de vegetación conservada de pino en la parte alta de la cuenca.

Observando los mapas comparativos (Figuras 4.60 y 4.61) se aprecia que las unidades de escurrimiento donde aumentan significativamente los valores de producción de sedimentos en el caso de sustitución del bosque de pino son aquellas ubicadas al noreste de la microcuenca, estas unidades corresponden con la zona de mayor pendiente.

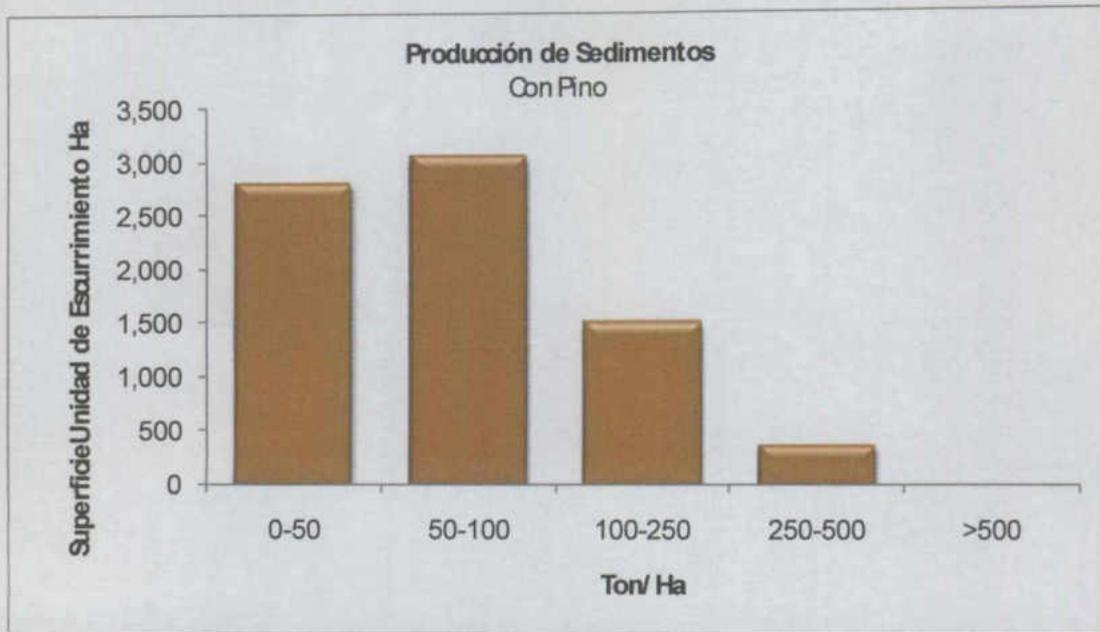


Figura 4.58. Producción de sedimentos (Ton/ha/año) y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (con bosque de Pino)

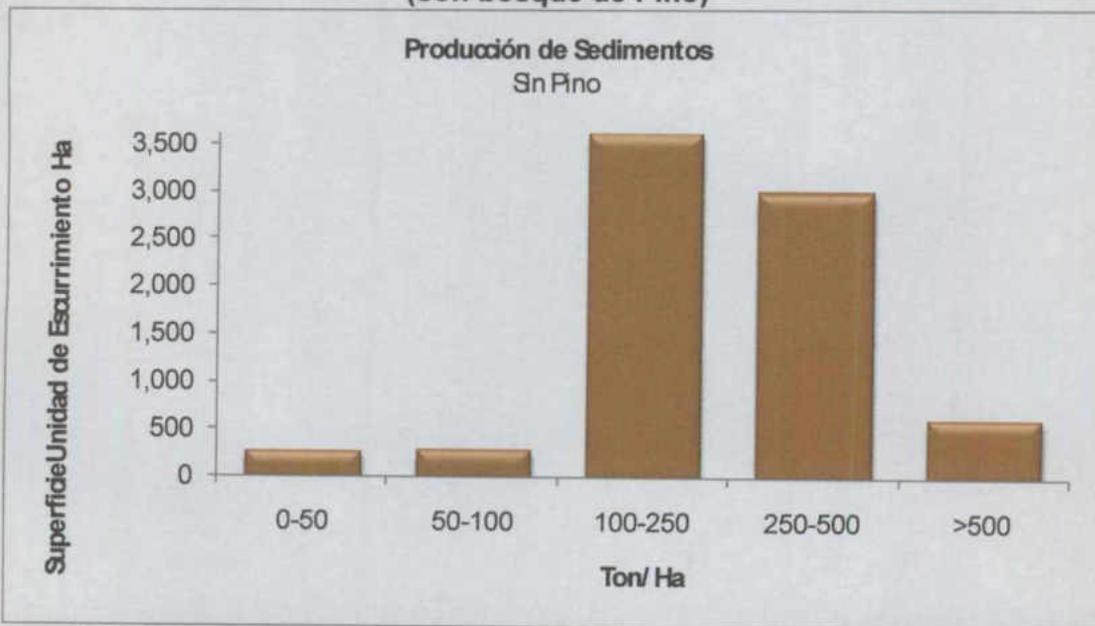


Figura 4.59. Producción de sedimentos (Ton/ha/año) y distribución de superficies en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (sin bosque de Pino)

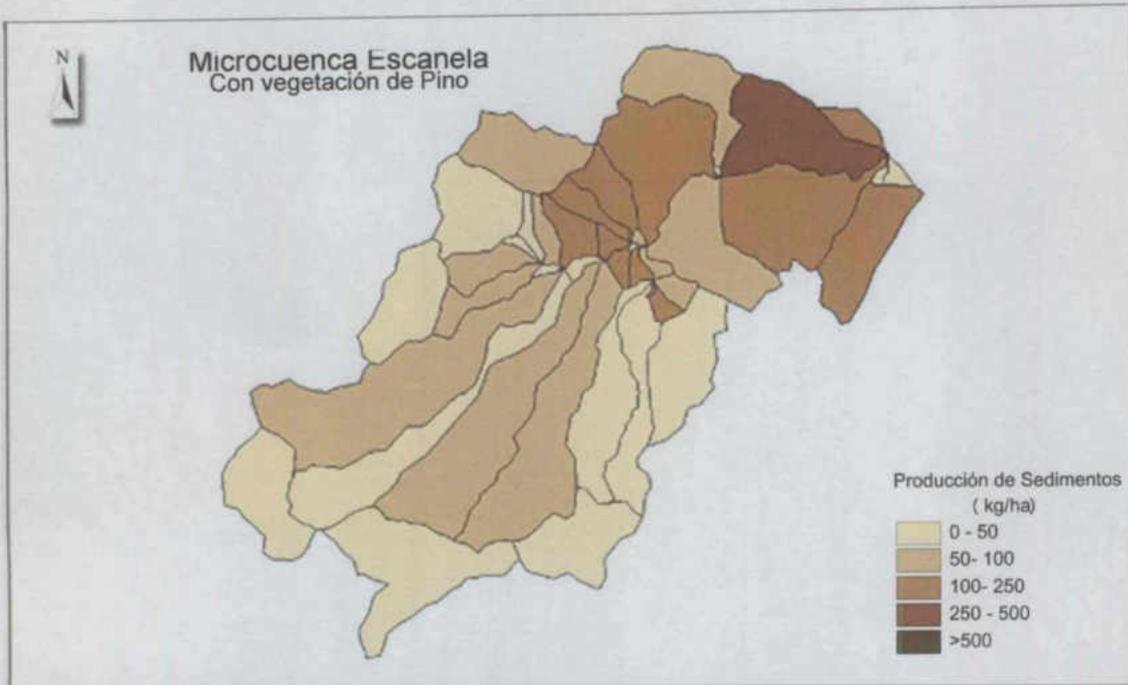


Figura 4.60. Producción de sedimentos (Ton/ha/año) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (con bosque de Pino)

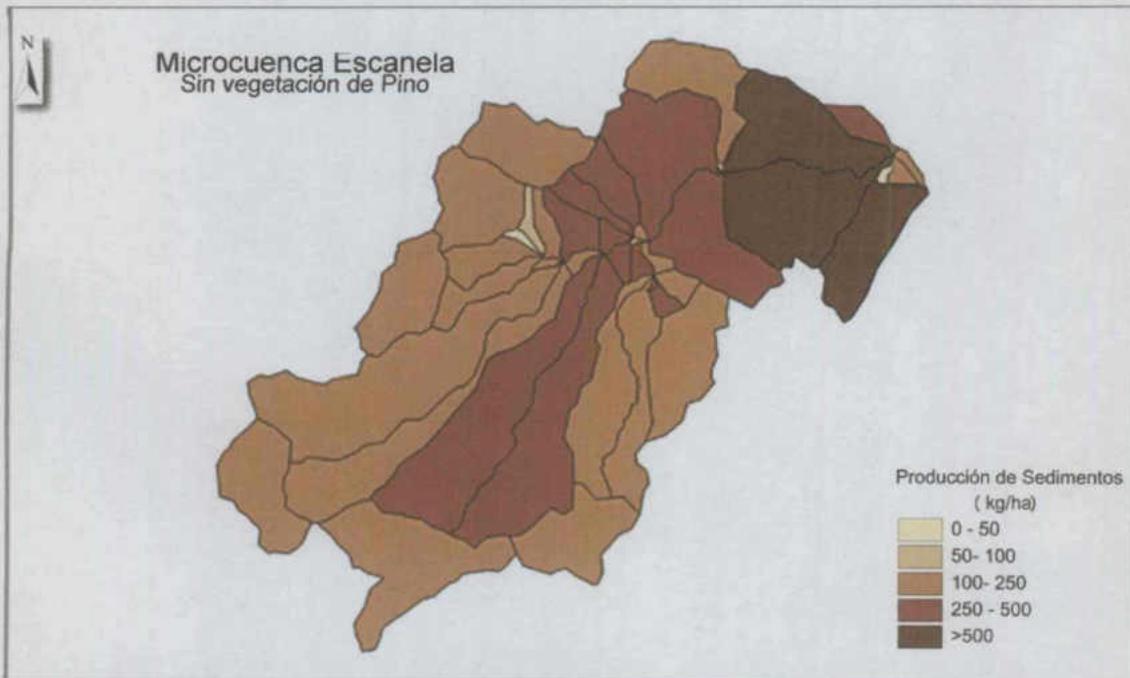


Figura 4.61. Producción de sedimentos (Ton/ha/año) en la microcuenca Río Escanela para una tormenta de diseño de 40 mm en 1.5 hr. (sin bosque de Pino)

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Mediante el análisis comparativo de la temperatura tanto dentro como fuera de bosque pudo identificarse que la vegetación crea un efecto de amortiguamiento en el aumento de la temperatura.

El bosque beneficia en la regulación de la temperatura del ambiente, haciendo que las temperaturas máximas sean de menor magnitud y que las temperaturas mínimas sean menos frías, lo que potencialmente puede afectar los procesos de evapotranspiración

El bosque proporciona, entre otros, el servicio ecosistémico de confort o frescura.

La vegetación ayuda a mantener el aire más húmedo al interior del bosque, lo que modifica el microclima y puede ayudar al crecimiento de especies que prefieren de estas condiciones.

El comportamiento de la humedad relativa está muy relacionado con la distribución de la temperatura, tendiendo a ser menor durante las horas calientes y mayor durante las horas más frías del día

La humedad relativa máxima no se mantiene por periodos de tiempo largo en sitio de Tancoyolillo (selva baja caducifolia)

Eventos con duración mayor a los 720 minutos están asociados a la presencia de huracanes, ciclones, u otras masas de aire provenientes del Golfo de México.

Los eventos de lluvia de los sitios El Pílon, Tancoyolillo y Aserradero son de intensidad baja (< 20 mm/h).

El comienzo de las lluvias mantiene relación con el periodo del día donde inicia tanto la disminución de la temperatura como con el horario donde se presentan las mínimas temperaturas en las primeras horas de la mañana.

Las intensidades medias de precipitación en el sitio del Aserradero son bajas y la energía cinética de las tormentas en este sitio se espera de baja magnitud.

El bosque de pino reduce la escorrentía superficial hasta en un 90%. Esta reducción está directamente relacionada con el efecto de la vegetación en la regulación de los procesos hidrológicos.

Una vegetación bien conservada no solo ayuda al control de la erosión y los escurrimientos, sino que cuando estos son generados la calidad del agua, en términos de sedimentos suspendidos, es mucho mejor, lo que ayudaría al mejor funcionamiento de sistemas acuáticos.

Una gran parte de la precipitación ve disminuida su energía potencial para causar erosión cuando cae sobre la vegetación con lo que puede ser reguladora de los procesos hidrológicos.

Aunque se deben de monitorear mas sitios y por mas años, esta es una contribución para el entendimiento de estos procesos en vegetaciones de la Sierra Gorda.

El destino de una porción de la intercepción no fue evaluada la que pudiera seguir las rutas de evaporación, escurrimiento fustal o goteo posterior

Es conveniente analizar el componente orgánico superior del suelo, capa que amortigua el impacto del agua que además es permeable

Mediante este estudio se obtuvieron parámetros cuantitativos de la respuesta hidrológica en distintos tipos de vegetación con cobertura y estructura diferente con los cuales puede valorarse la oferta de los servicios ambientales hidrológicos que presta el área de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda

Mediante este estudio se obtuvieron parámetros de la respuesta de erosión en suelos con presencia de pino en Sierra Gorda con lo cual se enriquecieron modelos de erosión y pudieron obtenerse resultados apegados a la realidad de la zona

Con el monitoreo meteorológico pudieron definirse las tormentas de diseño para los sitios específicos de sierra gorda logrando que los resultados sean más apegados a la realidad presente en Sierra Gorda

La herramienta AGWA permitió definir las unidades de escurrimiento prioritarias dentro de la microcuenca Río Escanela, considerando indicadores hidrológicos y de degradación de los suelos por efecto de la erosión hídrica.

La vegetación de bosque de pino resultó de gran importancia para reducir la erosión hídrica en la microcuenca y por tanto la producción de sedimentos. La producción de sedimentos fue de 80 ton/ha promedio considerando presencia de pino y de 243 ton/ha considerando su remoción

Los ecosistemas de las partes altas de la cuenca prestan servicios ambientales hidrológicos importantes tales como mejorar la calidad del agua superficial, favorecer la infiltración del agua de lluvia y disminuyen la producción de sedimento, que se ve reflejada en bajas tasas de erosión

VI. REFERENCIAS

Instituto Nacional de Ecología. 1999. "Programa de Manejo de la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda".1ª Ed. Unidad de Participación Social, Enlace y Comunicación, INE, México D.F.

Mayrand, K., Paquin, M. 2004. Pago por servicios ambientales: Estudio y evaluación de esquemas vigentes. UNISFERA, Centre International Centre, Chantal Line Carpentier, Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, Montreal Canadá

Pagiola, S. and G. Platais. 2002. Market-based Mechanisms for Conservation and Development: The Simple Logic of Payments for Environmental Services. In: Environmental Matters—Annual Review, July 2001—June 2002 (FY 2002). Washington, DC: World Bank's Environment Department

Instituto Nacional de Ecología. 2005 Manual para el Desarrollo de Programas de Pago por Servicios Ambientales Hidrológicos Locales, Dirección General de Investigación en Política y Economía Ambiental, INE, México DF

World Bank and World Wildlife Fund Alliance for Forest Conservation and Sustainable Use. 2003. Running Pure: The Importance of Forest Protected Areas to Drinking Water. Washington, DC: World Bank and WWF. pp. 20–21.

Echevarría, M. et al. 2002. Impact Assessment of Watershed Environmental Services: Emerging Lessons from Pimampiro and Cuenca in Ecuador. London: International Institute for Environment and Development (IIED)

World Wildlife Fund y Danida. 2003. *From Good-will to Payment for Environmental Services. A Survey of Financing Alternatives for Sustainable Natural Resource Management in Developing Countries*.pp. 107–9.

Tsen, W. et al. 2002. *Payments for Environmental Services in Mexico*. Berkeley, University of California at Berkeley – Goldman School of Public Policy. p. 26.

Landell-Mills, N. 2002c. *Marketing Forest Environmental Services—Who benefits?* London: Gatekeeper Series no.104, International Institute for Environmental and Development (IIED). p. 9.

Bishop, J. 2002. *Pro-poor Markets for Environmental Services: A New Source of Finance for Sustainable Development?* Presentación en la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible, Johannesburgo, 28 de agosto.

May, P. H. et al. 2002. "Using Fiscal Instruments to Encourage Conservation: Municipal Responses to the 'Ecological' Value-added Tax in Parana and Minas Gerais, Brazil," en Pagiola, S. et al. 2002. op. cit. p. 177.

Cohen, S. 2002. *Pro-poor Markets for Environmental Services: Carbon Sequestration and Watershed Protection*. Presentación en la Cumbre Mundial sobre Desarrollo Sostenible, Johannesburgo, 28 de agosto.

Ventura, E. et al 2006. *Estado del Arte para el proyecto Valoración de los Servicios Ambientales en Cuencas Forestales a través del Costo de Azolve de Presas*, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Posgrado en Ingeniería de Recursos Hídricos y Ambiental, Querétaro, Méx.

Chow, Ven Te. et al 1988. *Hidrología Aplicada*. Mc Graw-Hill, Santa Fe de Bogotá, Colombia

Mateos, B y Schnabel, S. 1997. *Medición de la interceptación de las precipitaciones por la encina (Quercus rotundifolia lam)*. Metodología e Instrumentalización Dpto de Geografía y O.T. Universidad de Extremadura, España

Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta, SAP, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile 2000. Medición del contenido de humedad del suelo, Relación Suelo-Agua-Planta, Antumapu, Chile

Griffiths, D. 1969. Runoff and Stream stability; observations on runoff pattern in the Kaimi range. *Soil and Water* 5: 11-13.

Jane, G.T. , Green , T. G. A. 1983. Biotic influences on landslide occurrence in the Kaime range. *New Zealand Journal of Geology & Geophysics* 26:381-393.

Wallis, F. P., James, I. L. 1972. Introduced animal effects and erosion phenomena in the northern Urewera forest. *New Zealand Journal Forestry* 17: 21-36.

Collen O. Doten, Laura C. Bowling, Jordan S. Lanini, Edwin P. Maurer, and Dennis P. Lettenmainer. A spatial distributed model for the dynamic prediction of sediment erosion and transport in mountainous forested watershed. *Water Resources Research*. Vol. 42, W04417.

Baptist M.J. Kerle. F. and Mosselman E. 2002. Modelling of morphodynamics, vegetation development and fish habitat in man-made secondary channels in the river Rhine, the Netherlands. 4th. International Ecohydraulic Symposium

González Sosa E., Braud I. Thony J.L. Vauclin M. Calvet. 2001. Heat and water exchanges of fallow covered with plant-residue mulch layer: a modeling study using the three years MUREX data set. *Journal of Hydrology*. Vol. 244. pp. 119-136.

Trimble, S. W. & Weirich F.H. 1987. Reforestation reduces streamflow in the Southeastern United States. *J. Soil Water Cons.* 42. 274-276.

Serrato Belmonte F., y Romero Díaz A. 2003. La cubierta vegetal en las zonas áridas y semiáridas. Consecuencias de la intercepción de la lluvia en la protección del suelo y los recursos hídricos. Dpto. de Geografía Física. Universidad de Murcia. España.

Weaver, J. y F. Clements. 1951. *Ecología Vegetal*. Ed. Diana. México, D.F. Wildland Hydrology. USA.

Cox, G.W. 1985. *Laboratory Manual for general Ecology*. Quinta edición. Dubuque, I.A: Wm. Brown.

Krebs, C.J. 1999. *Ecological Methodology*. Segunda edición. Addison-Welsey Educational Publisher. USA. 620 pp.

Davies, K. F., C. Gascon, C. R. Margules. 2001. Habitat fragmentation, *en* Soule, M. E., G. H. Orians. *Conservation biology: research priorities for the next decade*. Island Press. USA.

Thomson, S. and F. Armstrong. 1987. Calibration of the watermark model 200 soil moisture sensor. *Applied Engineering in Agriculture* 3(2):186-189

Roma Wischmeier, W.H., and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. U.S. Dep. Agric., Agric. Handb. No. 537

Bermúdez, F., Garita, D. y Rodríguez, J. 2000. El Bosque como proceso fundamental de los servicios ambientales. Universidad Nacional Autónoma, "Campus Omar Dengo", Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Escuela de Ciencias Ambientales, Costa Rica.

Kitinoja, L. y Kader, A. 1995. Manual de prácticas de manejo postcosecha de los productos hortofrutícolas a pequeña escala. Departamento de Pomología. Universidad de California. Davis, California, EEUU

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2004 Cuaderno Estadístico del municipio de Jalpan de Serra, Estado de Querétaro Arteaga, Aguascalientes, México

Bruijnzeel, L.A. 1990. Hydrology of Moist Tropical Forests and Effects of Conversion: a State of Knowledge Review. Humid Tropics Programme, IHP-UNESCO, Paris, and Vrije Universiteit, Amsterdam

Iroumé, A., Huber, A., Salazar, C., y Arriagada, A. 1998 Intercepción de lluvias por cubierta de bosques y su efecto en los caudales de crecida Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral De Chile, Chile

Hernández, A, Narváez A, Miranda R. Prado, A, 2007. Descripción de la Estructura de la Vegetación en dos Municipios del Estado de Querétaro, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ciencias Naturales, Querétaro, México

Sanjurjo, E. y Welsh, S., 2005. Una descripción del valor de los bienes y servicios ambientales prestados por los manglares. Gaceta Ecológica No. 74, INE-SEMARNAT, México.

Sanjurjo, E. e Islas, I., 2007. Las experiencias del Instituto Nacional de Ecología en la valoración económica de los ecosistemas para la toma de decisiones. Gaceta Ecológica, número especial 84-85, INE-SEMARNAT, México.

a los observados en El Pilón y Tancoyolillo, tal como se observa en la Figura 4.21, por lo que se considera que estos eventos son regionales.

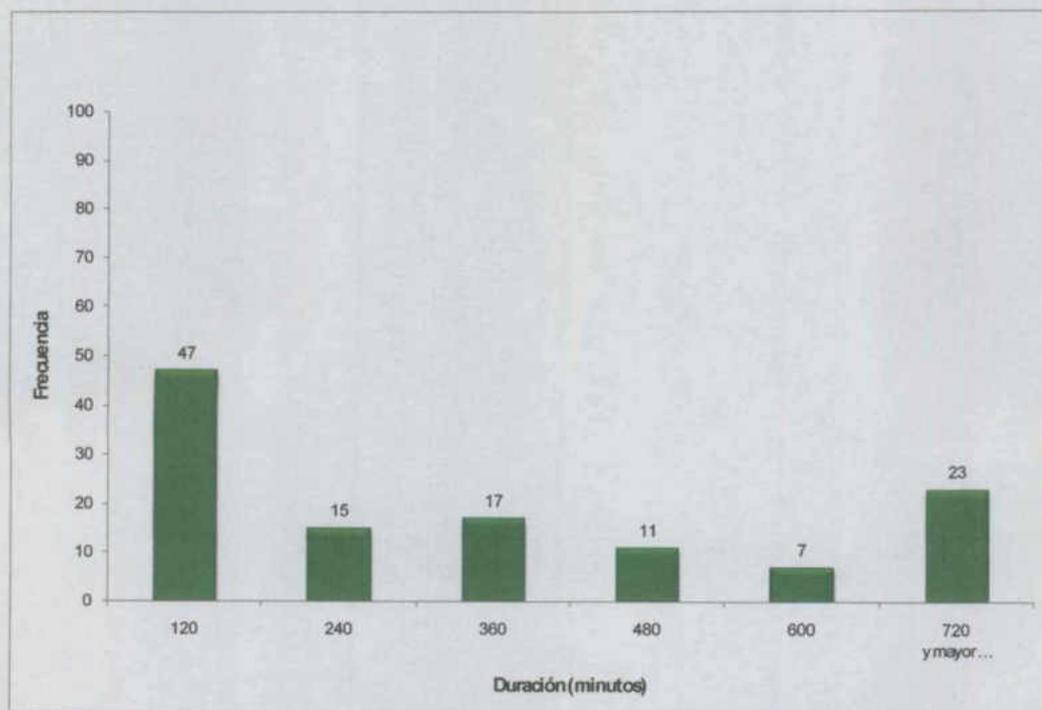


Figura 4.21. Duración de los eventos de lluvia durante el año 2006, sitio El Aserradero, Municipio de Pinal de Amoles, Qro

En este sitio, prácticamente la totalidad de los eventos tuvieron una intensidad media dentro del rango de 0 a 10 mm/h (119 de 120 eventos o el 99%), con solo uno de ellos en el rango de 10 a 20 mm/h, lo cual indica que las intensidades medias de precipitación en el sitio son bajas y la energía cinética de las tormentas en este sitio se espera de baja magnitud (Renard et. Al., 1997).

El patrón de ocurrencia de los eventos, en relación a la hora de inicio fue ligeramente diferente en este sitio que en El Pilón y Tancoyolillo. Destacan los eventos iniciados entre las 18:00 y las 0:00. En el resto de los rangos de horas los eventos se distribuyen más homogéneamente (Figura 4.22).

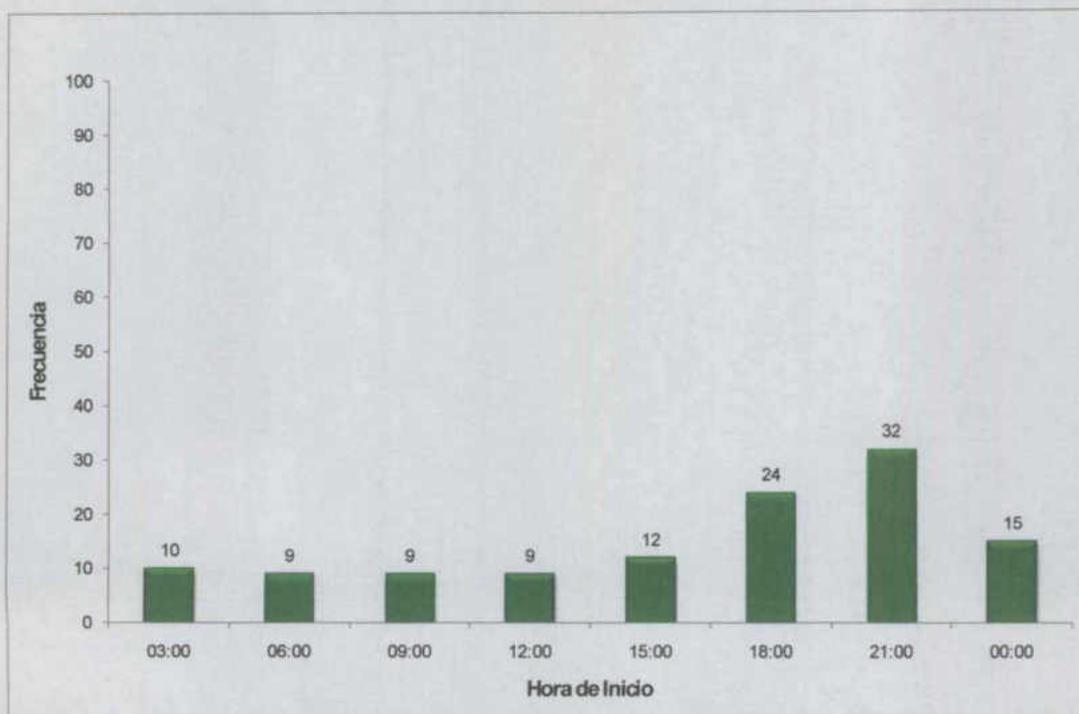


Figura 4.22. Hora de inicio de los eventos de lluvia durante el año 2006, sitio El Aserradero, Municipio de Pinal de Amoles, Qro.

4.4. Análisis del Escurrimiento, la Erosión del Suelo y la Concentración de Sedimentos.

En este apartado se analizan y discuten los resultados de la medición de la erosión en el sitio El Aserradero, municipio de Pinal de Amoles, Qro, lugar donde se estableció el modulo hidrológico de monitoreo de estas variables.

Del total de la precipitación anual registrada en el sitio (1146 mm), alrededor de 377 mm (alrededor del 33%) escurrieron en forma superficial fuera de la parcelas de evaluación sin vegetación y en remoción continua, mientras que solo 40 mm (alrededor del 3.5%) escurrió de la parcela con vegetación de pino (Figura 4.23). Considerando el escurrimiento de la condición sin vegetación como el 100%, el valor correspondiente al bosque de pino fue de solo 10%, lo que indica que en este sitio el bosque de pino reduce la escorrentía superficial hasta en un 90%. Esta reducción está directamente relacionada con el efecto de la vegetación en la regulación de los procesos hidrológicos (Bruijnzeel, L.A. 1990).

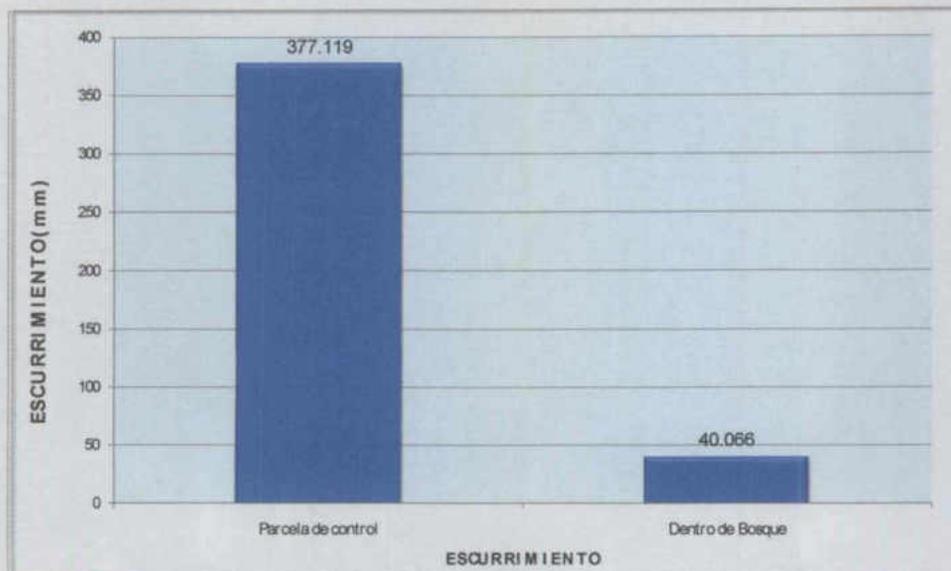


Figura 4.23. Escorrimento en mm en una parcela sin vegetación y con vegetación de Pino en el sitio Aserradero, Pinal de Amoles, Qro.

En lo que respecta a la erosión del suelo, el efecto de la vegetación en este sitio es todavía más significativo que el escorrimento. La pérdida de suelo acumulada medida en las parcelas de erosión durante el año 2006 para la condición de suelo sin vegetación fue de 88.6 Kg/m², mientras que el valor correspondiente para la parcela con vegetación de pino fue de solo alrededor de 0.3 Kg/m² (Figura 4.24), lo que lo hace prácticamente insignificante. Solo por generar un valor de referencia, si consideramos la erosión en la parcela sin vegetación y en remoción continua como el 100%, el valor correspondiente a la condición de vegetación de pino fue de 0.34%, lo que implica una reducción prácticamente del 100% de la erosión.

Siguiendo el concepto de pérdida de suelo relativa y transferido dicho concepto a un valor del factor C de cobertura vegetal para el control de la erosión (Renard et. al., 1997), el valor correspondiente al bosque de pino sería de 0.003, el cual es congruente con otros estudios y reportado para bosques de pino bien conservado.

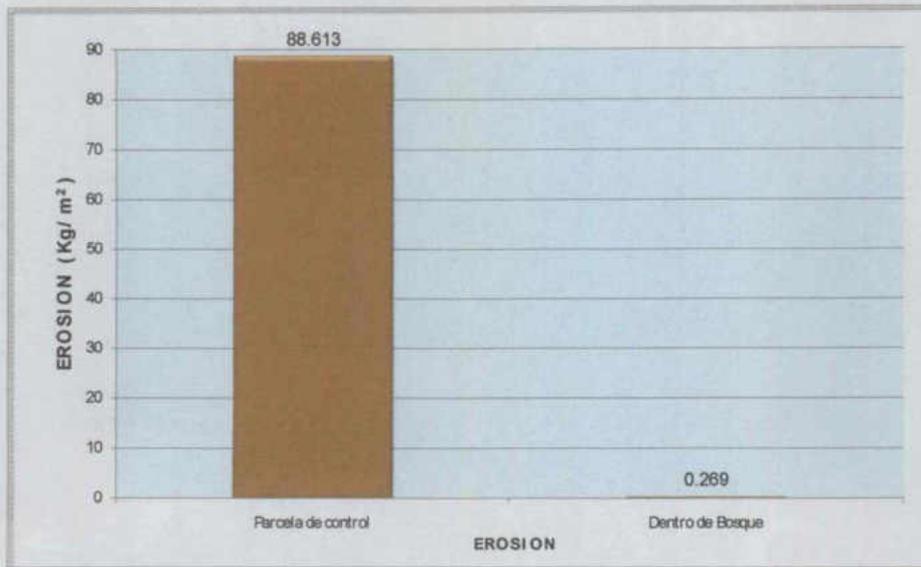


Figura 4.24. Erosión del suelo en una parcela sin vegetación y con vegetación de Pino en el sitio Aserradero, Pinal de Amoles, Qro.

El efecto en la reducción del escurrimiento y la pérdida de suelo por la vegetación de pino se ve reflejado en la concentración de sedimentos promedio en el escurrimiento, cuyo valor es de alrededor de 98.4 g/L en la parcela sin vegetación y de solo 5.4 g/L en la parcela de pino. Esto indica que una vegetación bien conservada no solo ayuda al control de la erosión y los escurrimientos, sino que cuando esto son generados la calidad del agua, en términos de sedimentos suspendidos, es mucho mejor, lo que ayudaría al mejor funcionamiento de sistemas acuáticos.

Si analizamos todos los eventos evaluados durante el 2006 en términos de escurrimiento, erosión y concentración de sedimentos, se puede llegar al mismo análisis y conclusiones mencionadas anteriormente.

En las Figuras 4.25 (a, b, y c), se presentan los resultados obtenidos para el escurrimiento (mm), pérdida de suelo (Kg/m^2), y concentración de sedimentos (g/L), respectivamente, para todos los eventos registrados durante el 2006. La magnitud de las barras en todos los casos de las variables estudiadas es mucho menor para el caso de la condición con vegetación en comparación con la condición de suelo desprovisto de vegetación y en remoción continua. Por un lado, esto comprueba, con datos locales, la importancia de la vegetación en el control del escurrimiento superficial y la erosión y en el mejoramiento de la calidad del

agua. A su vez, genera datos importantes para la valoración de los servicios ambientales hidrológicos que los bosques de pino potencialmente pueden ofertar.

El efecto de la vegetación en el escurrimiento y la erosión ha sido ya estudiado ampliamente, pero no se habían generado valores específicamente para sitios en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda. Aunque se deben de monitorear mas sitios y por mas años, esta es una contribución importante para el entendimiento de estos procesos en vegetaciones de la Sierra Gorda.

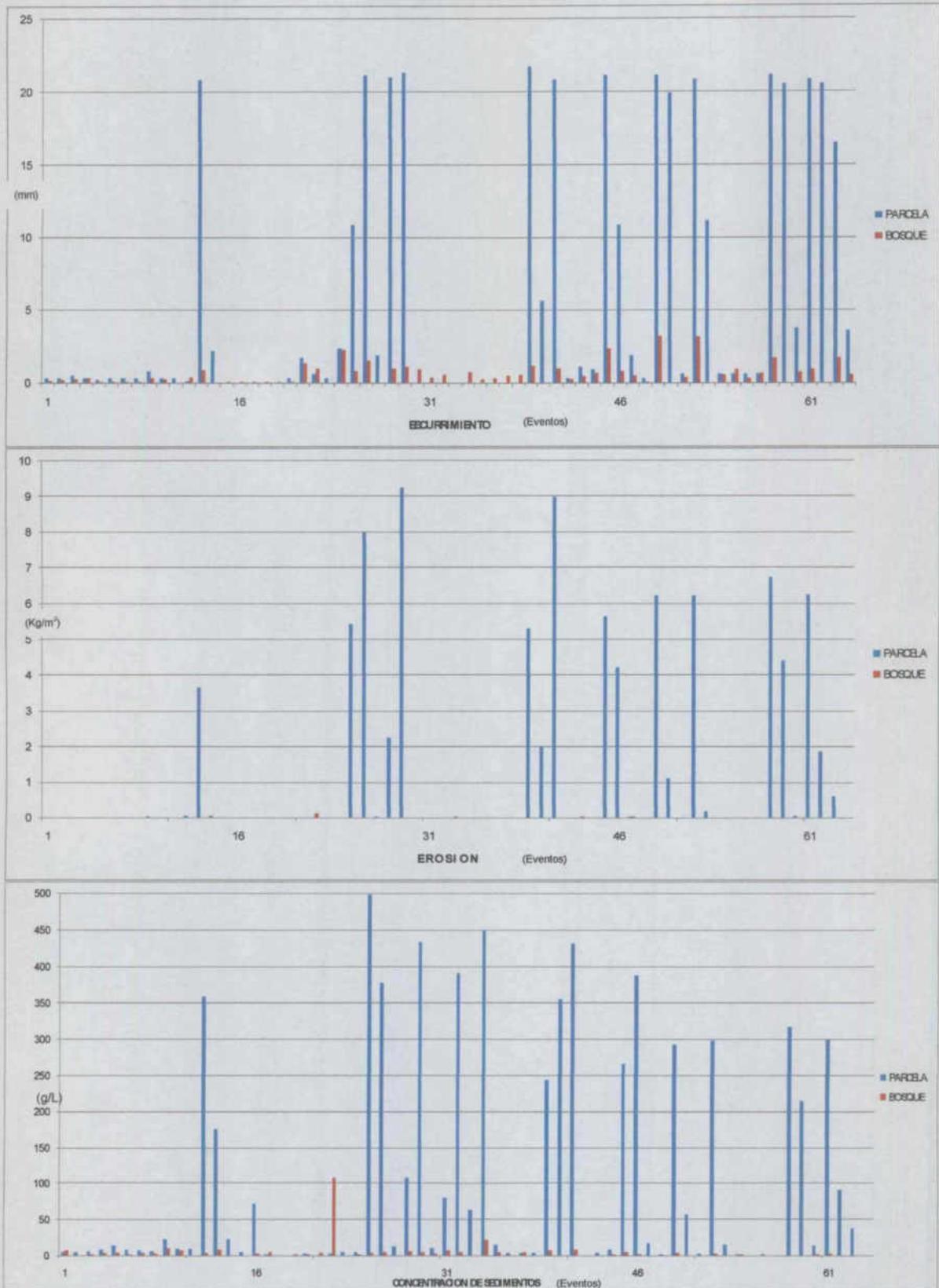


Figura 4.25 a, b y c. Escorrimento, erosión y concentración de sedimentos para una condición sin vegetación y con vegetación de pino en Pinal de Amoles, Qro.

4.5. Intercepción de la Precipitación y Estado del Agua en el Suelo

Parte de la precipitación antes de que llegue al suelo es interceptada por la vegetación (Iroumé, A. et al. 1998). En el caso del bosque de pino en el sitio Aserradero, el valor determinado utilizando el método de las canaletas varió entre 10 y 30 por ciento, con un promedio de alrededor del 20% para los eventos registrados, tal como se observa en la gráfica de caja y ejes de la Figura 4.26. El destino de esta porción no fue evaluada, ya que puede seguir las rutas de evaporación, escurrimiento fustal o goteo posterior (Iroumé, A. et al. 1998). Los valores sin embargo, indican que una gran parte de la precipitación ve disminuida su energía potencial para causar erosión y que la vegetación puede ser reguladora de los procesos hidrológicos.

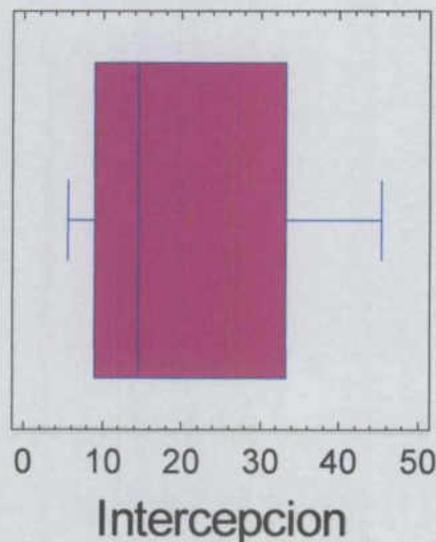


Figura 4.26. Gráfica de caja y ejes para los valores de intercepción de un árbol de pino en Pinal de Amoles, Qro.

Una mayor intercepción, una regulación de los mecanismos de flujo del agua de lluvia, y una reducción del escurrimiento van a modificar el estado del agua en el suelo (referencia). La tensión del agua en el suelo (indicador del contenido de humedad) fue en general menor en la parcela con vegetación de pino que en la parcela control sin vegetación (Figura 4.27). Un valor menor de tensión del agua se asocia a un mayor contenido de humedad. Las diferencias

más notables en el contenido de humedad se observaron en los meses más secos, y en especial en Julio, un mes de escasa precipitación en este año de registro. Este dato es importante porque indica que el bosque de pino, como resultado de la regulación de los procesos hidrológicos de escurrimiento y evaporación, mantiene un contenido de humedad mayor en el suelo con los beneficios que esto implica para la vegetación arbustiva y herbácea.

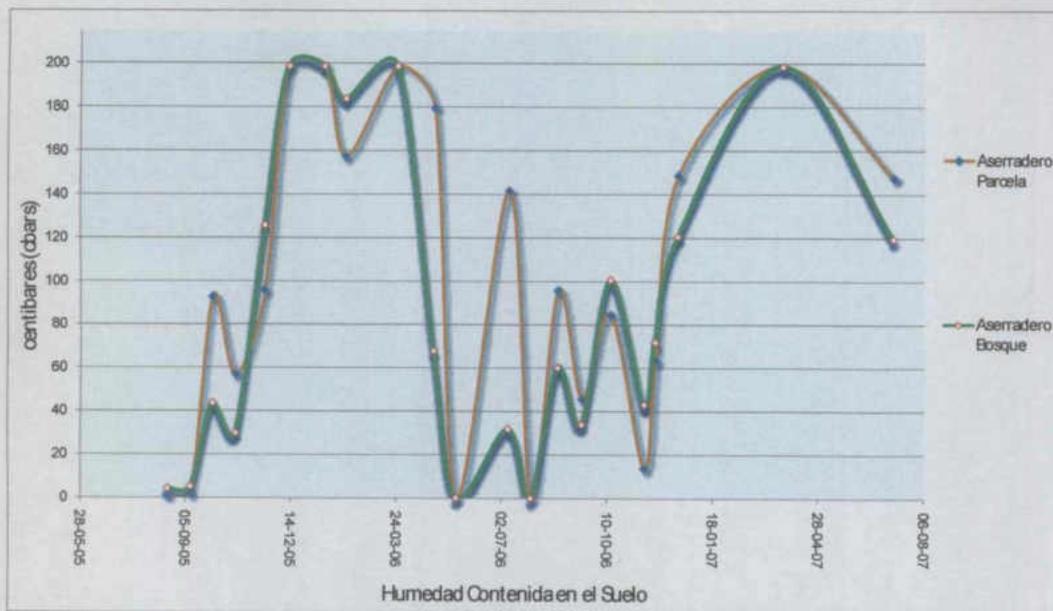


Figura 4.27. Variación de la tensión del agua en el suelo bajo vegetación de pino y en una parcela sin vegetación en Pinal de Amoles, Qro.

4.6. Caracterización de la Vegetación

En este apartado se analizan y discuten los resultados de los transectos realizados en diferentes tipos de vegetaciones presentes en los sitios del Aserradero y Tancoyolillo.

4.6.1. Transectos de vegetación en el sitio del Aserradero

En el Transecto 1 de Bosque de Pino-Encino se encontraron en total 27 individuos pertenecientes a 6 especies. El género con mayor cobertura fue Pinus con 163.4 m² seguido por Quercus con 118.9 m², la sumatoria de las coberturas de las seis especie fue de 427.2 m² lo que indica que el pino mantiene una cobertura relativa de 38.2%, Hidrológicamente este porcentaje resulta coincidente con los registros del monitoreo de intercepción realizado por el método de las canaletas que varió entre 10 y 30 por ciento, con un promedio de alrededor del 20% para los eventos registrados (Figura 4.28.). Se concluye que el pino es la especie de relevancia hidrológica dada su amplitud de área de cobertura de intercepción (Figura 4.29.)

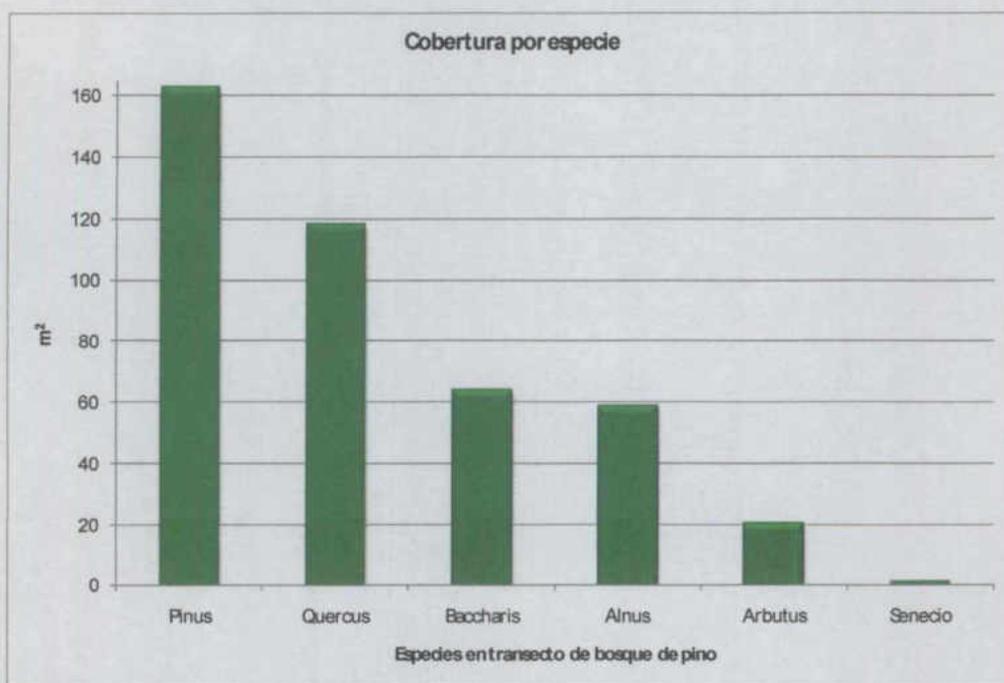


Figura 4.28. Cobertura por especie en el transecto 1 de bosque de pino en el Aserradero, Pinal de Amoles, Qro.

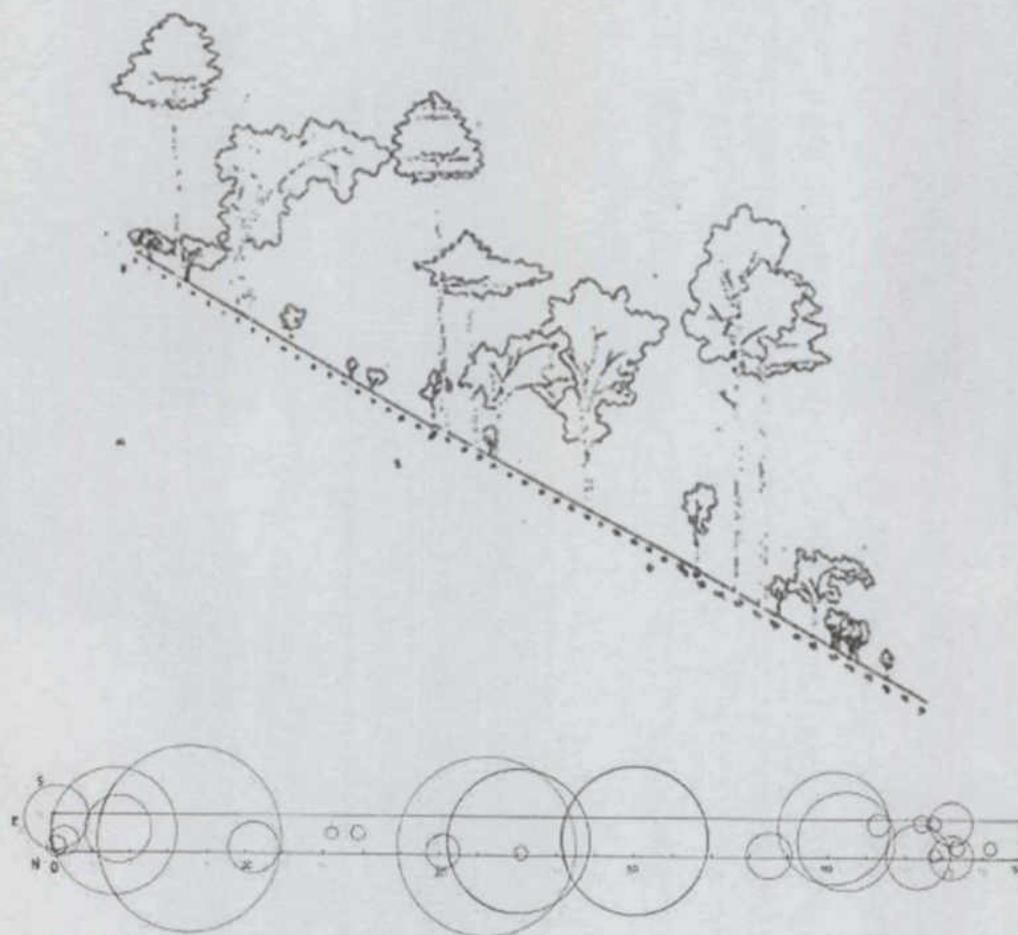


Figura 4.29 Dibujo esquematizado de la estructura horizontal (cobertura) y vertical (estratificación) transecto 1 Bosque de Pino en el sitio El Aserradero, Mpio Pinal de Amoles, Qro (Narvaez, A., 2007)

En el Transecto 2 de *Bosque de Pino-Encino* se encontraron 16 individuos en total pertenecientes a 5 géneros. De igual manera el Pino fue la especie con mayor área de cobertura con 100.9 m^2 seguida por Agnus con 47.5 m^2 , resalta en este transecto la ausencia de encinos quizás debida a la intervención humana (Figura 4.30.).

En este transecto la vegetación fue más rala (Fig. 4.31) por lo que podría esperarse que la interceptación sea menor, para este caso donde existen claros más abiertos la vegetación de pino juega un papel hidrológicamente relevante dado que su cobertura resalta sobre las especies acompañantes lo que se traduce en una regulación de los mecanismos de flujo del agua de lluvia que veremos aplicados en el estudio de caso del presente trabajo

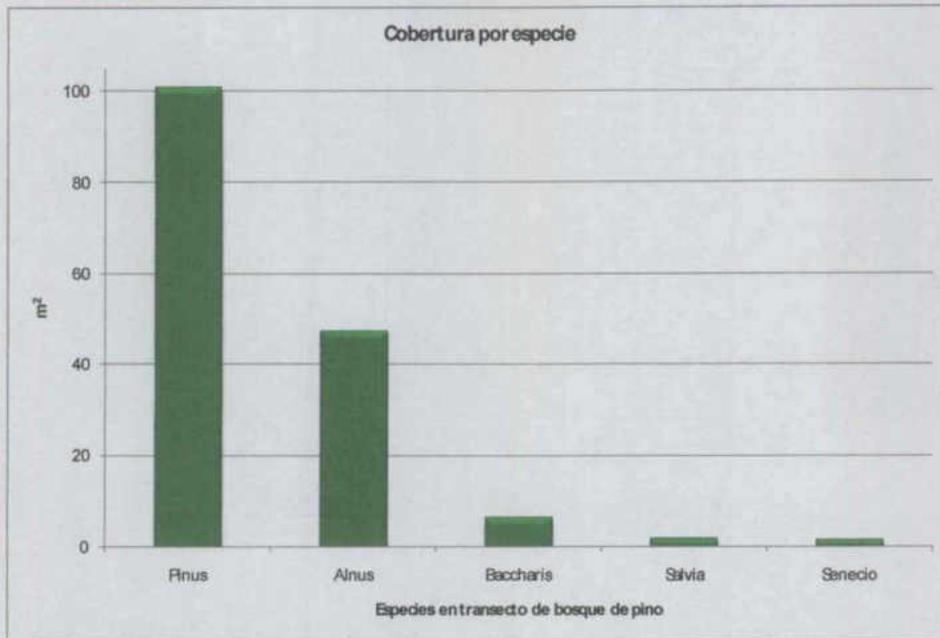


Figura 4.30. Cobertura por especie en el transecto 2 de bosque de pino en el Aserradero, Pinal de Amoles, Qro.

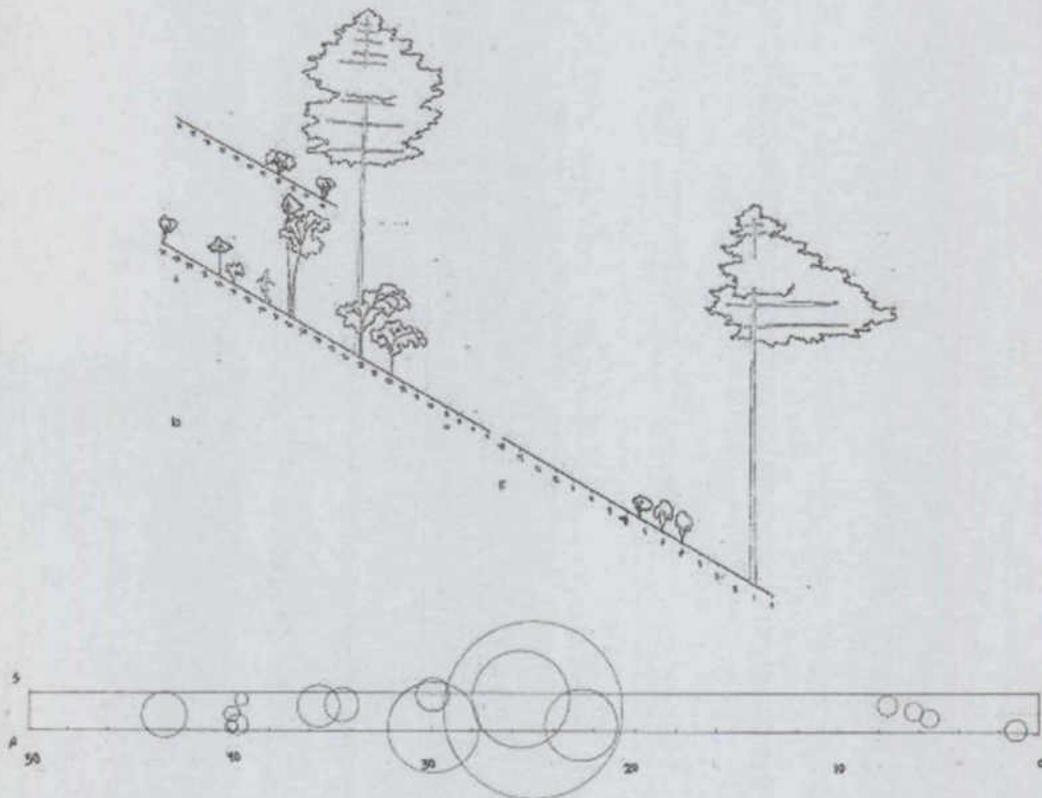


Figura 4.31 Dibujo esquematizado de la estructura horizontal (cobertura) y vertical (estratificación) transecto 2 Bosque de Pino en el sitio El Aserradero, Mpio. Pinal de Amoles, Qro (Narvaez, A., 2007)

4.6.2. Transecto de vegetación en el sitio de Tancoyolillo

En el Transecto 3 de *Selva Baja Caducifolia* se encontraron en total 142 individuos pertenecientes a 23 taxa (Figura 4.32). El género con mayor cobertura fue *Lysiloma* con 205.3 m² seguido por *Bursera* con 191.2m²

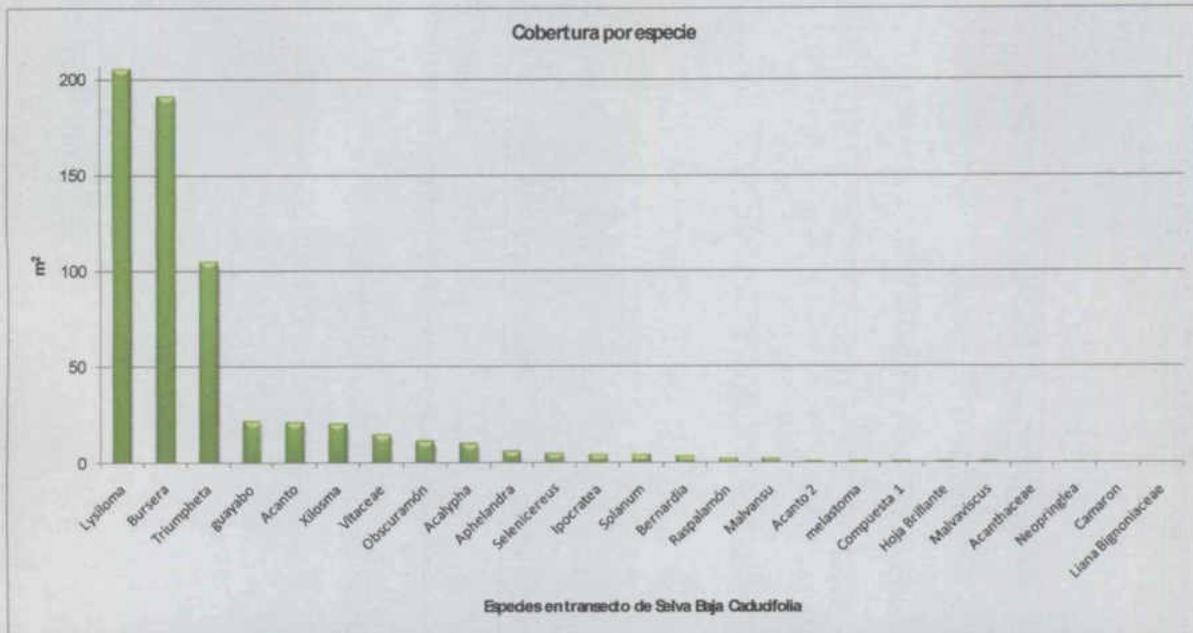


Figura 4.32. Cobertura por especie en el transecto 3 de bosque tropical caducifolio en Tancoyolillo, Jalpan, Qro.

En este transecto hay una mayor cobertura vegetal que se traduce en una mayor intercepción del agua de lluvia principalmente en el periodo de fuste, (Figura 4.33.)(Hernández, A.)

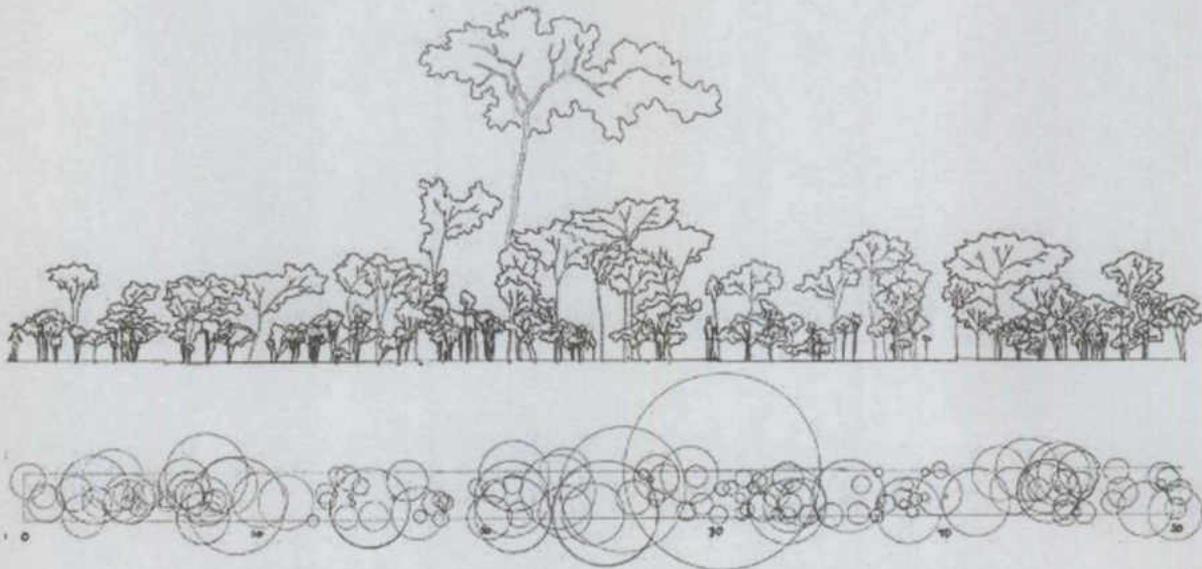
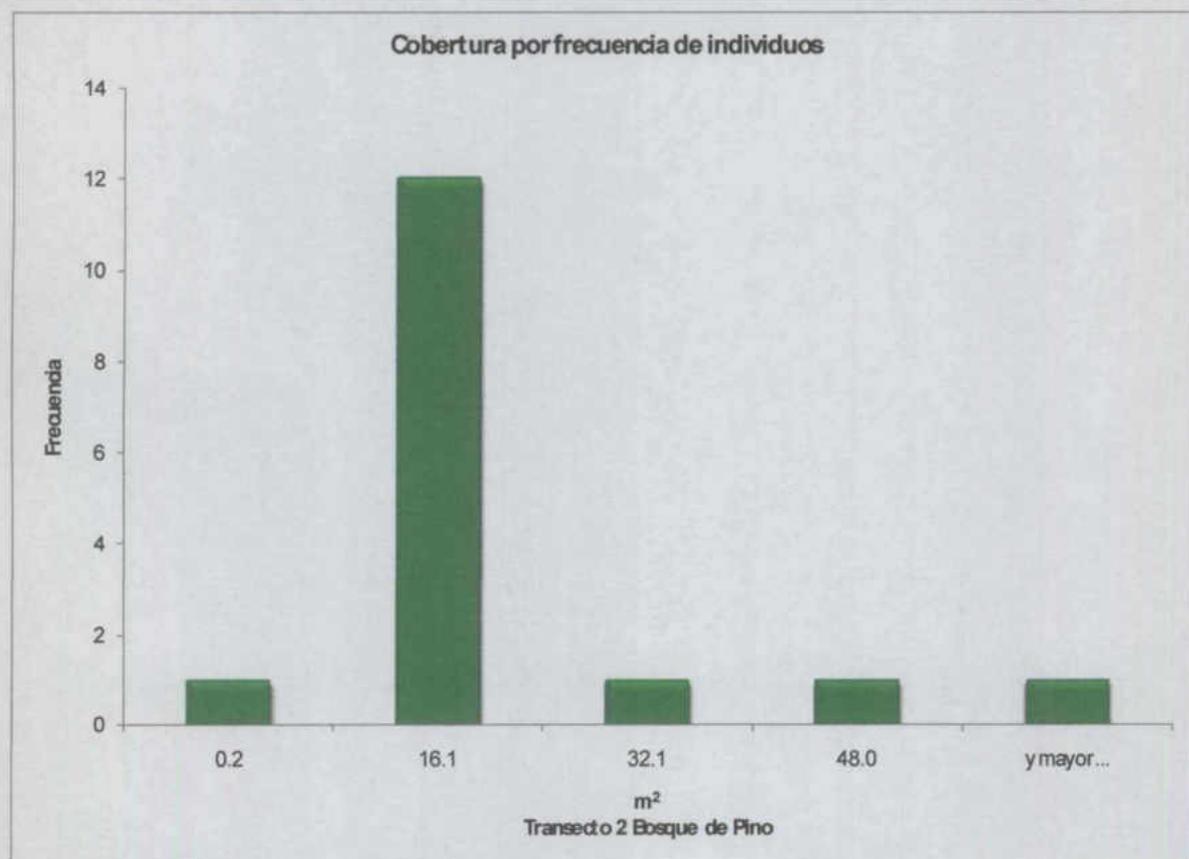
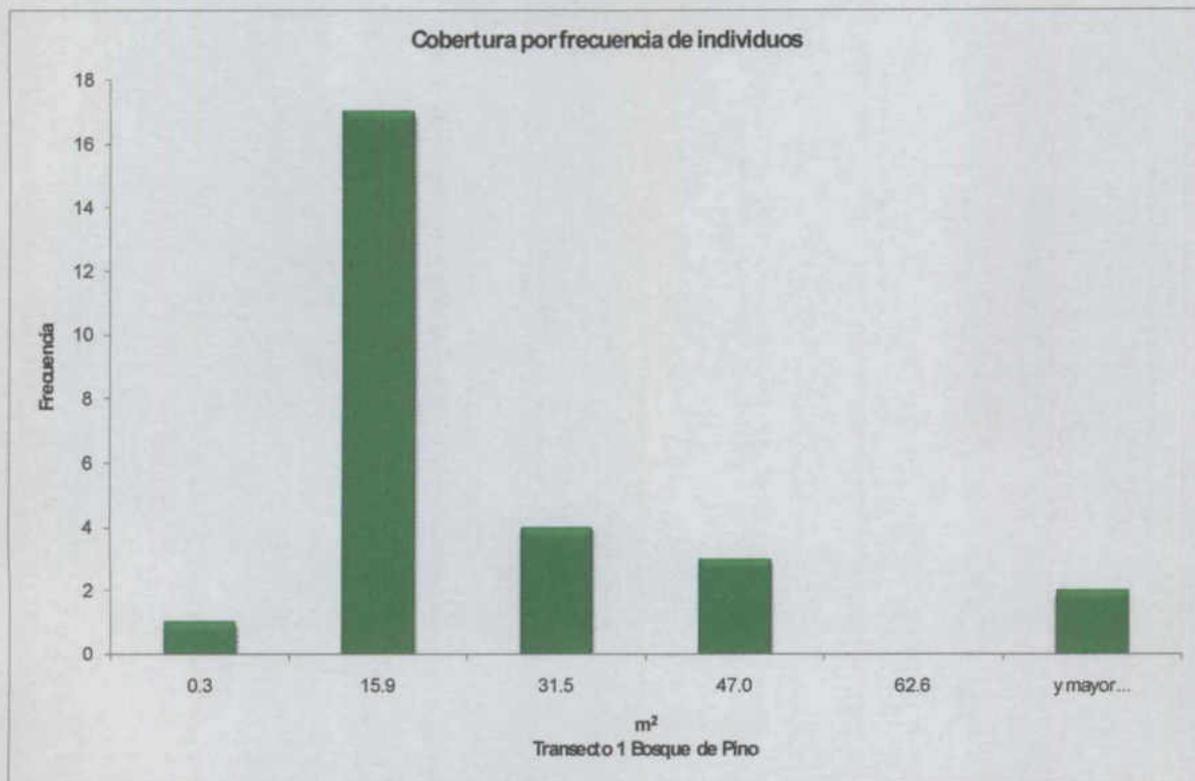


Figura 4.33 Dibujo esquematizado de la estructura horizontal (cobertura) y vertical (estratificación) transecto 3 selva baja caducifolia en el sitio Tancoyolillo, Mpio. Jalpan de Serra, Qro (Narvaez, A., 2007)

En los tres transectos resalta que la mayor cantidad de individuos presentan alrededor de 16m^2 de cobertura, coincidente nuevamente con el valor de intercepción determinado utilizando el método de las canaletas que varió entre 10 y 30 por ciento, con un promedio de alrededor del 20% para los eventos registrados (Figura 4.34 a b c)



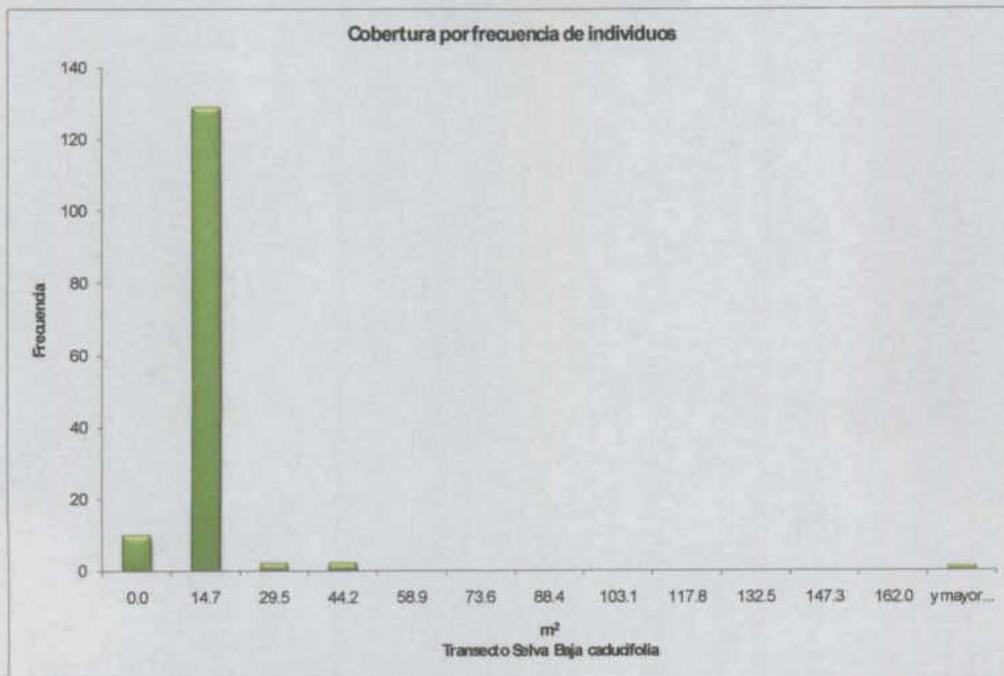


Figura 4.34 a b c Cobertura por frecuencia de individuos para los tres transectos en bosque de pino-encino y selva baja caducifolia

4.7. ESTUDIO DE CASO: Aplicación de los modelos RUSLE y AGWA en la Microcuenca Río Escanela.

Como una manera de mostrar la aplicación de los resultados obtenidos por el análisis meteorológico y monitoreo de erosión de suelo descrito anteriormente, se utilizaron dichos parámetros con los modelos RUSLE y AGWA en una microcuenca con presencia de bosque de pino.

4.7.1. Descripción de la microcuenca Escanela

Para el territorio del Estado de Querétaro Arteaga fueron definidas una serie de 224 microcuencas de las cuales 76 de ellas se encuentran localizadas en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda; la microcuenca nombrada Río Escanela, donde se aplicaron los resultados del análisis meteorológico y monitoreo de erosión de suelo, está resaltada en rojo.

Se estima que la superficie de Bosque de pino presente dentro del área comprendida por la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda de Querétaro es de 45,102.2 Hectáreas, (Figura 4.35) que están contenidas en proporciones variables de superficie dentro de 33 microcuencas dentro de la Reserva.



Figura 4.35 Distribución del Bosque de Pino en la Reserva de la Biosfera Sierra Gorda

La microcuenca Río Escanela se localiza geográficamente entre las coordenadas UTM 426000 y 442000 E y las coordenadas 2334000 y 2346000 N. La superficie de esta microcuenca es de 7,361.3 hectáreas, es de forma ovalada, con elevaciones que varían desde los 1100 msnmm en las zonas más bajas localizadas al noreste de la microcuenca, hasta elevaciones de 3100 msnmm ubicadas en la parte suroeste, de la misma. La microcuenca presenta pronunciadas pendientes al suroeste coincidentes con las máximas altitudes, mientras que al centro y hacia la zona más baja, las pendientes son moderadas.

El uso de suelo de la microcuenca Río Escanela se encuentra distribuido de la siguiente manera: Bosque de Pino (45.6%), Agricultura de Temporal (41.1%), Bosque de Pino perturbado (9.2%), Bosque Tropical Caducifolio (1.9%), Bosque de Encino (0.6%), Chaparral (0.3%), Pastizal Inducido (0.5%) y Zona Urbana (0.8%) de la superficie total de la microcuenca.

La superficie ocupada por el Bosque de Pino es de 4,039 Hectáreas. En la Figura 4.36 se representa la distribución del Bosque de Pino dentro de la microcuenca.



Figura 4.36 Distribución del Bosque de Pino dentro de la Microcuenca Río Escanela

En relación se los tipos de suelo, la microcuenca Río Escanela se caracteriza por tener el 81.3% de su superficie con una asociación de suelos del tipo Luvisol crómico, Luvisol órtico y Litosol, de textura fina (Lc+Lo+l/3). El 16.5 % son suelos del tipo Regosol eutrico asociado a suelos del tipo Fluvisol eutrico de textura fina (Re+Je/3); El 2.2% restante son suelos del tipo Rendzina asociado a Luvisol ortico y Cambisol cromico de textura media (E+Lo+Bc/2). La distribución de los mismos se observa en la Figura 4.37

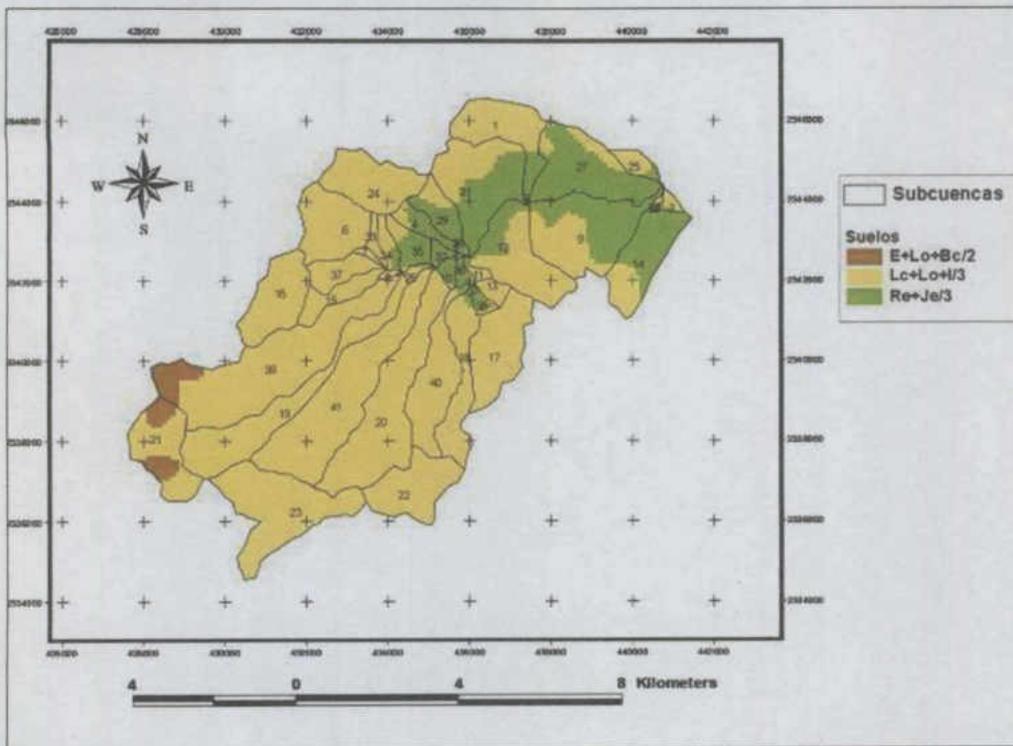


Figura 4.37. Distribución de los tipos de suelo de la microcuenca Río Escanela.

4.7.2. RESULTADOS

Los resultados de la aplicación de los modelos RUSLE y KINEROS en la microcuenca Río Escanela se presentan de manera comparativa.

Para el caso de RUSLE se aplicó el modelo utilizando el valor del factor C para el bosque de pino en Sierra Gorda que se obtuvo del monitoreo del presente estudio. En forma comparativa, se corrió el modelo con el valor del factor C reportado en tablas por la literatura, los resultados respectivo se muestran en las Figuras 4.38. y 4.39.

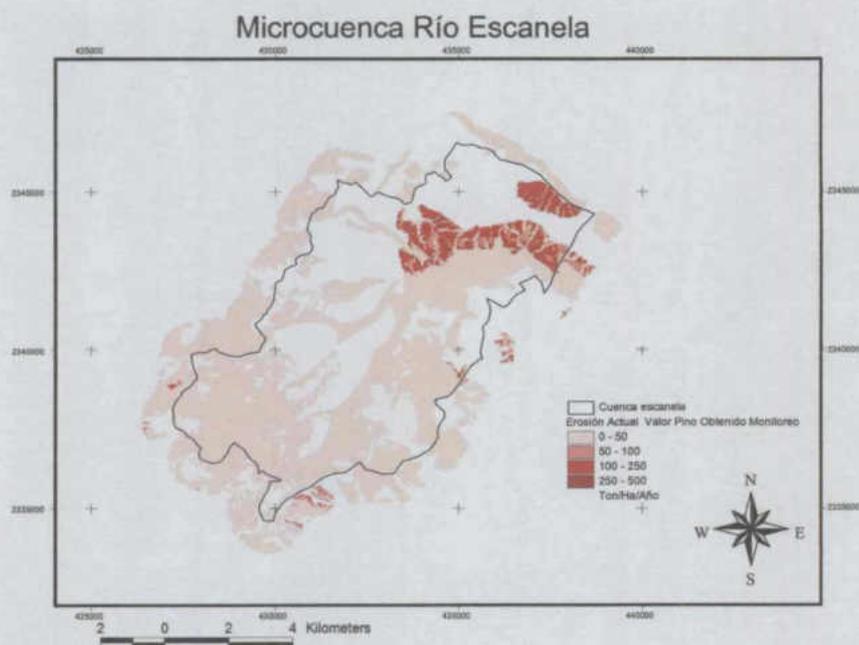


Figura 4.38 Erosión Actual de la Microcuenca utilizando el valor del Factor C que se obtuvo por el monitoreo

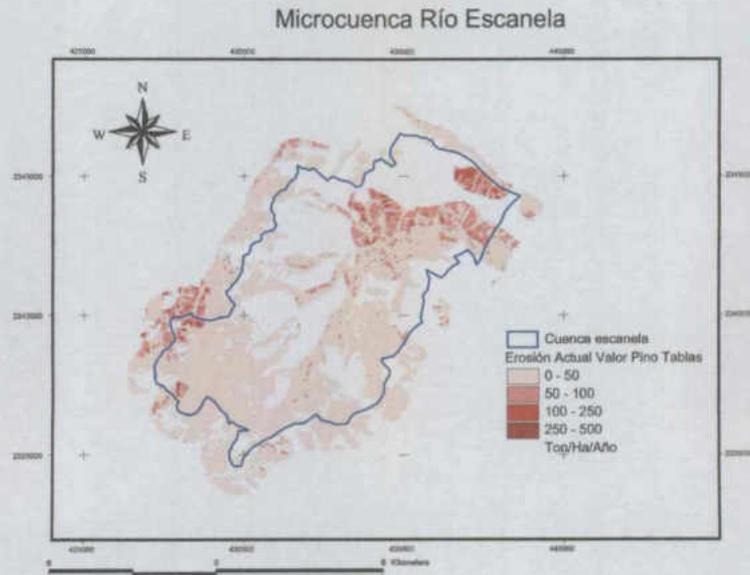


Figura 4.39 Erosión Actual de la Microcuenca utilizando el valor del Factor C reportado en Tablas

El porcentaje de área en la microcuenca cubierta de pino con un rango de erosión actual calculada de 100 a 250 ton/ha/año utilizando el valor del factor C para bosque de pino obtenido en este estudio fue de aproximadamente 9.2%. Por otro lado, aplicando el valor de C reportado en tablas, el porcentaje correspondiente disminuyó a aproximadamente 1.8% de la superficie de la microcuenca con bosque de pino. Para el rango de 100-250 ton/ha/año la superficie con pino en la microcuenca fue de aproximadamente 3.8% cuando se uso el valor del factor C medido, mientras que este porcentaje fue de aproximadamente 13.3% cuando se uso el valor de C de tablas de la literatura. En lo que respecta al rango de 50-100 ton/ha/año, la superficie de pino con estas tasas de erosión fue de aproximadamente el 87% del área con pino cuando se uso el valor de C obtenido en campo, mientras que el porcentaje respectivo para el valor de C de tablas fue de aproximadamente 85%.

En general, en ambos casos la superficie ocupada por el bosque de pino en los rangos de erosión actual establecidos presenta valores similares (Figuras 4.40 y 4.41) , solo con una reducción, para el caso del C de tablas, en el rango

más alto que se compensa en el siguiente descendente, como resultado de un valor menor del factor C en este caso.

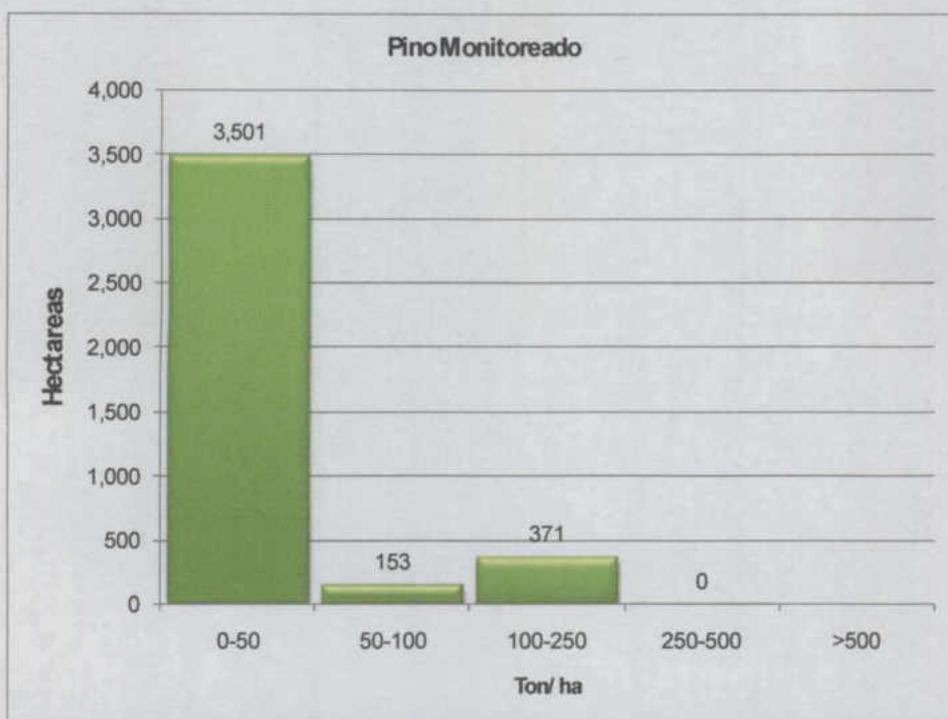


Figura 4.40. Erosión Actual utilizando modelo RUSLE con datos obtenidos por el monitoreo de erosión

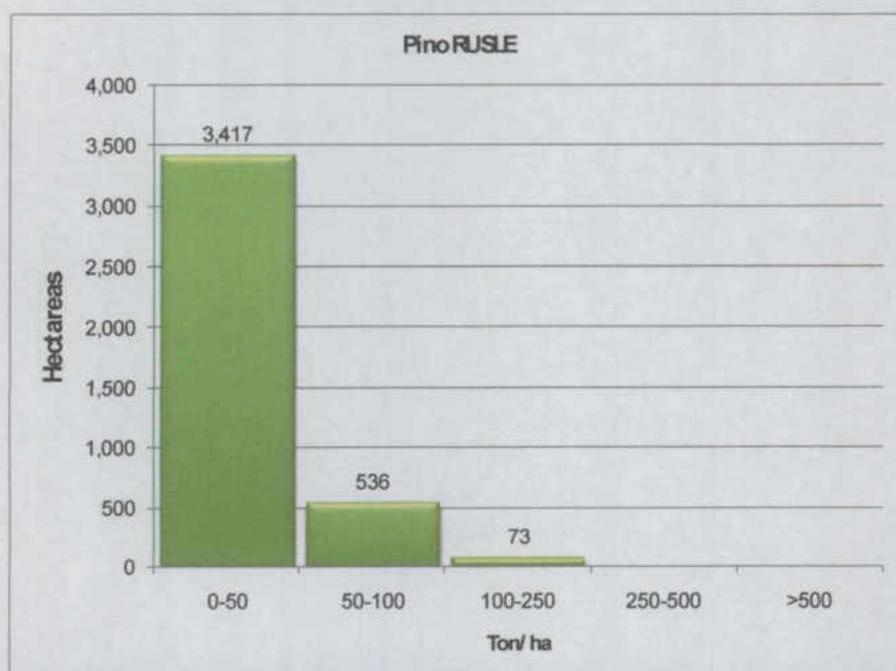


Figura 4.41. Erosión Actual utilizando RUSLE con datos de las tablas establecidas para el modelo

En un afán de mostrar la importancia de la vegetación de pino en el control de la erosión, se presenta el escenario hipotético donde dicha cubierta se elimina completamente dejando una superficie desprovista de vegetación. Como resultado se observa un aumento considerable de la superficie de la cuenca con tasa de erosión mayor a 500 ton/ha/año, lo que indica que potencialmente, los problemas de erosión en la microcuenca serian severos (Figura 4.42.). Por otro lado, esto es también un indicador de la importancia de la vegetación de pino conservada como controlador de los procesos erosivos. (Figura 4.43.)

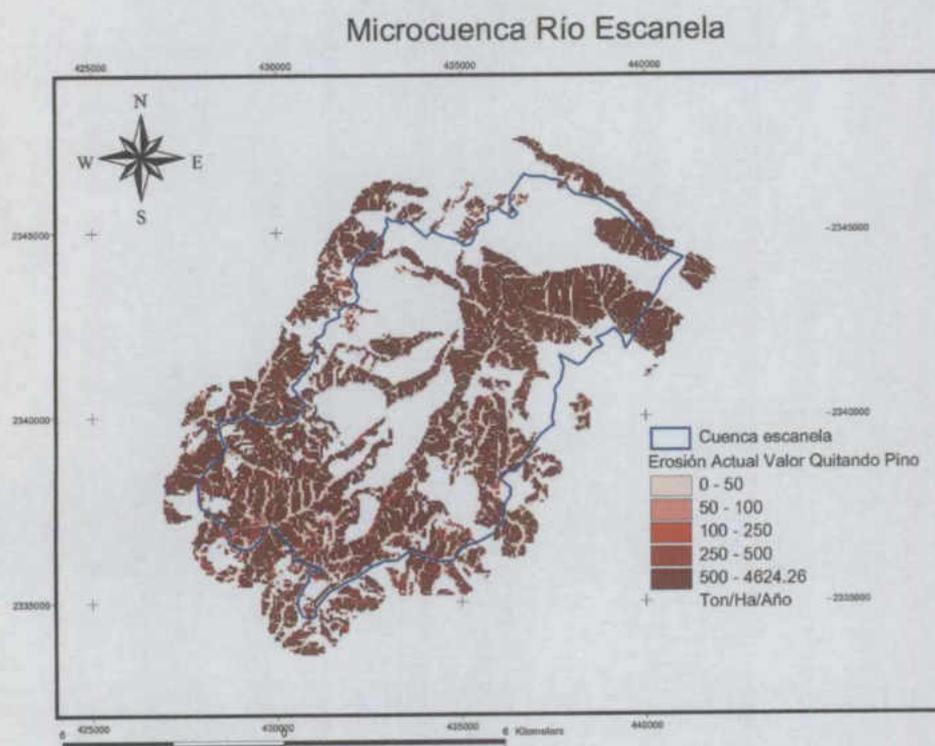


Figura 4.42. Escenario Hipotético de la erosión en la microcuenca en el supuesto de remover en su totalidad la cubierta de Pino

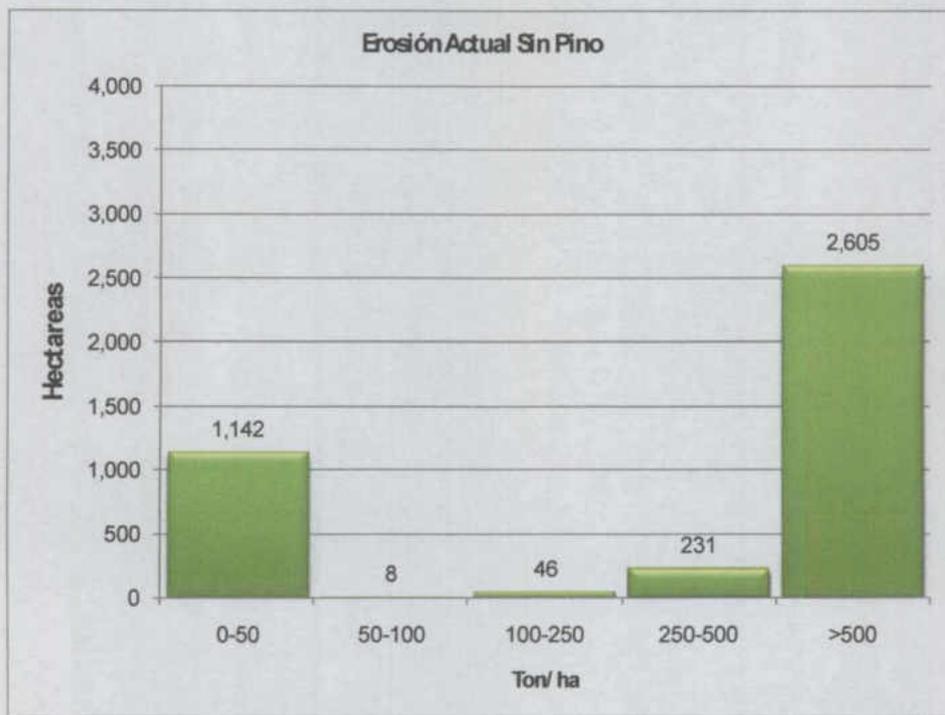


Figura 4.43. Erosión Actual considerando la remoción de la vegetación de bosque de pino

Considerando los resultados del monitoreo hidrológico en el Bosque de Pino, donde el coeficiente de escurrimiento medido fue de 33% para la superficie sin vegetación y de 3.5% para la superficie con bosque de pino, se calculó el volumen de escurrimiento bajo las dos condiciones mencionadas anteriormente a nivel microcuenca. Con la presencia de bosque de pino, el volumen potencial de escorrentía de toda el área cubierta con esta vegetación sería de 1,619,333.4 m³, mientras que este valor aumentaría a 15,221,734.2 m³, en caso de que la vegetación fuera removida el terreno quedara completamente desnudo. Es decir, el volumen aumentaría 10.6 veces más, con los consecuentes problemas de erosión y sedimentación en la cuenca. Dicho de otro modo, el bosque de pino conservado es capaz de reducir la escorrentía superficial hasta en un 90% (Figura 4.44).

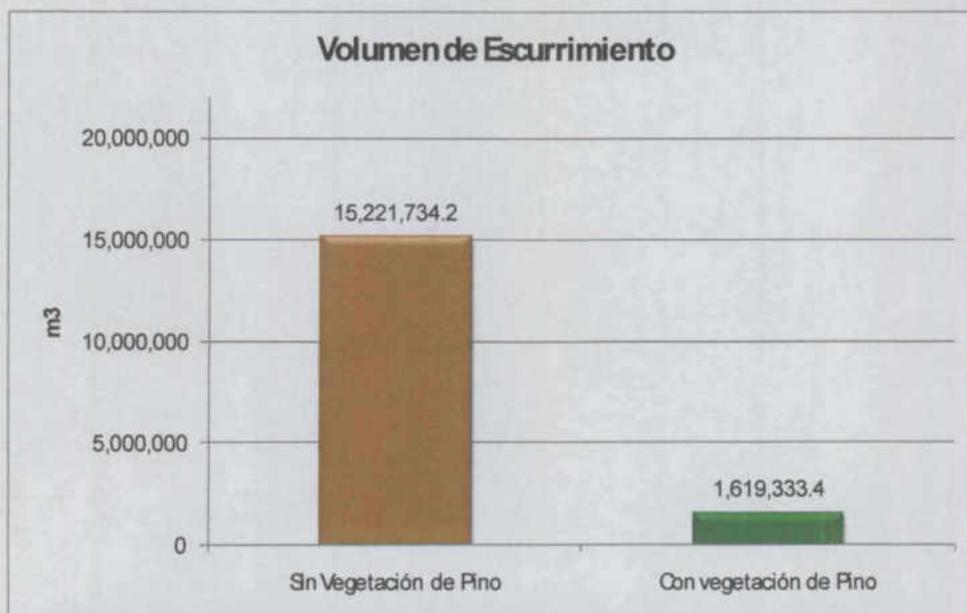


Figura 4.44. Volumen de Esguerrimiento en la microcuena Río Escanela

La vegetación juega un papel importante en la intercepción del agua de lluvia. El volumen de intercepción del bosque de pino en la microcuena de estudio se estimó en 9,253,333.8 m³ el cual representa un valor promedio de alrededor del 20% de la lluvia precipitada. Como se mencionó anteriormente, el destino de esta porción no fue evaluada, ya que puede seguir las rutas de evaporación, esguerrimiento fustal o goteo posterior (Iroumé, A. et al. 1998). Los valores sin embargo, indican que una gran parte de la precipitación ve disminuida su energía potencial para causar erosión y que la vegetación puede ser reguladora de los procesos hidrológicos (Figura 4.45)

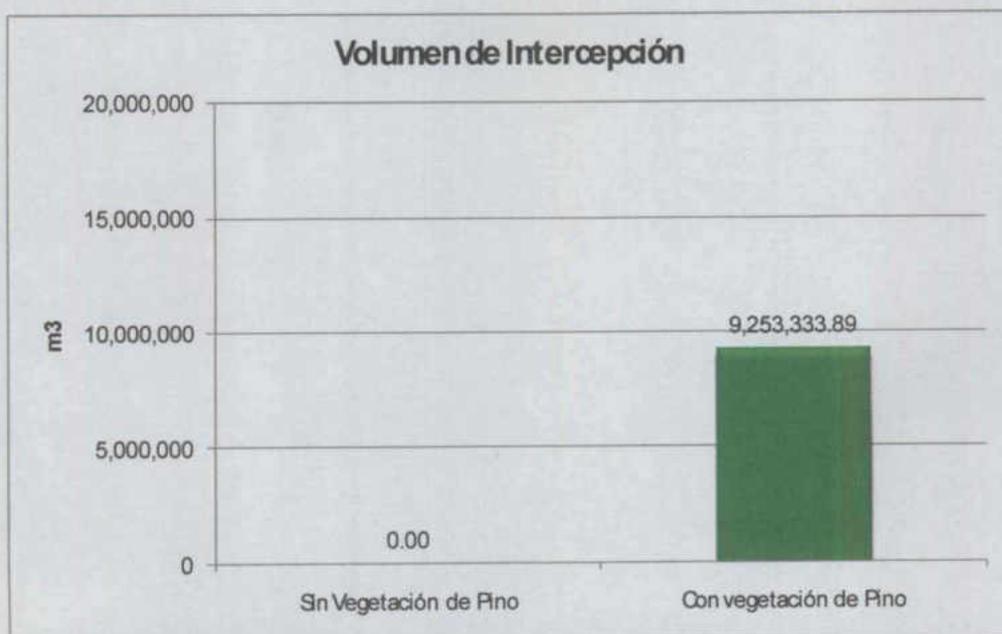


Figura 4.45 Volumen de Intercepción en la microcuenca Río Escanela

En lo que respecta al modelo KINEROS, se trabajaron dos escenarios para obtener los indicadores hidrológicos y de degradación de suelos por erosión hídrica en la microcuenca Río Escanela: el primero fueron las condiciones actuales de la vegetación de bosque de pino, y el segundo sustituyendo los polígonos de bosque de pino por una condición sin vegetación.

Los indicadores hidrológicos analizados como resultado de la salida del programa AGWA fueron Infiltración (mm), Esguerrimiento (mm), Producción de sedimentos (kg/ha), y Descarga pico de sedimentos (m³/s)

El promedio estimado del esguerrimiento para la microcuenca en la condición de presencia de bosque de pino fue de 15 mm contra 18 mm en condiciones de carencia de bosque (41 y 48 % del total de la tormenta de diseño). El rango de valores varió de 8 mm a 25 mm en la condición de Bosque de Pino y de 10 mm y 23 mm en ausencia de bosque, 20%-63% y 25%-58% respectivamente de la tormenta de diseño de 40 mm.

Los valores más bajos se observaron en las unidades de esguerrimiento localizadas en la porción suroeste que coincide con las partes de mayor altitud, las magnitudes ante la ausencia de bosque de pino cambian pero coinciden