UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – HIDRÁULICA

CARACTERIZACIÓN DEL FACTOR EROSIVO “R” EN EL ESTADO DE VERACRUZ

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
ARMANDO ROBLES VALVERDE

TUTOR PRINCIPAL
DRA. LILIA REYES CHÁVEZ
FACULTAD DE INGENIERÍA

JURADO ASIGNADO:

Presidente:	Dr. Gracia Sánchez Jesús
Secretario:	Dr. Escalante Sandoval Carlos A.
Vocal:	Dra. Reyes Chávez Lilia
1 er. Suplente:	Dr. Silva Casarín Rodolfo
2 do. Suplente:	Dr. Mendoza Baldwin Edgar Gerardo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA, CIUDAD UNIVERSITARIA

TUTOR DE TESIS:

DRA. LILIA REYES CHÁVEZ

FIRMA

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 6
1. EL RECURSO SUELO 9
1.1. Principales características físicas de los suelos. 9
1.1.1. Color del Suelo. 9
1.1.2. Textura del suelo 10
1.2. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo / World Reference Base for Soil Resources (WRB) 10
1.3. Perfiles edáficos 13
1.4. Principales tipos de suelo en territorio mexicano. 14
2. FACTORES EN LA EROSIÓN, DEGRADACIÓN Y SEDIMENTACIÓN DE LOS SUELOS. 20
2.1. Clima 20
2.1.1. Aspectos del clima en México 20
2.2. Vegetación 22
2.2.1. Aspectos de la vegetación en México. 23
2.3. Uso de Suelo 25
2.2.1. Aspectos del Uso del Suelo en México. 26
2.4. Tipo de Suelo 27
2.5. Geoforma y Topografía 28
2.5.1. Geoforma principal 28
2.5.2. Forma de la pendiente 29
2.5.3. Angulo de la pendiente (Gradiente y orientación de la pendiente) 30
2.6. Velocidad del flujo 30
3. EROSIÓN HÍDRICA; UNO DE LOS PROCESOS DE EROSIÓN DEL SUELO 32
3.1. Tipos de erosión hídrica 35
3.2. Inestabilidad de laderas 37
3.2.1. Clasificación de los procesos de deslizamiento (Procesos de remoción en masa). 38
3.2.2. Factores que influyen en el deslizamiento 39
3.3. Estimación de la erosión a partir de modelos. 40
3.5. Tolerancias y niveles de la pérdida de suelo. 44
3.6. Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE). 45
3.6.1. Potencial erosivo de la lluvia. Factor "R" 47
3.6.2. Erodabilidad del suelo. Factor "K". 48

3.6.3. Factor Topográfico Longitud - Pendiente. Factor "SL". 50
3.6.4. Factor de Cobertura Vegetal. Factor "C". 52
3.6.5. Factor de Prácticas de cultivo y conservación de suelo. Factor "P". 53
4. APLICACIÓN 55
4.1. Descripción del Área de Estudio. 55
4.2. Análisis de datos climáticos 60
4.2.1. Obtención de datos faltantes en Registros históricos. 61
4.2.2. Verificación de Homogeneidad de los datos. 63
4.2.3. Verificación de la Tendencia de los datos. 64
4.2.4. Verificación de la independencia de las series de datos. 65
4.2.5. Eventos extremos máximos. 67
4.3. Análisis de frecuencias de eventos extremos máximos. 69
4.4. Curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno (i-d-Tr). 71
4.5. Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE). 93
4.5.1.1. Obtención del factor erosivo R a través de Registros Pluviógraficos - Registros de EMA´s. 93
4.5.1.2. Obtención del factor erosivo R a través de Información Pluviométrica y curvas i-d-Tr. 104
4.5.1.3. Obtención del factor erosivo R a través de Información Pluviométrica con relaciones funcionales (Escalante, 2005). 105
4.5.2. Estimación del aporte de sedimentos. 110
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 121
REFERENCIAS 124

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo es un proceso natural, siendo un factor esencial que, en conjunto con la influencia del clima, el relieve, los organismos (flora y fauna) y el tiempo dan paso a la formación en un principio del mismo. El problema reside cuando la erosión se da de manera acelerada (degradación), donde la tasa natural presenta un incremento significativo, primordialmente por la actividad humana.

La importancia del estudio de la erosión del suelo reside en que este es uno de los ecosistemas más complejos de la naturaleza y uno de los hábitats más diversos de la tierra: alberga una infinidad de organismos diferentes que interactúan entre sí y contribuyen a los ciclos globales que hacen posible la vida. No hay ningún lugar de la naturaleza con una mayor concentración de especies que los suelos (FAO, 2015b).

Al ser este un recurso finito implica que su pérdida y degradación sea no reversible en el curso de una vida humana, con lo que su conservación es esencial para la seguridad alimentaria de una población creciente, para responder a sus necesidades en términos de biomasa (energía), fibra, forraje, y otros derivados hacia un fututo sustentable. Este desarrollo sustentable no se puede entender sin involucrar la administración eficiente y racional de los recursos, de manera tal que el estudio de los factores involucrados en los cambios de dichos recursos debe realizarse de una manera puntual, adaptándose a las herramientas, recursos e información disponibles, generando o adaptando metodologías, y empleándolas como ejes rectores en una planeación integral.

Dentro de los factores naturales que inciden en la degradación de los suelos se encuentra la lluvia y el viento (Figura.1.1). Siendo el primero de ellos uno de los de mayor peso, ya que aparte de afectar la capacidad de las tierras para la producción de alimentos, genera grandes problemas como azolves o el depósito de sedimentos en ríos, lagos, lagunas, presas; dañando la infraestructura, disminuyendo tanto su vida útil como la capacidad de aprovechamiento hidráulico de la misma. Además, causa aunada a otros factores problemas de estabilidad estructural en laderas y acantilaos.

Usualmente cualquier medida para el control de la erosión hídrica requiere identificar cuál será la intensidad y duración de la precipitación con una cierta frecuencia desde el punto de vista estadístico, lo anterior se logra recurriendo a la información histórica.

En México la erosión de suelos ha utilizado diferentes metodologías, plazos y escalas de tiempo con datos que muestran que el territorio mexicano presenta degradación de suelos entre un 40% y 98%. Algunas de las investigaciones concluyen que ha existido una subestimación durante las últimas décadas (Maass Moreno y García Oliva, 1990).

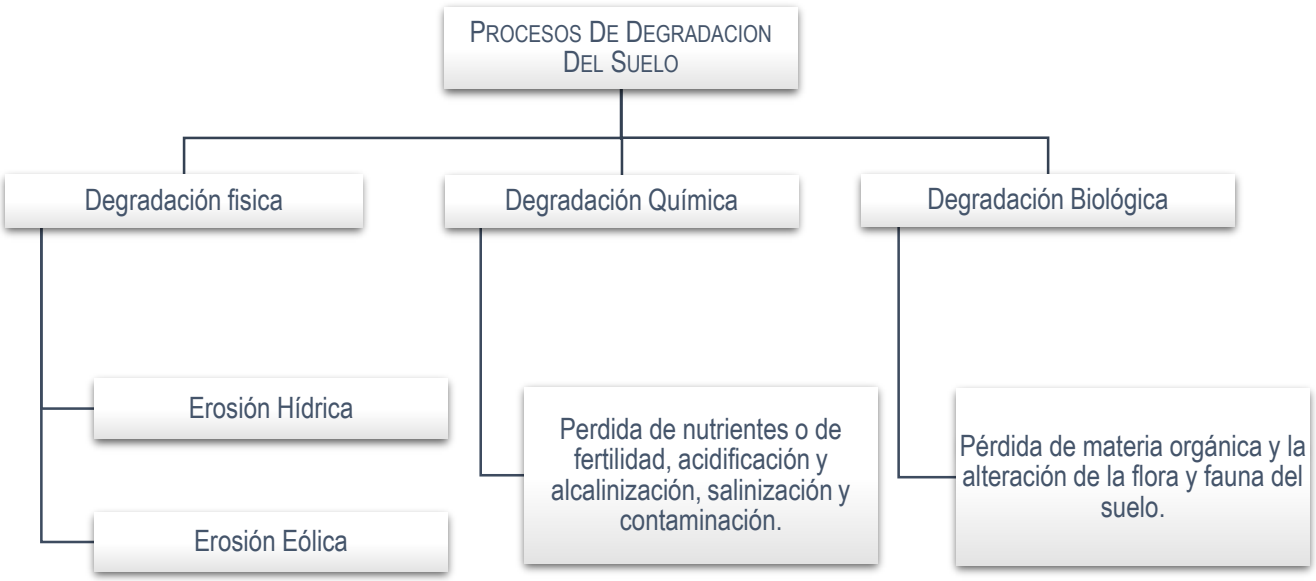


Figura 1.1. Procesos de Degradación del Suelo (Escalante, 2005)

El objetivo de este trabajo es calcular el factor erosivo "R" para la predicción de la erosión en el estado de Veracruz, lugar que se ve afectado por diferentes tipos y clases de precipitación.

Los objetivos adicionales que se pretende alcanzar son:

a. Generar metodologías operativas para el diseño y dimensionamiento de técnicas de control de erosión, adaptando modelos existentes a las características de la información disponible en el territorio nacional.
b. Aportar una visión general de las técnicas de ordenamiento de tierras sujetas a erosión hídrica.
c. Mencionar los fundamentos de las técnicas de control de escurrimientos y pérdidas de suelo como medios para prevenir inestabilidad y deslizamientos de laderas.

El trabajo está dividido en seis capítulos, en los que se discuten principios básicos y técnicas de manejo indirectas para la cuantificación en principio del factor erosivo "R" para después a partir de los valores obtenidos calcular el aporte de sedimentos en 4 subcuencas dentro del territorio que comprende el estado de Veracruz.

El Capítulo uno presenta los conceptos básicos sobre el recurso suelo, las funciones que desempeña, su estructura física, su importancia en las actividades antropogénicas y las problemáticas actuales en su manejo y conservación.

Los factores que afectan en la erosión, degradación y sedimentación dependen en sí del tipo de erosión a estudiar, es por esto, que en el capítulo dos se esquematiza de manera general las variables que intervienen en la perdida de suelos, además se presenta una pequeña descripción de las actividades antrópicas que han afectado en gran medida la renovación natural del recurso al verse rebasada por las tasas altas de erosión.

El capítulo tres plantea los diferentes tipos de erosión hídrica, sus principales causas y consecuencias. Se exponen modelos para la estimación del material solido que se pone en movimiento como producto de este tipo de erosión.

En el capítulo cuatro se mencionan las bases de datos utilizadas para obtener las series históricas de información hidrométrica y climatológica, así como la manera en que se presentan los datos. También se detallan las técnicas de interpolación para datos climatológicos necesarias para conocer la estimación puntual de un evento con la menor incertidumbre posible; y las técnicas de normalización, relleno y extensión de registros.

En el capítulo de aplicación – capitulo cuatro – se describe la zona de estudio; se obtienen las regiones climatológicamente homogéneas en la, se obtiene el factor erosivo mediante la metodología planteada y se compara con otras formas de obtenerlo, para al finalizar realizar la comparativa entre el nivel de perdida de suelo para las subcuencas de estudio. Dichos niveles de perdida se analizan con el uso de uno de los modelos más utilizados para evaluación de las tasas de erosión.

En el capítulo seis se escriben las conclusiones y recomendaciones. Se concluye sobre resultados de métodos, para responder a una de las mayores problemáticas en cuestión medioambiental y de recursos naturales en México: la perdida por erosión de los suelos, y sus repercusiones en sectores tan amplios de la sociedad como lo son la capacidad de producción alimentaria hasta la funcionalidad y vida útil de la infraestructura.

1. EL RECURSO SUELO

El suelo es el medio natural para el crecimiento de las plantas. También se ha definido como un cuerpo natural que consiste en capas de suelo (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas (FAO, 2016b).

La Sociedad Americana de la Ciencia del Suelo (SSSA, por sus siglas en inglés), a partir de su origen y de los factores ambientales,, lo define como la capa superficial de material mineral y orgánico, no consolidado, que sirve de medio natural para el crecimiento de las plantas, y que ha sido sujeto y presenta los efectos de los factores que le dieron origen (clima, topografía, biota, material parental1 y tiempo) y que debido a la interacción de éstos, difiere en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y morfológicas del sustrato rocoso del que se originó. (SSSA, 2016).

1.1. Principales características físicas de los suelos.

Este subcapítulo describe de forma breve la morfología y otras características del suelo, entre las más importantes características se encuentran la textura, el color, su estructura y consistencia.

1.1.1. Color del Suelo.

El color del suelo refleja la composición, así como las condiciones pasadas y presentes de óxido-reducción del suelo. Está determinado generalmente por el revestimiento de partículas muy finas de materia orgánica humificada (oscuro), óxidos de fierro (amarillo, pardo, anaranjado y rojo), óxidos de manganeso (negro) y otros, o puede ser debido al color de la roca parental (FAO, 2006)

Para la clasificación el color de la matriz del suelo de cada horizonte se debe registrar en condiciones de humedad (o en ambas condiciones, seco y húmedo cuando fuera posible) usando las notaciones para matiz, valor y croma como se da en la Carta o en Tabla de Colores de Suelo Munsell (Munsell, 1975) El matiz, es el color espectral dominante (rojo, amarillo, verde, azul o violeta); el valor, es la claridad u oscuridad de los rangos de color de 1 (oscuro) a 8 (claro); y el croma, es la pureza o fuerza del rango de color desde 1 (pálido) a 8 (brillante).

Cuando no haya un color de suelo matriz dominante, el horizonte se describe como moteado y se dan dos o más colores. En adición a las notaciones de color, se pueden dar los nombres de colores estándar Munsell (FAO, 2006).

A continuación, se mencionan brevemente los colores más representativos y sus características principales (Mendoza Pérez y Reyes Chávez, 2014):

Negro: Indicio de la existencia de materia orgánica o resultado de un mal drenaje.

Rojo: Relacionado con procesos de intensa meteorización del material parental en condiciones de alta temperatura, baja actividad hídrica, presencia de óxidos férricos e incorporación de materia orgánica.

Amarillo a pardo amarillento claro: Asociado con meteorización de tipo aerobia resultado de la presencia de óxidos férricos, generalmente en climas templados.

Pardo: Característico de un suelo con buen drenaje natural y bajo contenido de materia orgánica.

Blanco: Se presenta en suelos con acumulación de minerales como calcita, dolomita y yeso, así como algunos silicatos y sales; también es causado por la lixiviación de componentes del suelo.

Gris: Advierte un ambiente anaerobio provocado por la saturación del suelo.

Verde: Causado por la presencia de un lento drenaje.

Azulado: Se desarrolla en suelos de zonas costeras, deltaicas o pantanosas bajo condiciones de saturación y ausencia de oxígeno, en presencia de disulfuro de hierro que al transformarse en pirita causa la tonalidad azul metálico.

1.1.2. Textura del suelo

La composición granulométrica del suelo está definida por la textura, siendo esta la proporción relativa, expresada en porcentaje, de los diferentes tamaños de partículas que componen la fracción mineral del suelo y que son menores a dos mm, arena, limo y arcilla dentro de los 30 cm superficiales del suelo dominante. Se agrupan en 12 clases texturales utilizando el triángulo de texturas mostrado en la Figura 1.2.

1.2. Base Referencial Mundial del Recurso Suelo / World Reference Base for Soil Resources (WRB)

La Base Referencial Mundial (WRB) se usa como estándar internacional para los sistemas de clasificación de suelos, aprobado por la Unión Internacional de Ciencias del Suelo (International Union of Soil Sciences - IUSS) es un producto desarrollado mediante una colaboración internacional coordinada por el Grupo de Trabajo de IUSS. Esta misma reemplazó la Leyenda de Mapa de Suelos del Mundo de FAO/UNESCO como estándar internacional.

La WRB se inspira en gran medida de los conceptos modernos de clasificación incluyendo la Taxonomía de Suelos, la Leyenda Revisada de FAO/UNESCO del Mapa de Suelos del Mundo (FAO, 1988), Référentiel Pédologique y conceptos rusos. Ante lo más posible los criterios diagnósticos coinciden con los de los sistemas existentes, para que la correlación con los sistemas nacionales y previos internacionales sean lo más sencillo posible. (FAO, 2016a). La primera versión oficial de la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) fue presentada en el 16º Congreso Mundial de la Ciencia del Suelo en Montpellier en 1998. En el mismo evento,

también fue respaldada y adoptada como el sistema de correlación de suelos y comunicación internacional de la Unión Internacional de Ciencias del Suelo (FAO, 2015a).

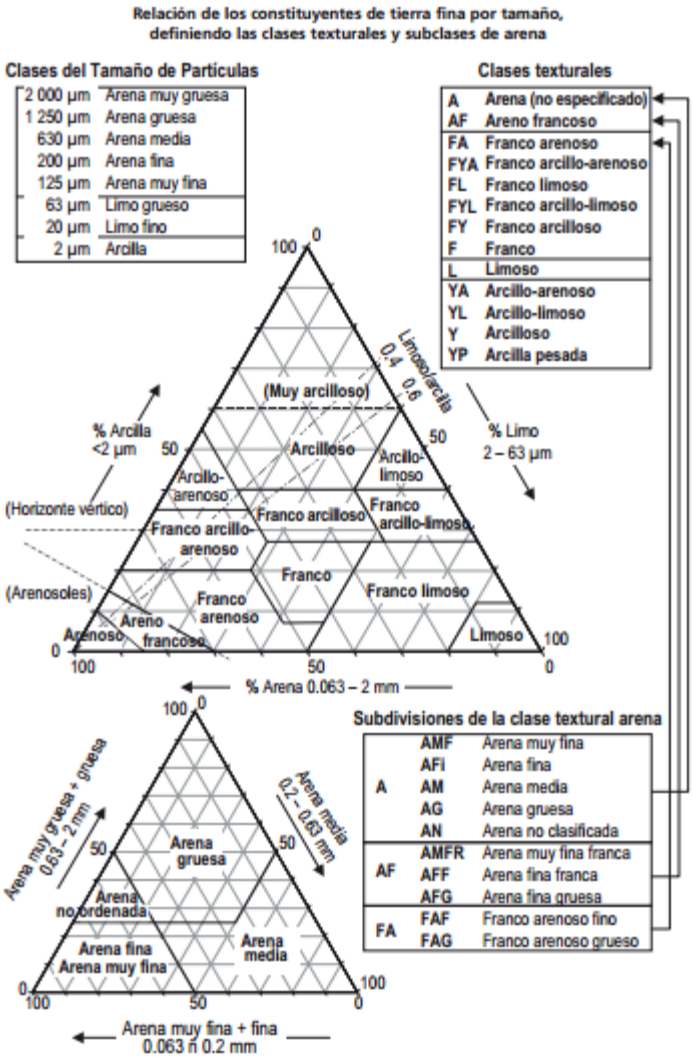


Figura 1.2. Triangulo de texturas / relación de los contribuyentes de tierra fina por tamaño, definiendo las clases texturales y subclases de arena. (FAO, 2006).

Los 32 grupos de suelos de referencia se conjuntan en 8 grupos clasificados con base en los factores dominantes, de acuerdo con las claves del WRB, según IUSS Grupo de Trabajo WRB (2014) se organizan de la siguiente manera (FAO, 2015a):

	GRUPO	CÓDIGO
1.Suelos con gruesas capas orgánicas	**Histosoles**	**HS**
2.Suelos con fuerte influencia humana		
Suelos con uso agrícola prolongado e intensivo	**Antrosoles**	**AT**
Suelos que contienen muchos artefactos	**Tecnosoles**	**TC**
3. Suelos con enraizamiento limitado		
Suelos afectados por permafrost	**Criosoles**	**CR**
Suelos someros o extremadamente gravillosos	**Leptosoles**	**LP**
Suelos alcalinos	**Solonetz**	**SN**
Condiciones alternadas de saturación-sequía, ricos en arcillas expandibles	**Vertisoles**	**VR**
Enriquecimiento en sales solubles	**Solonchaks**	**SC**
4. Suelos regulados por la química de Hierro/Aluminio (Fe/Al)		
Suelos afectados por agua subterránea	**Gleysoles**	**GL**
Alofano o complejos Al-humus	**Andosoles**	**AN**
Queluviación y quiluviación	**Podzoles**	**PZ**
Acumulación de Hierro bajo condiciones hidromórficas	**Plintosoles**	**PT**
Arcilla de baja actividad, fijación de fósforo (P), fuertemente estructurado	**Nitisoles**	**NT**
Dominancia de caolinita y sesquióxidos	**Ferralsoles**	**FR**
Discontinuidad textural abrupta	**Planosoles**	**PL**
Discontinuidad estructural o moderadamente textural	**Stagnosoles**	**ST**
5. Pronunciada acumulación de materia orgánica, alta saturación con bases		
Típicamente mólico, carbonatos secundarios	**Chernozems**	**CH**
Transición a clima más seco	**Kastanozems**	**KS**
Transición a clima más húmedo	**Phaeozems**	**PH**
Con suelo superficial oscuro acídico	**Umbrisols**	**UM**
6. Acumulación de sales menos solubles o sustancias no salinas		
Sílice	**Durisoles**	**DU**
Suelos afectados por agua subterránea	**Gleysoles**	**GY**
Carbonato de calcio	**Calcisoles**	**CL**
7. Suelos con subsuelo enriquecido en arcilla		
Baja saturación con bases, arcillas de baja actividad	**Retisoles**	**RT**
Baja saturación con bases, arcillas de baja actividad	**Acrisoles**	**AC**
Alta saturación con bases, arcilla de baja actividad	**Lixisoles**	**LX**
Baja saturación con bases, arcillas de alta actividad	**Alisoles**	**AL**
Alta saturación con bases, arcilla de alta actividad	**Luvisols**	**LV**
8. Suelos relativamente jóvenes o suelos con poco o ningún desarrollo de perfil		
Planicies de inundación, marismas costeras	**Fluvisoles**	**FL**
Suelos arenosos	**Arenosoles**	**AR**
Suelos moderadamente desarrollados	**Cambisoles**	**CM**
Suelos sin desarrollo significativo de perfil	**Regosoles**	**RG**

Tabla 1.1. Clave Racionalizada para los Grupos de Suelos de Referencia de la WRB (FAO, 2015a).

1.3. Perfiles edáficos

Los componentes de los suelos se encuentran dispuestos en una serie de zonas llamadas horizontes (Figura 1.3). El arreglo de estos horizontes en un suelo se conoce como un perfil edáfico o perfil del suelo. Cada horizonte se caracteriza por tener diferentes propiedades como color, textura, estructura, espesor y composición (tipo de minerales y elementos químicos presentes), además de su consistencia y reacción.

Todas estas propiedades son utilizadas para definir los tipos de horizontes, de los cuales se han identificado a la fecha seis, simbolizados con las letras mayúsculas O, A, E, B, C y R. La mayoría de los suelos maduros posee, al menos, tres de los horizontes (A, B y C), pero suelos recientes o poco desarrollados pueden carecer de ellos. Algunos suelos tienen una capa orgánica (horizonte O) compuesta principalmente por hojas, desechos animales, hongos y otros materiales orgánicos parcialmente descompuestos. (Sepúlveda, Trejo, y de la Rosa Pérez, 2005)

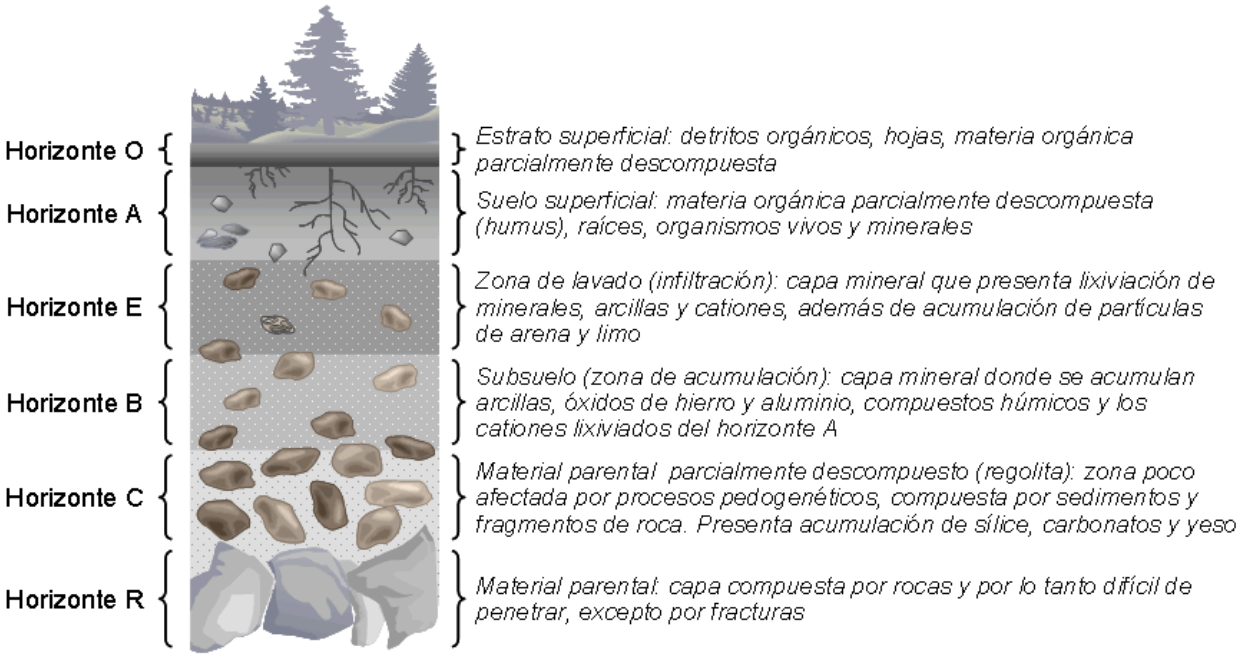


Figura. 1.3. Perfil general de un suelo. El espesor, presencia y composición de los horizontes[1] varía en función del tipo de suelo y las condiciones climáticas (Sepúlveda et al., 2005).

El horizonte A, comúnmente es una mezcla porosa de materia orgánica descompuesta (humus), organismos vivos y algunas partículas minerales. El horizonte E, es una capa mineral de color claro, en la que ocurren pérdidas de arcillas, minerales y cationes por lixiviación, generándose una acumulación de arena y limo. Los horizontes B (subsuelo) y C (material perental parcialmente descompuesto), son los que contienen la mayor parte de la materia

[1] Los horizontes y propiedades de diagnóstico se caracterizan por una combinación de atributos que reflejan resultados generalizados, comunes, de procesos de formación de suelos (Bridges, 1971)

inorgánica del suelo. El horizonte B contiene depósitos de arcillas y minerales (aluminio, óxidos de aluminio y carbonato de calcio) que recibe de las capas más superficiales por efecto de escurrimientos; el horizonte C en su mayor parte, es roca disgregada en forma de mezclas variables de arena, arcilla y grava, que contiene un mínimo de material orgánico; este horizonte, normalmente descansa sobre un lecho de roca (material parental) denominado con la letra R, el cual no es considerado como suelo. (Miller, Rodríguez, Rodríguez, Velázquez, y Bocanegra, 1994)

1.4. Principales tipos de suelo en territorio mexicano.

El INEGI ha adoptado el sistema de clasificación de los tipos de suelo propuesta por la Organización de las Naciones Unidad para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), en la Figura 1.4 se presenta la distribución de los tipos de suelo en el territorio nacional donde las tres categorías dominantes en el territorio, en términos de superficie, son los Leptosoles, Regosoles y Phaeozem (SEMARNAT, 2013)

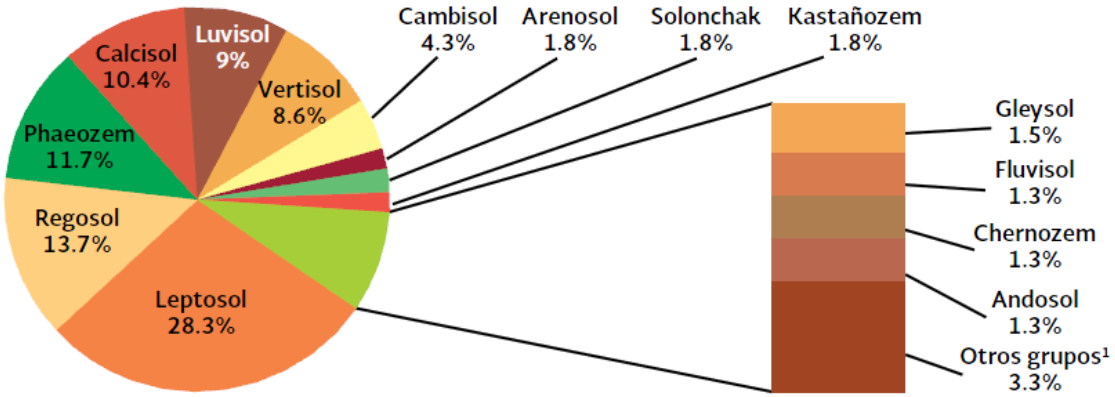


Figura 1.4 Porcentaje de la superficie total de los principales grupos de suelos en México.(SEMARNAT, 2013).

En México se encuentran 26 de los 32 grupos de suelo de referencia existentes en el mundo, reconocidos en el Sistema Internacional Base Referencial Mundial del Recurso. Los seis grupos dominantes en nuestro país son: Leptosol (54.3 millones de ha), Regosol (26.3 millones de ha), Phaeozem (22.5 millones de ha), Calcisol (20 millones de ha), Luvisol (17.3 millones de ha), Vertisol (16.5 millones de ha) que en conjunto ocupan el 81.7 % del territorio nacional (Figura 1.5), en los 35.04 millones de hectáreas restantes se presentan los otros grupos de suelo de referencia (Mendoza Pérez y Reyes Chávez, 2014)

Así para los principales tipos de suelo en el territorio nacional sus características son (INEGI, 1991):

1. Regosol (del griego Rheros: manto, cobija; relativo a la capa de material suelto que cubre la roca). Son suelos poco desarrollados, constituidos por material suelto, muy semejante a la roca de la cual se originó;

dependiendo del tipo de clima sustentan cualquier tipo de vegetación. Muy abundantes en el país, en terrenos montañosos, sobre todo en el norte.

2. Litosol (del griego lithos: piedra y solum: suelo, es decir, suelo de piedra) son suelos muy delgados, con espesores menores a los 10 cm. Descansan sobre un estrato duro y continuo, como roca madre, tepetate o caliche; según el clima soportan selvas bajas o matorrales altos. De amplia distribución en el país, generalmente en topografía plana o levemente ondulada, frecuente en la Península de Yucatán, asociados a rendzinas.

3. Xerosol (del griego xeros: seco, suelo de zona seca o árida). Son suelos áridos que contienen materia orgánica. La capa superficial es clara y debajo de ella puede haber acumulación de minerales arcillosos y/o sales, como carbonatos y sulfatos. Se hallan restringidos a las zonas áridas y semiáridas del centro y norte del país, a veces asociado a regosoles. Soportan una vegetación de matorral y pastizal.

4. Yermosol (del español yermo: desértico, desolado). Son suelos de zonas muy secas o desérticas casi sin materia orgánica, semejantes a los xerosoles, de los que difieren sólo en el contenido de materia orgánica en el horizonte superficial. En algunos sitios sustentan vegetación de matorral o de pastizal y, en algunos casos, vegetación esparcida. Son característicos del Desierto sonorense y la península de Baja California, asociados a regosoles y xerosoles.

5. Cambisol (del latín cambiare: cambiar, suelo que cambia). Son suelos claros, con desarrollo débil, que presentan cambios en su estructura o consistencia debido al intemperismo. Frecuentemente presentan todavía características del material que les dio origen. Dependiendo del clima, pueden sustentar una vegetación de matorral, pastizal, bosque o selva. Se encuentran en cualquier tipo climático, excepto en zonas áridas y semiáridas; en terrenos abruptos, ondulados o planos, en porciones orientales de la Sierra de Chihuahua y Durango, en las partes montañosas del Eje Volcánico Transversal. Se asocian a regosoles o feozem.

6. Vertisol (del latín verto: voltear, suelos que se revuelven y autoabonan, ricos en arcillas expandibles). Son muy arcillosos, con grietas anchas y profundas cuando están secos; si están húmedos, son pegajosos, su drenaje es deficiente; en seco son muy duros. Se presentan en casi todos los climas que tienen una marcada estación seca y otra lluviosa, sobre terrenos planos o en depresiones, frecuentes en llanuras costeras del Golfo de México, asociados con los feozem y los solonchaks.

7. Feozem (del griego phaeo: pardo y del ruso zemlja: tierra, o sea, tierra parda). Son suelos obscuros, de consistencia suave, ricos en materia orgánica y en nutrimentos; generalmente el subsuelo presenta acumulación de arcilla. Se les encuentra en las regiones templadas y tropicales, son frecuentes en parte del Eje Volcánico Transversal, asociados con andosoles, cambisoles y vertisoles.

8. Rendzina (nombre polaco que se da a los suelos profundos y pegajosos que se desarrollan sobre calizas). Son suelos obscuros, poco profundos (10 cm a 50 cm) que sobreyacen directamente al material carbonatado, por ejemplo, calizas. Se les localiza en cualquier tipo climático, excepto en zonas frías, generalmente en relieves montañosos como en la Sierra Madre Oriental, asociados a litorales. En la Península de Yucatán son los suelos predominantes en terrenos planos. La vegetación que sustentan varían desde bosques de pino–encino, encinares, bosques mesófilos de montaña hasta selvas bajas y medianas.

9. Luvisol (del latín luvi, luo: lavar, suelo lavado). Son suelos con un contenido de bases que va de mediano a alto. El subsuelo tiene acumulación de arcillas, como resultante del lavado y la formación in situ. En zonas tropicales son de color rojizo y cambian a amarillento en las templadas; son muy susceptibles a la erosión. Se les localiza fundamentalmente bajo climas templados y tropicales, sobre terrenos de topografía variada. A veces se les encuentra en zonas semiáridas, abarcando pequeñas áreas. Se hallan ampliamente representados en el Eje Volcánico Transversal, asociados con andosoles, vertisoles, cambisoles y rendzinas. Sobre ellos se desarrolla una vegetación de bosques, selva o pastizal.

10. Acrisol (del latín acris: agrio, ácido, suelos ácidos). Muy semejantes a los luvisoles, aunque más ácidos en el subsuelo debido a un lavado más intenso y a la rápida formación de minerales arcillosos. Son también muy susceptibles a la erosión. Dependiendo del clima permiten el desarrollo de bosques o de selvas.

11. Andosol (del japonés en: obscuro y do: tierra. Tierra negra). Son suelos derivados de cenizas volcánicas, con una capa superficial obscura, aunque el subsuelo es más claro; presentan altos contenidos de alófeno (material amorfo), lo cual les permite retener mucho el fósforo. Son también muy susceptibles a la erosión; de amplia distribución en áreas montañosas de origen volcánico. La vegetación que sustentan varía de acuerdo con el tipo climático y puede ser bosque o selva. Bajo clima templado se les localiza en el Eje Volcánico Transversal y en climas tropicales, en la sierra de los Tuxtlas, en Veracruz.

12. Solonchak (del ruso sol: sal, literalmente suelos salinos). Se caracterizan por presentar acumulación de sales solubles en alguna parte del suelo o en todo su espesor, debido a la fuerte evapotranspiración a que están sujetos. Son frecuentes en cuencas endorreicas de zonas áridas o semiáridas, o en los bolsones del centro norte del país. La vegetación que soportan está dominada por asociaciones de halófitas y/o de pastizales halófilos. Son frecuentes también en las llanuras costeras del Golfo de México y del océano Pacífico.

13. Gleysol (del ruso gley: pantanoso, cenagoso). Son suelos pantanosos, saturados de humedad la mayor parte del año, condición que genera colores azulosos, verde grisáceos o manchados de diferente coloración, con desprendimiento de malos olores. Muy frecuentes en la llanura costera del Golfo Sur, especialmente en Tabasco y el norte de Chiapas. La vegetación que sustentan es de manglar, popal, tular, tasistal y pastizales.

14. Castañosem (del latín castaneo: castaño y del ruso semja: tierra, tierra castaña). Son suelos que presentan una capa superior de color pardo o rojizo obscuro, con un buen porcentaje de materia orgánica y de nutrimentos. El subsuelo a menudo tiene acumulación de caliche (arena cementada con carbonato de calcio en disolución) y/o yeso. La vegetación que sostiene son pastizales con algunas áreas de matorral. Se localizan en el noreste del país en parte de Nuevo León y Tamaulipas.

15. Planosol (del latín planus: plano, llano). Suelos que se desarrollan en sitios de topografía plana o en depresiones mal drenadas. Presentan un horizonte superficial de color claro o gleysado, sobre un horizonte lentamente permeable, dentro de una profundidad de hasta 125 cm. Se les localiza en el centro del país, en zonas semiáridas y templadas, sobre terrenos planos o levemente ondulados como en gran parte del estado de Aguascalientes. Sobre ellos se desarrollan pastizales climáticos.

Figura 1.5. Suelos dominantes en México. (SEMARNAT, 2010)

Figura 1.6. Textura del suelo en México. (SEMARNAT, 2010)

2. Factores en la Erosión, Degradación y Sedimentación de los Suelos.

Los factores que afectan en la erosión, degradación y sedimentación dependen en si del tipo de erosión a estudiar, aun así, se puede decir que la erosión en un suelo especifico dependerá directamente de variables generales, estas son: Clima, vegetación, uso de suelo, tipo de suelo, topografía y la velocidad del flujo (UNESCO, 2010).

Este capítulo expone en forma general cada una de las variables mencionadas, así como la influencia de las actividades antrópicas en el cambio de las mismas y su influencia en las tasas de erosión esperadas.

2.1. Clima

La variable climática más importante es la lluvia, debido a su fuerte influencia en ciertos procesos de erosión hídrica (erosión de impacto, riles, cárcavas, etc.) (R. P. C. Morgan, 2009). De esta se desprenden variables como intensidad de la precipitación (mm/h) y la precipitación acumulada (mm) que muestran que no todas las tormentas son iguales, existiendo unas más erosivas que otras, es decir, en tormentas con una intensidad baja donde la tasa de infiltración del suelo no sea superada no se generara escurrimiento superficial, reduciendo significativamente el proceso de la erosión laminar o formación de cárcavas, aunado a esto es posible que tampoco genere un impacto significativo en el desprendimiento de partículas de suelo a causa de que el tamaño de las gotas no contara con suficiente energía cinética. Caso contrario es el que se presenta con una tormenta intensa, esta no solo presenta un alto potencial de erosión al impacto de las gotas con el suelo, si no que al generar escurrimientos superficiales da lugar a los procesos erosivos anteriormente mencionados.

En resumen, la duración y la distribución temporal de la lluvia son factores esenciales en las tasas de erosión producidas.

El clima también juega un rol preponderante en los procesos de erosión eólica, pues el desprendimiento de las partículas ocurrirá sólo si el suelo se encuentra seco. Por ende, sólo regiones de climas áridos y semiáridos son susceptibles a erosión por causa del viento, lo que no significa que existan algunas excepciones en otros tipos de clima (UNESCO, 2010).

2.1.1. Aspectos del clima en México

En México el clima está determinado por varios factores, entre los que se encuentran la altitud sobre el nivel del mar, la latitud geográfica, las diversas condiciones atmosféricas y la distribución existente de tierra y agua. Por lo anterior, el país cuenta con una gran diversidad de climas, los cuales de manera muy general pueden clasificarse, según su temperatura, en cálido y templado; y de acuerdo con la humedad existente en el medio, en: húmedo, subhúmedo y muy seco (Figura. 2.1).

El clima seco se encuentra en la mayor parte del centro y norte del país, región que comprende el 28.3% del territorio nacional; se caracteriza por la circulación de los vientos, lo cual provoca escasa nubosidad y precipitaciones de 300 a 600 mm anuales, con temperaturas en promedio de 22° a 26° C en algunas regiones, y en otras de 18° a 22° C. Para el clima muy seco registra temperaturas en promedio de 18° a 22° C, con casos extremos de más de 26°C; presentando precipitaciones anuales de 100 a 300 mm en promedio, se encuentra en el 20.8% del país.

En relación al clima cálido, éste se subdivide en cálido húmedo y cálido subhúmedo. El primero de ellos ocupa el 4.7% del territorio nacional y se caracteriza por tener una temperatura media anual entre 22° y 26°C y precipitaciones de 2,000 a 4,000 mm anuales. Por su parte, el clima cálido subhúmedo se encuentra en el 23% del país; en él se registran precipitaciones entre 1,000 y 2,000 mm anuales y temperaturas que oscilan de 22° y 26°, con regiones en donde superan los 26°C.

Finalmente, el clima templado se divide en húmedo y subhúmedo; en el primero de ellos se registran temperaturas entre 18° y 22°C y precipitaciones en promedio de 2,000 a 4,000 mm anuales; comprende el 2.7% del territorio nacional. Respecto al clima templado subhúmedo, se encuentra en el 20.5% del país, observa en su mayoría temperaturas entre 10° y 18° C y de 18° a 22°C, sin embargo, en algunas regiones puede disminuir a menos de 10°C; registra precipitaciones de 600 a 1,000 mm en promedio durante el año. (INEGI, 2005)

Figura 2.1. Grupos y subgrupos de climas en México (INEGI, 2005).

2.2. Vegetación

La vegetación actúa como cubierta protectora, estableciéndose una frontera entre el suelo y la atmósfera. La presencia de una cobertura vegetal no solo protege el suelo contra la erosión de impacto, sino que también brinda rugosidad[2] al terreno por el que el flujo superficial viaja, reduciendo su velocidad y, por ende, su poder erosivo. La presencia de una cubierta vegetal también reduce, significativamente, la velocidad del viento, mediante la adición de rugosidad a la superficie edáfica (R. P. C. Morgan, 2009)

Las raíces de especies herbáceas, arbustivas y arbóreas constituyen una variable indispensable en cuanto al control de la erosión y la sedimentación, pues mantienen el suelo en su lugar (Figura 2.2).

Figura 2.2. Efecto de las raíces de los árboles en la erosión de los suelos, Las raíces de los árboles mantienen las partículas de suelo en su lugar (Michael Hoelzl – Wikimedia Commons).

Se ha demostrado que la presencia de raíces profundas ayuda a prevenir movimiento de masas en laderas, principalmente porque dichas masas se encuentran "ancladas" a la tierra gracias a las raíces de los árboles (Figura

[2] La rugosidad se expresa comúnmente en términos del coeficiente de Manning, el cual representa la suma de la rugosidad de la superficie del suelo, la microtopografía y la cobertura vegetal. La altura de la vegetación y la profundidad del flujo superficial juegan un rol preponderante en la erodabilidad del caudal.

2.3). Además, las raíces superficiales finas ayudan a sujetar el suelo, formando un conglomerado firme y difícil de romper, incluso con un reducido número de raíces y suelos de baja cohesividad (Morgan, 2005).

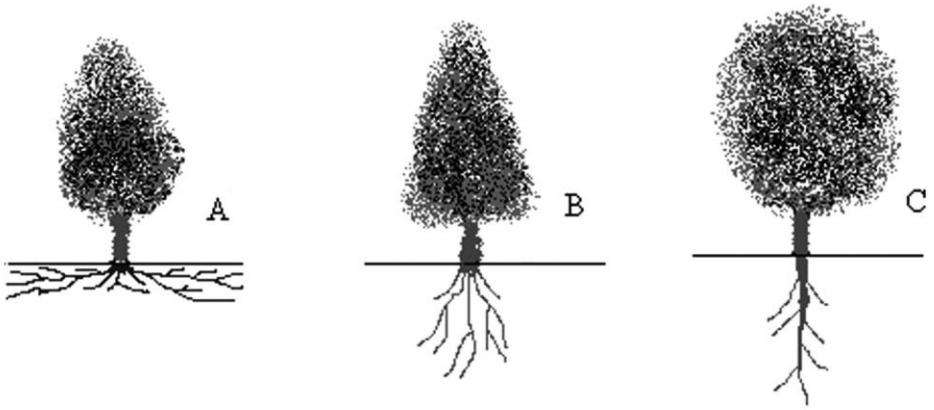


Figura 2.3. (A) Raíces superficiales, adecuadas para el control de la erosión hídrica y eólica, (B y C) raíces que ayudan a prevenir movimientos de masas de suelo en pendientes y laderas (UNESCO, 2010).

Como regla general, mientras más densa y homogénea sea la cubierta vegetal, mayor es su efectividad en la disminución de la erosión laminar (Garcia-Chevesich, 2009).

Es de importancia mencionar que la vegetación en cualquier territorio depende de factores variados, interrelacionados entre ellos, donde los principales son los siguientes:

- Aspectos geológicos
- El factor clima
- El factor suelo y los procesos edafológicos.

2.2.1. Aspectos de la vegetación en México.

La ubicación y la forma del territorio de la República Mexicana revisten características notables. Sus casi dos millones de km^2 de extensión se hallan más o menos equitativamente distribuidos de ambos lados del Trópico de Cáncer y sus extremos meridional y boreal alcanzan los paralelos 14° 30' N y 32° 42' N, respectivamente.

Su forma peculiar es el resultado del estrechamiento paulatino que con dirección sur sufre Norteamérica, de la torsión hacia el sureste que se manifiesta en esta masa continental, sobre todo a partir del paralelo 20°, y de la existencia de dos penínsulas sobresalientes: Baja California y Yucatán. La irregularidad del entorno del país se refleja en la extraordinaria longitud de sus límites que alcanzan aproximadamente 13 000 km (Rzedowski, 2006).

La gran amplitud altitudinal de México, su ubicación a ambos lados del Trópico de Cáncer y la influencia oceánica debida a la estrechez de la masa continental, son quizá los factores determinantes más significativos del clima que prevalece en el país y de su diversidad. Como factores de segundo orden y, particularmente a nivel regional, pueden considerarse: la forma misma del territorio de la República, su complicada y variada topografía, la situación de sus

principales cordilleras, así como la ubicación de una gran parte de México en la porción occidental de Norteamérica (Rzedowski, 2006).

Así los tipos de vegetación se agrupan de acuerdo a sus características ecológicas, fisonómicas y estructurales. En México existen los siguientes grandes grupos (Figura 2.4):

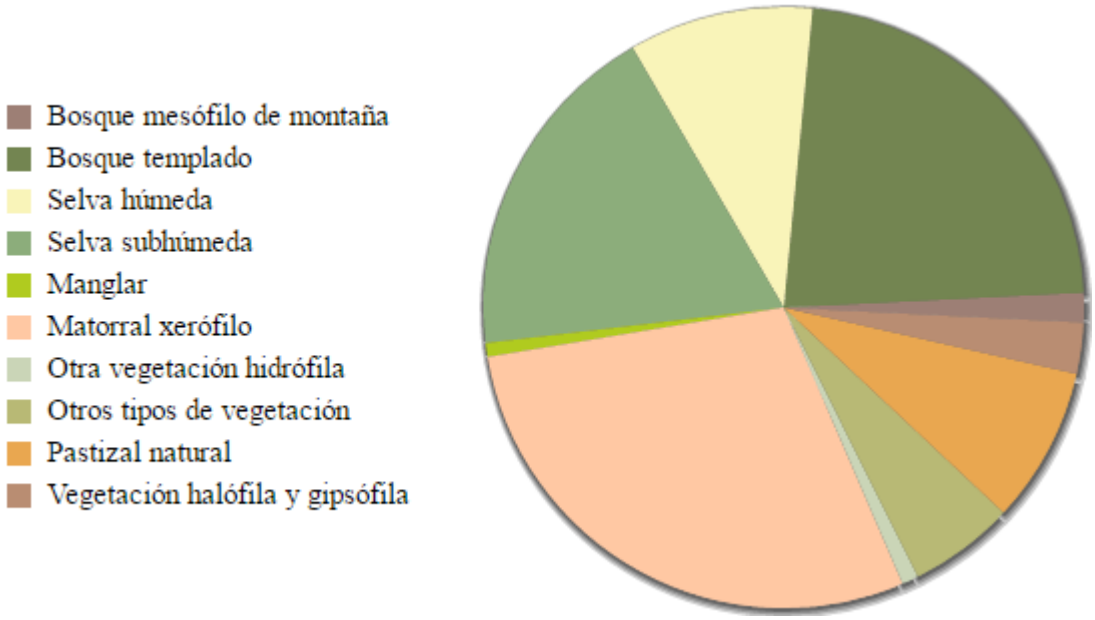


Figura 2.4. Vegetación primaria en México, con datos de: INEGI. Carta de vegetación primaria potencial (escala 1:1000000) México 2001 (SEMARNAT, 2014).

La influencia humana sobre la vegetación natural de México resulta en términos generales altamente destructiva. Este proceso de devastación data sin duda desde la llegada misma del hombre al territorio, pero sus agentes motores de mayor importancia han sido la colonización progresiva del país, el origen y la expansión de la agricultura (Tabla 2.1), así como el desarrollo de la ganadería, de la explotación forestal y la minería.

CAMBIOS EN LA VEGETACIÓN – MÉXICO 1978 - 2012					
CARTOGRAFÍA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)	SERIE I (km^2)	SERIE II (km^2)	SERIE III (km^2)	SERIE IV (km^2)	SERIE V (km^2)
Bosque	350611.155	344946.437	341648.569	341948.475	341202.060
Forestal	305.990	254.889	320.107	372.321	595.456

Tabla 2.1. Cambios en la Vegetación – México 1978 – 2012. Con información de los conjuntos de datos de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250000, INEGI.

CAMBIOS EN LA VEGETACIÓN – MÉXICO 1978 - 2012					
CARTOGRAFÍA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)	SERIE I (km^2)	SERIE II (km^2)	SERIE III (km^2)	SERIE IV (km^2)	SERIE V (km^2)
Otros Tipos de Vegetación	3542.921	2985.397	4640.177	4616.355	4506.245
Matorral	634027.392	604824.891	593002.066	587521.232	584974.949
Pastizal	125631.293	121903.007	126855.029	120851.093	119814.687
Pecuario	85059.012	113149.281	124198.110	128345.040	129450.942
Selva	349114.037	314634.350	317459.647	309342.721	305415.656
Vegetación Hidrófila	54866.077	53432.222	25871.838	25782.700	25921.664
Vegetación Inducida	58086.637	61705.213	64449.736	61575.322	61099.010
Cuerpo de Agua	22236.206	26376.996	26382.470	26956.018	27554.264
Sin Vegetación Aparente	8165.817	9529.320	9301.873	9555.538	9474.185
Desprovisto de Vegetación	0.000	0.000	142.164	207.158	384.135

Tabla 2.1. (Continuación) Cambios en la Vegetación – México 1978 – 2012. Con información de los conjuntos de datos de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250000[3], INEGI.

De acuerdo a la clasificación de cubiertas vegetales de las series, I, II, III, IV y V, se observa que la mayoría de las cubiertas vegetales han experimentado un descenso en su superficie desde la serie I (1978) a la V (2012). Las cubiertas vegetales que más ha perdido superficie son las Selvas a lo largo del territorio nacional. Finalmente, nos encontramos cubiertas vegetales que han incrementado su superficie significativamente, como la vegetación secundaria, esta obedece principalmente a la perdida de la vegetación principal del territorio.

2.3. Uso de Suelo

El uso de la tierra es lejos el factor más importante dentro del conjunto de los factores que afectan la erosión y la sedimentación. Durante los últimos años se ha construido y urbanizado más terrenos que la suma de todas las áreas urbanas de los siglos anteriores (Toy, Foster, y Renard, 2002). Los sitios donde se lleva a cabo la construcción

[3] Los Conjuntos de Datos de Uso del Suelo y Vegetación, son los que presentan la distribución y localización a lo largo del territorio nacional de la vegetación y usos del suelo. La Serie V (Conjunto Nacional), contiene información del Uso del Suelo y Vegetación obtenida a partir de la aplicación de técnicas de fotointerpretación con imágenes de satélite Landsat TM5 seleccionadas del año 2011. Esta interpretación está apoyada con trabajos de campo realizado de abril a junio de 2012. Los Conjuntos de Datos contienen la ubicación, distribución y extensión de diferentes comunidades vegetales y usos agrícolas con sus respectivas variantes en tipos de vegetación, de usos agrícolas, e información ecológica relevante. Dicha información geográfica digital contiene datos estructurados en forma vectorial codificados de acuerdo con el Diccionario de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación Serie IV para la Escala 1:250 000 aplicables a las diferentes unidades ecológicas (comunidades vegetales y usos antrópicos) contenidos en el conjunto de dato, se generó durante el periodo 2011 - 2013, se derivó con base en la información presentada en la Serie IV de Uso del Suelo y Vegetación y actualizada con imágenes del satélite LANDSAT del año 2011. Se presenta en un conjunto nacional los 149 conjuntos de datos escala 1:250 000 del país.

de estructuras representa una de las actividades con mayor impacto en términos erosivos, debido al cambio drástico en la superficie tanto espacial como temporalmente.

Actividades forestales como la tala rasa, raleos y construcción de caminos, entre otras, representan una enorme alteración en el ciclo hidrológico, lo que se traduce en una disminución de la intercepción de copa y la capacidad de infiltración de los suelos, debido al uso de maquinaria pesada. Dichos disturbios generan gran cantidad de erosión y sedimentación. Actividades agropecuarias también provocan un daño permanente a los suelos, lo que se traduce en erosión y sedimentación. El sobrepastoreo no sólo disminuye la cubierta vegetal protectora de los suelos, sino que también compacta el suelo, produciendo más escurrimiento superficial y dando paso a distintos procesos erosivos. Por lo general, las prácticas agrícolas exponen el suelo al impacto de las gotas de lluvia, sumándose la erosión hídrica provocada por los canales de regadío (Figura 2.5) (UNESCO, 2010).

Figura 2.5. Actividades que provocan daño en los suelos. (A) Actividades del rubro agropecuario (Cultivos en Baja California, México, http://www.dupont.mx), (B) Tala rasa (Atlautla, Estado de México, http://edomexinforma.com/)

Los incendios forestales y algunas quemas controladas alteran fuertemente el ciclo hidrológico de las cuencas, disminuyendo la intercepción, exponiendo el suelo y creando muchas veces una capa hidrofóbica, la cual elimina la infiltración e incrementa el escurrimiento superficial, causando cuantiosos daños en los sectores más bajos de la cuenca.

2.2.1. Aspectos del Uso del Suelo en México.

A través de los años la cubierta vegetal de México ha presentado grandes cambios en su distribución original y en su composición florística, provocada por el cambio de uso del uso del suelo, en algunos casos drásticamente, sin embargo, si se lleva a cabo un análisis multitemporal se observarían principalmente aquellos que son ocasionados por la influencia del hombre, entre estos, la deforestación como uno de los más importantes. La deforestación actualmente continúa avanzando y la salud ecológica del país está más amenazada que nunca. Los patrones climatológicos son más erráticos, los desastres naturales son más frecuentes y severos, los bosques cada vez

están más fragmentados, por ende, muchos hábitats de especies animales están desapareciendo. (Rzedowski, 2006). Finalmente, todos estos cambios pueden asociarse al incremento significativo de las áreas urbanas y agrícolas desde 1980 a 2012 (Tabla 2.2).

CAMBIOS EN EL USO DE SUELO – MÉXICO 1978 - 2012					
CARTOGRAFÍA DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (INEGI)	SERIE I (km^2)	SERIE II (km^2)	SERIE III (km^2)	SERIE IV (km^2)	SERIE V (km^2)
Zona Urbana	1995.500	11150.063	12589.624	15958.109	18420.476
Acuícola	0.000	0.000	676.846	917.574	1060.728
Agricultura de Riego	74640.701	88176.471	91963.435	100129.691	102481.480
Agricultura de Temporal	185525.626	202585.006	213564.196	221458.369	223447.062
Total, Agricultura	260166.327	290761.477	305527.631	321588.061	325928.541

Tabla 2.2. Cambios en el Uso de Suelo – México 1978 – 2012. Con información de los conjuntos de datos de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250000, INEGI.

2.4. Tipo de Suelo

No todos los suelos son iguales en términos de su resistencia a la erosión. La erosibilidad de un suelo en particular está en función de variables como textura, contenido de materia orgánica, estructura y permeabilidad (R. P. C. Morgan, 2009). Algunas de estas características están descritas con mayor detalle en el capítulo 1, aquí se presentará un resumen de la importancia de estas variables en términos de la erosión.

La textura de un suelo es importante para definir su nivel de erodabilidad, pues no todas las clases texturales se erosionan con la misma facilidad. Son las partículas medianas las que más fácilmente se erosionan.

Si bien las partículas más finas son más livianas, éstas poseen una mayor superficie de contacto entre ellas y, por lo tanto, una mayor cohesividad, haciéndolas más resistentes a la erosión.

Por otro lado, las partículas más gruesas son más pesadas, lo que a su vez genera mayor resistencia a la erosión. Dejando a las partículas medianas de entre 0.1 a 1.0 mm la característica de ser las más erosionables, al no poseer cohesividad ni peso relevante.

Por las razones anteriores, la variable decisiva, en términos de la erosión con respecto a la textura del suelo, es el **porcentaje de limo**, pues dicha clase textural se encuentra entre las clases arcilla y arena.

Una característica de los suelos que aumenta sus propiedades contra la erosión (cohesividad interparticular) es el contenido de materia orgánica, ya que puede mejorar además la aireación e infiltración, facilita también el crecimiento vegetal mediante la adición de nutrientes en el suelo.

La estructura y permeabilidad de un suelo también juegan un rol preponderante en la determinación de la erosibilidad, debido a su influencia en la cohesividad de las partículas y la infiltración del agua entre los

conglomerados en cuestión. No olvidemos que la capacidad de infiltración de un suelo está en directa relación con la generación de escurrimiento superficial, responsable de la erosión laminar y otros procesos de erosión hídrica. Los suelos sin estructura definida, así como los suelos de estructura granular, por lo general poseen una alta capacidad de infiltración, es decir que son menos susceptibles a la erosión laminar. Por otro lado, los suelos de estructura masiva y plateada son más fáciles de erosionar, pues poseen tasas de infiltración menores (Garcia-Chevesich, 2009).

2.5. Geoforma y Topografía

La Geoforma se refiere a cualquier componente o rasgo físico de la superficie terrestre que ha sido formado por procesos naturales y que tiene una forma o cuerpo diferente. La topografía se refiere a la configuración de la superficie de la tierra descrita en cuatro categorías (FAO, 2006):

- La geoforma principal, que se refiere a la morfología de todo el paisaje
- La posición del sitio dentro el paisaje
- La forma de la pendiente
- El ángulo de la pendiente

Es por lo anterior que la topografía es una variable muy importante en la predicción de la erosión, factores como inclinación y largo de la pendiente determinan en gran medida la cantidad y velocidad del escurrimiento superficial generado por el producto de una tormenta dada. La distancia horizontal en la que viaja una partícula de suelo desprendida por el impacto de una gota de lluvia, está en directa relación con la inclinación de la pendiente.

Por otro lado, la longitud de la pendiente influye en la profundidad y, por ende, el poder erosivo del flujo superficial que se genere, siendo estas variables mayores en las secciones más bajas de la ladera, debido a una mayor área de contribución (R. P. C. Morgan, 2009).

2.5.1. Geoforma principal

Las geoformas se describen principalmente por su morfología y no por su origen genético o por los procesos responsables de su forma. La pendiente dominante es el criterio principal de diferenciación, seguido por la intensidad de relieve. La intensidad del relieve es la diferencia media entre el punto más alto y el más bajo en una distancia específica dentro el terreno. La distancia específica puede ser variable. La intensidad del relieve se da normalmente en metros por kilómetro. Cuando hay paisajes complejos, las geoformas sobresalientes deben tener al menos 25 m de alto (sino debe ser considerada como mesorelieve) excepto para las terrazas, donde las principales deben tener diferencias de elevación de por lo menos 10 m.

En áreas, las terrazas principales pueden estar cercanas unas a otras – particularmente en la parte baja de la planicie. Finalmente, los niveles más antiguos serian enterrados debido a las crecidas (FAO, 2006). En la tabla 2.4 se muestra la jerarquía de las geoformas principales.

1ER NIVEL	2DO NIVEL	GRADIENTE (%)	INTENSIDAD DEL RELIEVE (m km-1)
L tierras a nivel	**LP** planicie	< 10	< 50
	LL meseta	< 10	< 50
	LD depresión	< 10	< 50
	LV piso de valle	< 10	< 50
S tierras con pendiente	**SE** zona escarpada de gradiente medio	10 - 30	50 – 100
	SH colina de gradiente medio	10 – 30	100 – 150
	SM montaña de gradiente medio	15 - 30	150 – 300
	SP planicie disectada	10 – 30	50 – 100
	SV valle de gradiente medio	10 – 30	100 – 300
T tierras escarpadas	**TE** zona escarpada de gradiente alto	> 30	150 - 300
	TH colina de gradiente alto	> 30	150 - 300
	TM montaña de gradiente alto	> 30	> 300
	TV valle de gradiente alto	> 30	> 150

Tabla 2.4. Jerarquía de las geoformas principales (FAO, 2006).

2.5.2. Forma de la pendiente

El termino forma de la pendiente se refiere a la forma general de la pendiente en las direcciones vertical y horizontal (Figura 2.6); La tabla 2.5 presenta las clases de forma de pendiente.

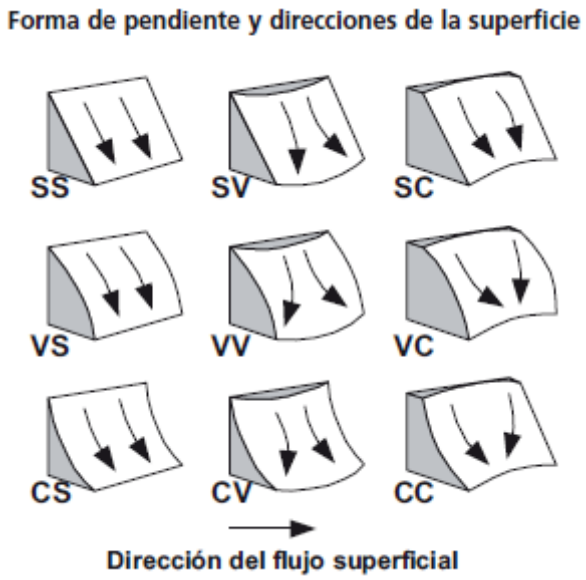


Figura 2.6. Forma de la pendiente y direcciones de la superficie (Schoeneberger, Wysocki, y Benham, 2012)

S	Plano
C	Cóncavo
V	Convexo
T	Terraceado
X	Complejo y/o irregular

Tabla 2.5. Clasificación de las formas de las pendientes (FAO, 2006)

2.5.3. Angulo de la pendiente (Gradiente y orientación de la pendiente)

El grado de la pendiente se refiere a la pendiente de la superficie alrededor del sitio; se mide usando un clinómetro dirigido en la dirección de la pendiente más empinada. Cuando no es posible la lectura del clinómetro se deben de integrar las estimaciones de campo con el grado de pendiente calculado a partir de las curvas de nivel presentes en un mapa topográfico.

Los gradientes de pendiente en terrenos casi planos son a menudo sobrestimados; mientras que, en planicies abiertas, los gradientes de 0,2 por ciento son claramente visibles. Es importante realizar un registro apropiado de las variaciones mínimas del grado de pendiente, especialmente para erosión, riego y drenaje. El grado de pendiente se determina de dos maneras: la primera y la más importante, es por medio de mediciones actuales en campo, y la segunda a través de la entrada en una de las siguientes clases; estas pueden requerir una de modificaciones para adecuarse a condiciones topográficas locales (Tabla 2.6).

CLASE	DESCRIPCIÓN	%
01	Plano	0.0 – 0.2
02	Nivel	0.2 – 0.5
03	Cercano al nivel	0.5 – 1.0
04	Muy ligeramente inclinado	1.0 – 2.0
05	Ligeramente Inclinado	2.0 – 5.0
06	Inclinado	5.0 – 10
07	Fuertemente inclinado	10 - 15
08	Moderadamente escarpado	15 - 30
09	Escarpado	30 - 60
10	Muy Escarpado	> 60

Tabla 2.6. Clases de Gradiente de la pendiente (FAO, 2006)

2.6. Velocidad del flujo

La velocidad del caudal influye fuertemente en la erosión hídrica. Se sabe que la velocidad mínima para desprender y transportar una partícula de suelo está en función del diámetro de ésta. Sin embargo, una vez que la partícula ha

sido desprendida, se necesitará menos energía para que ésta siga en movimiento. Así, Hjulstrom (1935) determinó la velocidad mínima requerida para el desprendimiento (erosión), transporte y depósito de partículas de suelo, según su diámetro, relación que se ilustra en la Figura 3.7. Nótese que se necesitan mayores velocidades para el desprendimiento de una partícula dada. Sin embargo, ésta será transportada en forma de suspensión, sólo si la velocidad del caudal es alta o, en su defecto, si la partícula posee un diámetro reducido. De lo contrario, dicha partícula será depositada en un corto lapso (UNESCO, 2010).

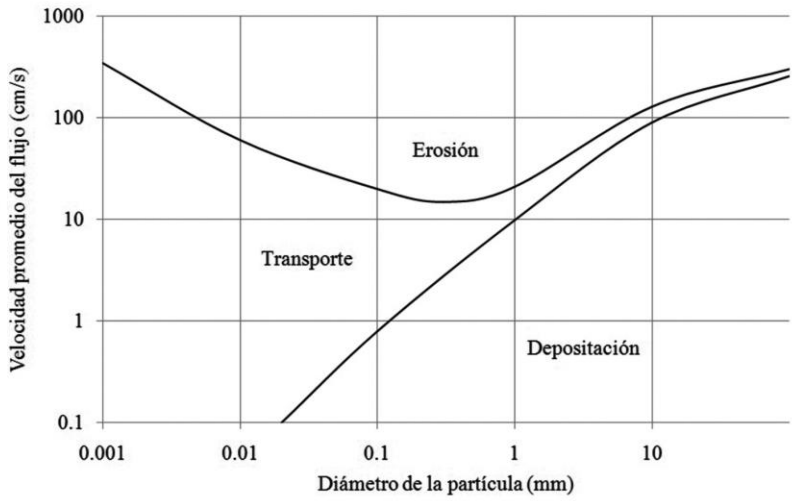


Figura 2.7. Diagrama de Hjulstrom, el cual indica la velocidad mínima requerida para desprender, transportar o depositar partículas de suelo, según su diámetro, para flujos de agua (UNESCO, 2010).

El tema central del presente trabajo se encamina a los efectos y la estimación de la erosión del suelo a causa del agua, es por esto que el presente capitulo describe a detalle los procesos, causas y efectos de la erosión hídrica, así como los modelos actuales para su estimación. La erosión hídrica es aquella en la cual los procesos de remoción el suelo y transporte son afectados por el agua (Alonso, Bermúdez, y Rafaelli, 2008). La erosión hídrica (Figura 3.1) incluye efectos externos como el deposito; otra gran categoría es el movimiento en masa del suelo como lo son derrumbes y deslizamientos de laderas (Figura 3.2).

Este tipo de erosión es uno de los procesos de degradación más importantes que afectan la capacidad de las tierras en pendiente para la producción de alimentos para el consumo humano o animal, además la presencia de las plantas y las primeras capas del suelo son imprescindibles para que el agua de las precipitaciones se infiltre, por lo que el aumento dela erosión significa siempre una disminución en la recarga de acuíferos (Escalante, 2005).

Figura 3.1. La erosión hídrica al presentarse sobre un suelo sin vegetación produce la disgregación de sus agregados; como resultado de lo anterior, las partículas de menor tamaño, como las arcillas y principalmente limos, quedan libres y desagregadas entre sí y con la materia orgánica. Estas partículas son arrastradas por el agua de lluvia del escurrimiento que no consigue infiltrarse en el suelo.

Se produce por dos mecanismos: el primero es por el impacto directo de las gotas de lluvia sobre la superficie del suelo, que produce la destrucción de los agregados o terrenos del suelo cuando este está desnudo; mientras que el segundo se genera por el escurrimiento superficial que arrastra partículas de suelo, materia orgánica, y nutrientes como el nitrógeno y fosforo provocando el empobrecimiento de este. Ambos dependen de la cantidad, duración, intensidad y frecuencia de las lluvias, así como de la época del año en que se presenten (Mendoza Pérez y Reyes Chávez, 2014)

Figura 3.2. (A) Deslizamientos de tierra en Santa Fe, Ciudad de México el 4 de noviembre de 2015, consecuencia de las fuertes lluvias (http://www.sinembargo.mx/04-11-2015/1540197), (B) Deslizamiento de la ladera derecha del río Grijalva en el estado de Chiapas, México, a causa de lluvias intensas asociadas al frente estacionario número 4 y la tormenta tropical Noel el 4 de noviembre de 2007. (Arvizu, 2009).

La figura 3.3 presenta la erosión hídrica potencial de suelos según el nivel de perdida de suelo.

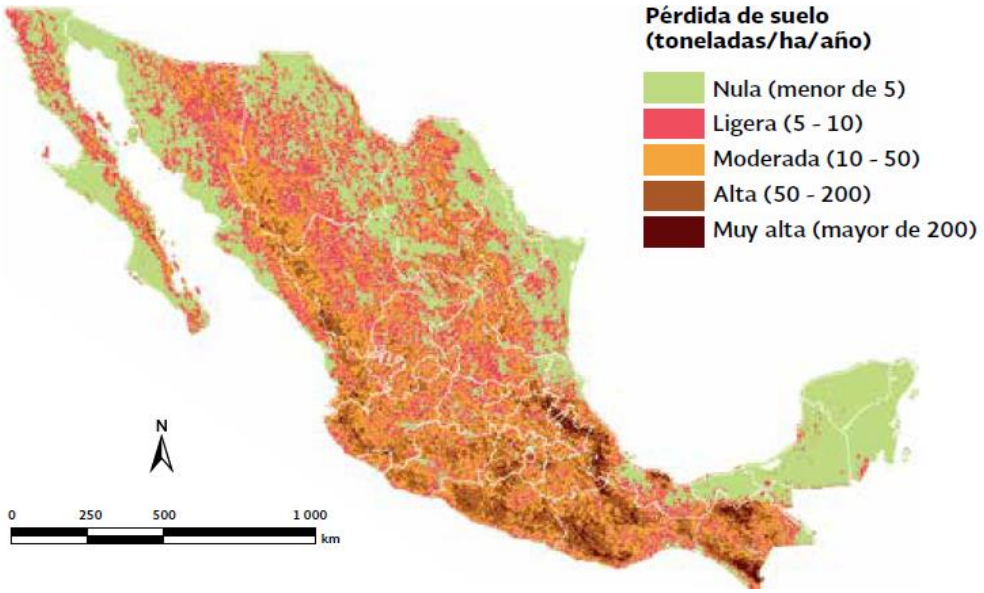


Figura 3.3. Erosión hídrica potencial de suelos según nivel, 2002. (SEMARNAT, 2013).

En el país la erosión hídrica abarca 22.73 millones de hectáreas que representan 11.9 % de la superficie total, de las cuales el 56.4 % se encuentra en nivel ligero, 39.7 % en nivel moderado, 3.7 % en fuerte y 0.2 % en extremo (Figura 4.4). De los tipos de erosión que se presentan 1.4 % del territorio es afectado por deformación del terreno, 10.5 % por pérdida de suelo superficial y 0.03 % se da fuera de sitio. El estado más afectado es Guerrero ya que el 31.8 % de su superficie presenta erosión hídrica (Mendoza Pérez y Reyes Chávez, 2014).

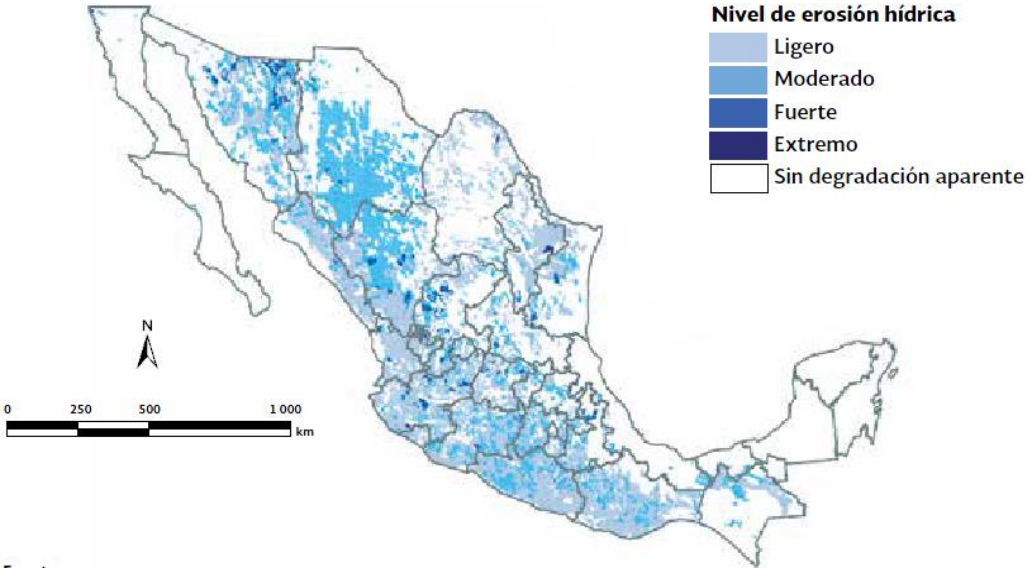


Figura 3.4 Erosión hídrica de suelos según nivel en México, 2002. (SEMARNAT, 2013).

3.1. Tipos de erosión hídrica

Algunas formas de la erosión hídrica son (Tayupanta J, 1993):

Erosión por impacto. Consiste en la dispersión de los agregados del suelo debido al impacto de las gotas de lluvia sobre la superficie del terreno; la cantidad del suelo erosionado depende de la clase de suelo y de la pendiente.

Erosión laminar. Es la remoción más o menos uniforme del suelo, en capas delgadas, provocada por la saturación del suelo y deslizamiento superficial por la pendiente. Este tipo de erosión se da más frecuentemente en suelos arenosos y en menor escala en los arcillosos. Se presentan como manchas aisladas con coloraciones diferentes al tipo de suelo original y con una capa arable reducida (Figura 3.5).

Erosión en canales. Esta forma de erosión ocurre en la mayoría de los suelos y con frecuencia es subestimada por los agricultores debido a que puede ser borrada fácilmente al realizar las labores agrícolas. Se presenta cuando el escurrimiento se concentra en pequeñas irregularidades naturales o inducidas en la superficie del terreno hasta que adquiere volumen y velocidad suficientes para deslizarse por la pendiente, formando en su recorrido cortes en forma de canalillos y canales que pueden observarse a simple vista (Figura 3.6)

Figura 3.5. Erosión laminar. Conca de Tremp, España (J. Porta, 2003).

Figura 3.6. Erosión en canales. (http://semillas.org.co/es).

Erosión de cárcavas y zanjas. Las cárcavas son canales profundos de paredes empinadas; se observan con mayor frecuencia en suelos profundos y frágiles, producidas por un desprendimiento del suelo a causa del flujo del agua e inestabilidad de la pendiente.

Cuando hay una gran concentración de escurrimiento, en determinadas zonas del terreno, las cárcavas van ampliándose en ancho y profundidad año tras año, dividiendo los campos y obstaculizando las labores agrícolas (Figura 3.7).

Existe también el proceso donde la cárcava alcanza cierta profundidad y adquiere forma de cascada produciendo que el flujo sea turbulento en la base de la misma, generando el desprendimiento de bloques de suelo, incrementando el tamaño de la cárcava.

Figura 3.7. Grave cárcava en terreno de cultivo de la Universidad Estatal de Washington (Jack Dykinga, 2013).

3.2. Inestabilidad de laderas

Existen diferentes tipos de deslizamientos que van desde caídas de rocas hasta flujos de lodo, las razones principales para esto son las pendientes altas y los lugares que han presentado estos problemas aunado a la erosión hídrica.

Así los procesos de remoción en masa o deslizamientos se definen como:

Movimiento descendente de un volumen de material constituido por roca, suelo o por ambos. (Cruden,1991). Otra definición la da (Varnes, 1978) como un fenómeno de remoción en masa y se clasifica y describe mediante dos términos:

1. Tipo de movimiento
2. Material

Entonces los procesos de remoción en masa son flujos de detritos, deslizamiento de barro, caídas o desprendimiento de roca, etc.

3.2.1. Clasificación de los procesos de deslizamiento (Procesos de remoción en masa).

Basado en el tipo de movimiento y en la naturaleza del material involucrado se tiene la siguiente clasificación (Tabla 3.1 y Figura 3.8).

TIPO DE MOVIMIENTO	TIPO DE MATERIAL		
	ROCA	GRANO GRUESO (DERRUBIOS)	GRANO FINO (SUELO)
Caídas / Desprendimientos	Caída o desprendimiento de roca	Caída o desprendimiento de derrubios	Caídas o desprendimiento de suelos
Desplomes / Vuelcos	Vuelco / Desplome de roca	Vuelco / desplome de derrubios	Vuelco / desplome de suelo
Deslizamientos (rotaciones – traslaciones)	Deslizamiento de roca	Deslizamientos de derrubios	Deslizamiento de suelo
Desplazamiento laterales	Desplazamientos laterales en rocas	Desplazamientos laterales en derrubios	Desplazamientos laterales en suelos
Flujos	Flujo de roca	Flujo de detrito	Flujo de tierra
Combinados	Combinación de dos o más tipos de movimiento		

Tabla 3.1. Tipos de deslizamientos de suelo y procesos (Varnes, 1978)

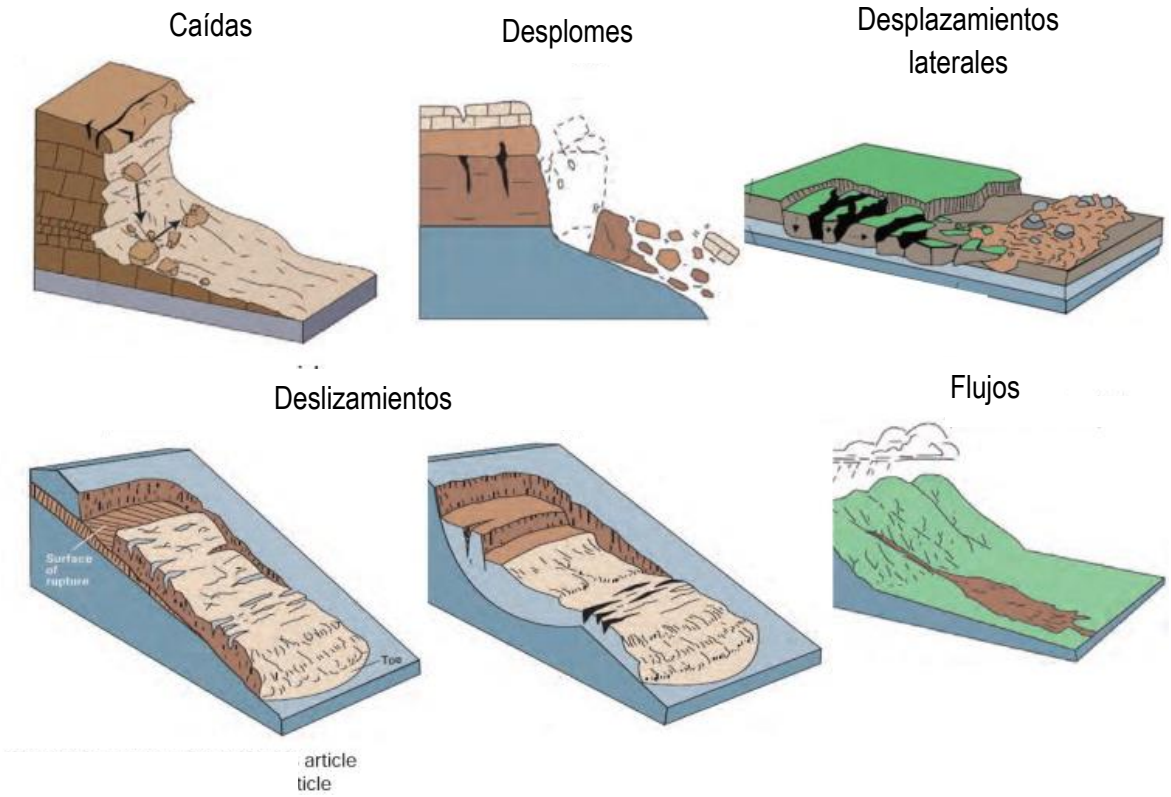


Figura 3.8. Clasificación de tipos de movimiento (Varnes, 1978).

3.2.2. Factores que influyen en el deslizamiento

Es poco común que un solo factor actué provocando un movimiento de suelo, más bien el deslizamiento es la combinación de factores desencadenantes que a la vez activan el proceso. Dependiendo de cada situación un mismo factor puede actuar como condicionante o desencadenante. Uno de estos factores es la precipitación y por ende el potencial erosivo de esta.

Otros factores son:

- Geológicos (litológicos)
- Estructurales
- Climáticos
- Hidrológicos
- Topográficos
- Vegetación

En la siguiente tabla (Tabla 3.2) se muestran los factores desencadenantes naturales y los factores desencadenantes inducidos (antrópicos):

FACTORES DESENCADENANTES NATURALES	FACTORES DESENCADENANTES INDUCIDOS (ANTRÓPICOS)
Fuertes precipitaciones	Aumento del peso del talud por acumulación de escombros o construcciones
Inundaciones	Excavaciones con retirada de materiales del pie de talud
Socavamiento y erosión fluvial	Creación taludes artificiales
Erupciones Volcánicas	Inundaciones causadas por roturas de presas
Terremotos	Estancamiento de agua por impermeabilización y asfalto o por excesos de riego
Cambio de Volumen (hielo – deshielo)	Deforestación de taludes
	Explosiones realizadas en la construcción de carreteras y minas

Tabla 3.2. Factores desencadenantes. Factor desencadenante = estimulo externo que causa la rotura casi inmediata, aumentando las tensiones o reduciendo la resistencia del material de la ladera (Varnes, 1978).

En conclusión, se ha observado que lluvias de gran intensidad y corta duración provocan deslizamientos superficiales, flujos y desprendimientos, episodios de lluvia de baja intensidad a moderada por días o semanas provoca deslizamientos rotacionales, traslacionales y flujos de barro.

Los episodios estacionales e interanuales anormalmente húmedos producen reactividad en grandes deslizamientos, y por último los desprendimientos se relacionan con la precipitación débil en conjunto con múltiples factores, como la penetración de raíces o indicios de meteorización.

3.3. Estimación de la erosión a partir de modelos.

Algunas veces la forma más sencilla de calcular el efecto de un proceso físico consiste en utilizar una ecuación establecida, fórmulas o diagramas. La tendencia actual es la de recurrir a todos esos medios auxiliares y modelos de soluciones, los que tienden a ser cada vez más complicados y, consecuentemente, dependen de las computadoras para llevar a cabo los procesos matemáticos. El cálculo de la pérdida de suelo es considerablemente difícil, porque existen muchas variables que se producen naturalmente, como el suelo y la lluvia, o las prácticas agrícolas utilizadas. Como resultado de ello, los modelos, ya sean empíricos o científicos, son forzosamente complejos si se quiere que incluyan el efecto de todas las variables (FAO, 1997).

Existen diferentes tipos de modelos, algunos de los más usados son los modelos empíricos, estos se basan en la observación y/o experimentación, obteniendo mediciones de esto, la mayoría de las veces no derivan de la teoría.

Estos modelos permiten predecir lo que sucederá en algún momento por las circunstancias que se presenten, al hacer una inferencia de los hechos que han ocurrido con las características específicas.

En términos de confiabilidad, está relacionada completamente con la base de datos experimentales. Una solución empírica puede ser una sencilla relación aproximada o una compleja ecuación de regresión múltiple. La comparación del cálculo obtenido con un método empírico con el obtenido con otro método empírico, sin nuevos datos experimentales, es totalmente infructuosa y poco científica; por ejemplo, la comparación del índice de erosión, EI_{30} con otro cálculo empírico de la erosionabilidad. El fundamento y el punto de partida de todo estudio empírico deben ser las mediciones físicas (FAO, 1997).

Otros modelos utilizados son los modelos de factores, ejemplo de este es la Ecuación Universal de Perdida de Suelo. Estos son modelos empíricos en donde cada variable está representada por un factor que es cuantificado, para finalmente combinarlos. También existen los denominados modelos de caja negra, donde se aporta determinada información obteniendo un resultado, sin el conocimiento de los procesos que llegaron a este. Es importante mencionar que dichos modelos solo son aplicables en una dirección.

Un modelo basado en procesos (denominado también modelo de componente analítico) puede explicar matemáticamente cada uno de los procesos físicos separados y luego agrupar los efectos separados. Como hay muchas variables y muchos cálculos matemáticos, esos modelos sólo se pueden utilizar con la ayuda de equipos computacionales. Los modelos estocásticos son particularmente útiles en los estudios hidrológicos y se basan en las probabilidades de que sucedan acontecimientos en una larga serie temporal.

Se han creado modelos empíricos a partir de una base de datos experimentales obtenidos en determinadas condiciones, y se espera que el modelo funcione en esas condiciones. Ningún modelo puede ser nunca auténticamente universal, y hasta los modelos basados en procesos necesitan parámetros de corrección para las condiciones específicas de un lugar. Lo ideal sería que cada país o región diseñara sus propios modelos de predicción para que se ajusten a sus propias condiciones y a sus bases de datos (FAO, 1997).

A continuación, se muestran la descripción de algunos de los modelos utilizados en la práctica de estimación de perdida de suelo.

WEPP (Water Erosion Prediction Project).

El Proyecto de Predicción de Erosión Hídrica (WEPP) (Nearing, Foster, Lane, y Finkner, 1989) es un programa computacional que, en comparación a la USLE, promete un mejor plan de conservación, mejor planeación de proyectos, un óptimo inventario de recursos y asesoría. Ayuda a los usuarios en la selección de mejores prácticas de control de la erosión, en la localización de sitios para mejores proyectos y en la evaluación de erosión y sedimentación en áreas específicas.

Es aplicable en cuencas pequeñas y puede simular desde pequeñas secciones hasta grandes extensiones. Simula los procesos naturales que son importantes en la erosión de suelos. El modelo WEPP incluyen una serie de componentes conceptúales utilizados para predecir y calcular estas estimaciones de desprendimiento de suelo y deposito: Clima, invierno, riego, hidrología, balance hídrico, suelos, crecimiento de la planta, manejo de residuos,

descomposición de residuos, impactos de la labranza en la infiltración, erodabilidad, erosión, depósito y sedimentación.

CREAMS (A field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems).

CREAMS (Knisel, 1980) es un modelo escalar de campo creado para predecir el escurrimiento, la erosión y el transporte químico que vienen de los sistemas de producción agrícola. Es aplicable en áreas con superficie medida. CREAMS puede operar en trenes de tormenta o eventos individuales, pero también puede predecir promedios a largo plazo, de 2 a 50 años. Muchas de las ecuaciones desarrolladas por este modelo han sido usadas y modificadas dentro del modelo WEPP.

SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins).

Este simulador provee un cálculo eficiente de la producción de sedimentos en cuencas complejas de todo tamaño. Está diseñado para simular 100 o más años. El modelo simula la hidrología, sedimentación y transporte de nutrientes y pesticidas en la cuenca. Opera en una escala continua de tiempo y permite la subdivisión de cuencas para marcar las diferencias de suelo, uso del suelo, precipitación, etc. Los principales procesos que incluye el modelo son: escurrimiento superficial, percolación, escurrimiento subsuperficial, evapotranspiración, pérdidas por filtración en cauces, balance de agua en almacenamientos, sedimentación, plaguicidas, ciclo de nutrientes y crecimiento de cultivos. Un generador climático asigna la precipitación, temperatura y radiación solar para ser simulados cuando las mediciones de datos no están disponibles.

El modelo de precipitación se basa en un modelo de cadena de Markov de primer orden, mientras que la temperatura del aire y la radiación solar son generadas a través de una distribución normal. La predicción de sedimentos está basada en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE). La producción de nutrientes fue tomada del modelo EPIC (Williams, 1990). El componente de pesticidas es una modificación del modelo de CREAMS (Knisel, 1980). El volumen del escurrimiento superficial se predice utilizando el método de la curva numérica (USDA, 1972) como una función del contenido diario de humedad del suelo.

ANSWERS (Areal Nonpoint Source Watershed Enviroment Response Simulator).

ANSWERS (Beasley y Huggins, 1981), simula el funcionamiento de cuencas en tierras agrícolas, predice la erosión causada por usos específicos de tierras y prácticas de manejo, y proporciona un análisis de calidad de agua asociado con los químicos sedimentados. Su componente de erosión es muy similar al del modelo CREAMS.

AGNPS (Agricultural Nonpoint Source Pollution Model).

AGNPS (Young, Onstad, Bosch, y Anderson, 1989) Este modelo simula el escurrimiento superficial, sedimentación y el transporte de nutrientes provenientes de cuencas agrícolas. Los nutrientes considerados incluyen nitrógeno y fósforo, ambos nutrientes esenciales para las plantas, son los mayores contribuyentes en la eutrificación del agua superficial.

El modelo fue desarrollado para el análisis de la contaminación de terrenos agrícolas sin punto de fuente. Los componentes básicos del modelo son: hidrología, erosión y transporte de químicos y sedimentos. La erosión y el transporte de sedimentos son estimados usando una modificación de la ecuación universal de pérdida de suelo USLE (Wischmeier y Smith, 1978). El sedimento se envía de celda a celda a través de la cuenca hacia la salida usando una relación de transporte de sedimento y deposito descrita por Foster et al (1981), basada en una ecuación de continuidad en estado constante. El transporte químico se calcula sobre la base de las relaciones adaptadas por CREAMS y un modelo de evaluación de parcelas de alimentación (Young et al, 1982).

EUROSEM (EUROpean Soil Erosion Model).

EUROSEM (EUROpean Soil Erosion Model) En el Taller de la comunidad europea llevado a cabo en Bruselas en 1986 se reconoció la necesidad de un enfoque alternativo para el modelaje de la erosión de suelos, cuando (R. Morgan et al., 1998) propusieron una estructura para un modelo europeo basado en la mejor investigación europea sobre procesos de erosión y su control. Una de las recomendaciones del taller fue que los científicos europeos deberían "Tratar de desarrollar un nuevo modelo general de erosión para ser usado en los países de la comunidad europea con el objeto de evaluar los riesgos de erosión y diseñar las medidas de control de erosión" (R. Morgan et al., 1998). Fue en ese contexto que se creó el modelo europeo de pérdida de suelo (EUROSEM) el cual es un modelo distributivo y dinámico, capaz de simular el transporte de sedimentos, erosión y deposito sobre la superficie terrestre por procesos erosivos en canales en lluvias individuales, tanto para parcelas como para pequeñas cuencas.

La simulación de erosión de EUROSEM está ligada con la estructura del curso del flujo de agua y sedimentos del modelo KINEROS (Woolhiser, Smith, y Goodrich, 1990). También ha sido ligada con el modelo MIKE SHE (Danish Hydraulic Institute, 1993), el cual es un modelo de simulación continua y es una extensión del modelo original Systéme Hydrologique Européen (SHE) (Danish Hydraulic Institute, 1985; Abbott et al. 1986).

USLE (Universal Soil Loss Equation).

Los procedimientos elaborados en los Estados Unidos de América se fundan en una amplia base de datos procedentes de investigaciones; existe siempre una gran tentación de aplicarlos en países que no disponen de tiempo ni de recursos para acumular datos suficientes para crear variaciones locales. Cierto volumen de extrapolación puede ser útil y, por ejemplo, se pueden tomar prestados algunos componentes de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo, siempre que se actúe con cautela. Las posibilidades y los peligros de transferir la tecnología de los Estados Unidos sobre la predicción de la erosión han sido cuidadosamente estudiados (Wischmeier y Smith, 1978).

La Ecuación Universal de pérdida de suelo, fue originalmente desarrollada por Wishmeier a partir de la década de los 40 y complementada por él mismo y Smith en 1965 cuando le aumentaron los factores de manejo del cultivo y del terreno. Fue diseñada para propósitos de planeación y para predecir el impacto del uso de la tierra en la erosión del suelo. En su origen fue desarrollada por Wishmeier para calcular promedios de suelo perdido anualmente por hectárea, ahora se han hecho modificaciones para poder hacerlo mensual o incluso por tormenta.

3.5. Tolerancias y niveles de la pérdida de suelo.

La tolerancia a la pérdida de suelo es la cantidad de tierra que, expresada en toneladas por unidad de superficie y año, puede perder un perfil edáfico manteniendo su nivel de productividad actual durante un largo periodo de años. Es decir, la cantidad de suelo admisible refleja la máxima pérdida de suelo admisible con un grado de conservación tal que mantenga una producción económica similar, con los medios técnicos disponibles en la actualidad (FAO, 2016b). El establecimiento de la tolerancia a la pérdida de suelo ha sido generalmente una cuestión de juicios multidisciplinares en tanto que factores físicos, como económicos se han manejado. Así, al establecer los límites de pérdidas que se pueden tolerar se suelen tener en cuenta las siguientes consideraciones:

1.- Mantener un espesor adecuado del suelo favorable para la producción agrícola y forestal durante largo tiempo. Tener presente el efecto de la erosión sobre los rendimientos de los cultivos en los suelos.

2.- Las pérdidas habrán de ser menores que aquellas que provocasen formación de surcos y cárcavas.

3.- Las pérdidas habrán de ser también inferiores a las que causarían un considerable aterramiento en los cauces de desagüe, cunetas de carretera, etc.

4.- Las pérdidas no deben llegar al punto de que por erosión o aterramiento las semillas de cultivos corran el riesgo de perderse.

Resulta de importancia conocer la tolerancia de un suelo a las pérdidas, esto ayuda a definir los efectos que la erosión está ocasionando en la zona. En general estos límites de tolerancia se han definido, una vez analizados los suelos, de un modo consensuado y bajo recomendaciones. No obstante, es evidente que la tolerancia a las pérdidas de suelos con las premisas sentadas anteriormente, depende de las propiedades del suelo en sí mismo.

La degradación del suelo se calcula como porcentaje sobre unidad de área; a su vez se divide de acuerdo con su intensidad en ligera, moderada, severa y extrema (Figura 3.8) (CONAFOR, 2004). A continuación, se presenta la descripción de cada uno de los niveles:

Degradación ligera: Degradación del suelo apenas perceptible y donde se ha perdido hasta 25 % de la capa superficial, pero de 10 % a 20 % de la superficie total presenta problemas de canalillos y cárcavas pequeñas. Se nota alguna reducción en su productividad.

Degradación moderada: Presenta erosión en canalillos, canales y cárcavas pequeñas; se ha perdido de 26 % a 50 % de la capa superficial. Puede presentar niveles de degradación ligera o extrema en 10 % de la superficie total. Se observa una marcada reducción de su productividad.

Degradación severa o fuerte: Se presentan pérdidas de entre 51 % y 75 % de la capa superficial del suelo; ocurre en manchones de material consolidado, tipo tepetate o afloramientos rocosos, así como cárcavas de todos

tamaños; presenta niveles con degradación ligera o moderada en 25 % del área total. Se pueden considerar con productividad irrecuperable.

Degradación extrema: Presenta pérdidas superiores a 75 % de la capa de suelo superficial, con cárcavas profundas; es prácticamente imposible recuperarlo en el mediano plazo. Se pierde la productividad de los terrenos.

Figura 3.8. Nivel de Degradacion del suelo (SEMARNAT 2016).

3.6. Ecuación Universal de Perdida de Suelo (USLE).

La Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (USLE), desarrollada en los años 70 (Wischmeier y Smith, 1978), es ampliamente utilizada en el mundo, incluso en los trópicos. La USLE, que calcula la pérdida de suelo promedio anual en laderas bajo usos y manejos de suelo específicos, es una ecuación estocástica, dado por el producto de seis factores independientes (UNESCO, 2010).

Conocida la gran incidencia de la erosión hídrica sobre la degradación del suelo, es importante medir sus efectos, como de predecir las pérdidas que se producirán a partir de unas circunstancias dadas. Los distintos métodos

utilizados con este fin pretenden ser eficientes al tiempo que universales, e intentan evitar problemas derivados de su aplicación a ámbitos diferentes a los de sus formulaciones originales, destacando la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) como herramienta básica empleado en la mayoría de los trabajos, la estructura general del modelo se muestra en la figura 3.9.

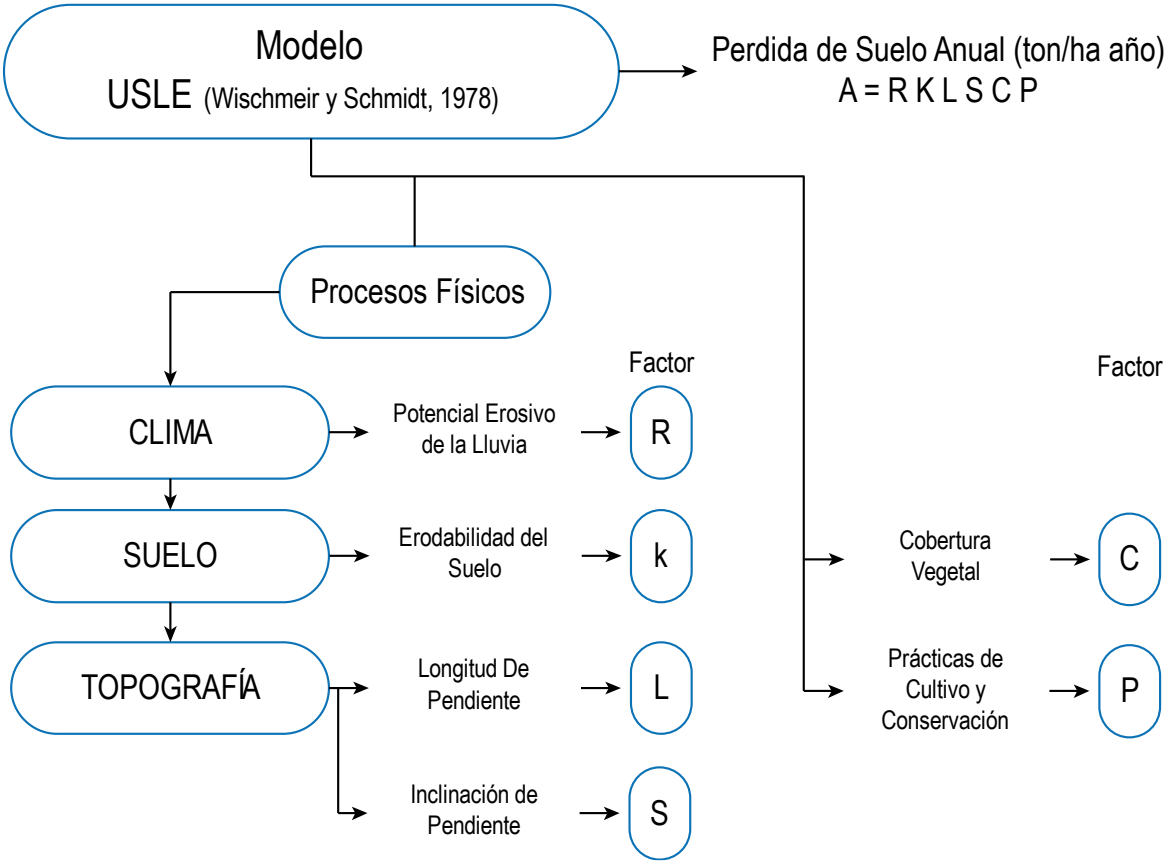


Figura 3.9. Estructura general del modelo USLE (Wischmeier y Smith, 1978).

Por tanto, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) es:

$$A = R \cdot K \cdot SL \cdot C \cdot P \tag{3.1}$$

Donde:

A Pérdida de suelo anual (ton/ha)

R Factor que mide el potencial erosivo de la lluvia (N/h)

K Factor que toma en cuenta el tipo de suelo (ton-h/N-ha)

SL Factor de longitud y pendiente de la cuenca (adimensional)

C Factor de cobertura vegetal (adimensional)

P Factor de prácticas de cultivo y conservación de suelo (adimensional)

En la literatura se pueden encontrar diferencias en la estimación de la erosión de suelos A y el aporte de sedimentos AS. El primero corresponde a la cuantificación del material sólido que se pone en movimiento debido a la erosión hídrica en un cierto periodo de tiempo. En tanto que el segundo corresponde al material solido real que aporta la cuenca a su salida considerando el redepósito así (Escalante, 2005):

$$AS = DR \cdot A \tag{3.2}$$

Donde:

AS Aporte de sedimentos (ton/ha)

DR Relación de entrada de sedimentos

$$DR = 0.417662 \cdot Area^{-0.134958} - 0.127097 \tag{3.3}$$

Donde:

$Area$ Superficie de la cuenca analizada (millas cuadradas)

3.6.1. Potencial erosivo de la lluvia. Factor "R"

El Factor R se define como la fuerza que tiene la lluvia para erosionar un tipo de suelo; una lluvia ligera y prolongada puede tener la misma energía que una precipitación de corta duración y mayor intensidad. Su cálculo se obtiene con la expresión (Escalante, 2005) :

$$R = 1.702\left(\frac{\left[\sum 1099(1 - 0.72\exp^{-1.27\,I_j})(I_j T_j)\right] I_{30}}{100}\right) \tag{3.4}$$

Donde:

R Potencial erosivo de la lluvia (N/h).

$I_j T_j$ Intensidad de la precipitación (plg/h) para un incremento de tiempo específico T_j (horas).

I_{30} Intensidad máxima de la tormenta en 30 minutos (plg/h)

En la expresión anterior es necesario conocer la distribución de la tormenta en estudio para diferentes duraciones, así como la intensidad máxima para una duración de 30 minutos I_{30}, por lo que se vuelve necesario tener el registro pluviográfico o contar con la curva masa (Reyes, Escalante, y Mendoza, 2014). La ecuación (3.4) se sustenta en el análisis de las lluvias acumuladas en 24 h; esto permite obtener los valores del coeficiente R para la obtención del potencial erosivo de la lluvia R en sitios que solo cuentan con información pluviométrica utilizando la metodología descrita en (Escalante, 2005).

3.6.2. Erodabilidad del suelo. Factor "K".

El factor K indica el grado de susceptibilidad o resistencia de un horizonte específico del suelo a la erosión. La erodabilidad del suelo es una propiedad compleja y se concibe como la facilidad con la cual es desprendido por:

1. El salpicado de las gotas durante un evento de lluvia.
2. El flujo superficial.
3. Por la acción de ambos fenómenos en conjunto.

Sin embargo, desde un punto de vista cuantitativo, la erodabilidad del suelo puede entenderse como el cambio en la pérdida de suelo por unidad de fuerza o energía externa aplicada (Montes-León, Uribe-Alcántara, y García-Celis, 2011). Tradicionalmente, la metodología usada para la determinación de dicho factor es un nomograma (Wischmeier y Smith, 1978) mostrado en la figura 3.10, el cual toma en cuenta ciertas propiedades del suelo, como contenido de materia orgánica, contenido de arenas, contenido de limos, estructura y permeabilidad, entre otras.

CONAGUA (1966) enlista los valores generales del factor K (tabla 3.3), a partir del contenido de materia orgánica.

	CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA		
Textura	**0.5%**	**2.0%**	**4.0%**
Arena	0.066	0.040	0.026
Arena fina	0.211	0.184	0.132
Arena muy fina	0.553	0.474	0.369
Arena migajonosa	0.158	0.132	0.105
Arena fina migajonosa	0.316	0.263	0.211
Arena muy fina migajonosa	0.579	0.500	0.395
Migajón arenoso	0.356	0.316	0.250
Migajón arenoso fino	0.461	0.395	0.316

Tabla 3.3. Valores generales del factor K. (CONAGUA, 1966).

	CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA		
Textura	**0.5 %**	**2.0 %**	**4.0 %**
Migajón arenoso muy fino	0.619	0.540	0.435
Migajón	0.500	0.448	0.382
Migajón limoso	0.632	0.553	0.435
Limo	0.790	0.685	0.553
Migajón arcilloso arenoso	0.356	0.329	0.277
Migajón arcilloso	0.369	0.329	0.277
Migajón arcilloso limoso	0.487	0.421	0.342
Arcilla arenosa	0.184	0.171	0.158
Arcilla limosa	0.329	0.303	0.250
Arcilla	-	0.171-0.382	-

Tabla 3.3. (Continuación) Valores generales del factor K. (CONAGUA, 1966).

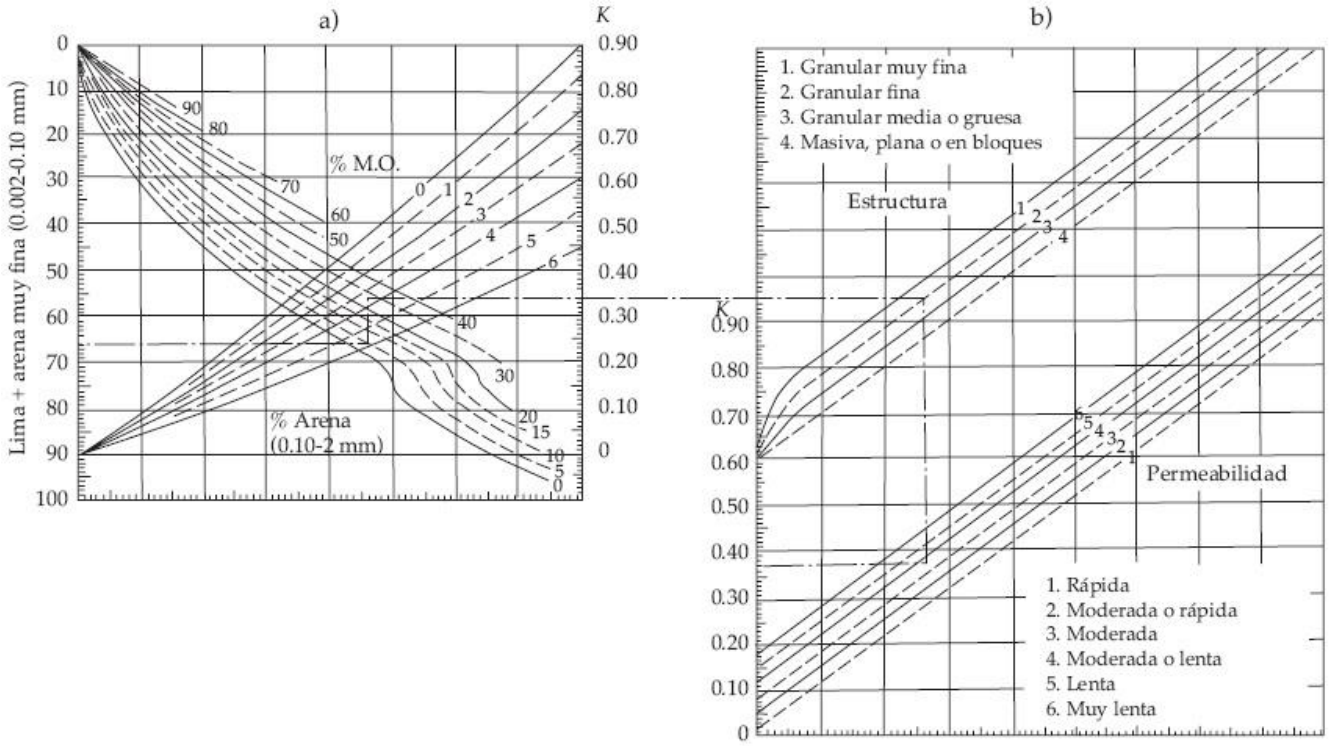


Figura 3.10. Nomograma de Wischmeier y Smith para el cálculo del factor K (Renard, 1997).

Para Williams (1995) el valor del Factor K de acuerdo con la clasificación del tipo de suelo y de su textura superficial (gruesa, media o fina) se calcula siguiendo las siguientes ecuaciones:

$$K_{USLE} = f_{csand} * f_{cl-si} * f_{orgc} * f_{hisand} \quad (3.5)$$

Donde:

$$\mathrm{f_{csand}} = \left(0.2 + 0.3 * \exp\left(-0.256 * m_s * \left(1 - \left(\frac{m_{silt}}{100}\right)\right)\right)\right) \tag{3.6}$$

$$\mathrm{f_{cl-si}} = \left(\frac{m_{silt}}{m_c + m_{silt}}\right)^{0.3} \tag{3.7}$$

$$\mathrm{f_{orgc}} = 1 - \left(\frac{0.25 * orgC}{orgC + \exp(3.72 - 2.95 * orgC)}\right) \tag{3.8}$$

$$\mathrm{f_{hisand}} = 1 - \left(\frac{0.7 * \left(1 - \left(\frac{m_s}{100}\right)\right)}{\left(1 - \left(\frac{m_s}{100}\right)\right) + \exp\left(-5.51 + 22.9 * \left(1 - \left(\frac{m_s}{100}\right)\right)\right)}\right) \tag{3.9}$$

Los términos m_s, m_{silt}, m_c y $orgC$ son el porcentaje de arenas, limos, arcillas y carbono orgánico respectivamente, los cuales dependen del tipo de suelo. Estos datos se obtienen de la información disponible a través del Mapa Mundial de Suelos de la FAO/UNESCO (http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116).

3.6.3. Factor Topográfico Longitud - Pendiente. Factor "SL".

El efecto de la topografía sobre la erosión está representado por los factores: longitud (L) y grado de pendiente (S). La longitud L se define como la distancia desde el punto de origen de un escurrimiento hasta el punto donde decrece la pendiente, al grado de que ocurre una sedimentación o bien hasta el punto donde el escurrimiento una vez concentrado, encuentra un canal de salida bien definido.

En general, el escurrimiento superficial se concentra en longitudes inferiores a 120 m, por lo que en muchas situaciones este valor constituye un umbral límite para los análisis de predicción de la erosión. En algunas ocasiones se usan pendientes hasta de 300 m, pero no se recomienda usar distancias mayores a ésta en USLE. Las longitudes de pendientes estimadas en mapas topográficos son normalmente muy largas, pues dichos mapas no tienen la resolución suficiente para indicar las áreas de flujo concentrado que determinarían las longitudes de pendiente(Montes-León et al., 2011). La figura 3.11 muestra algunas longitudes típicas de pendientes.

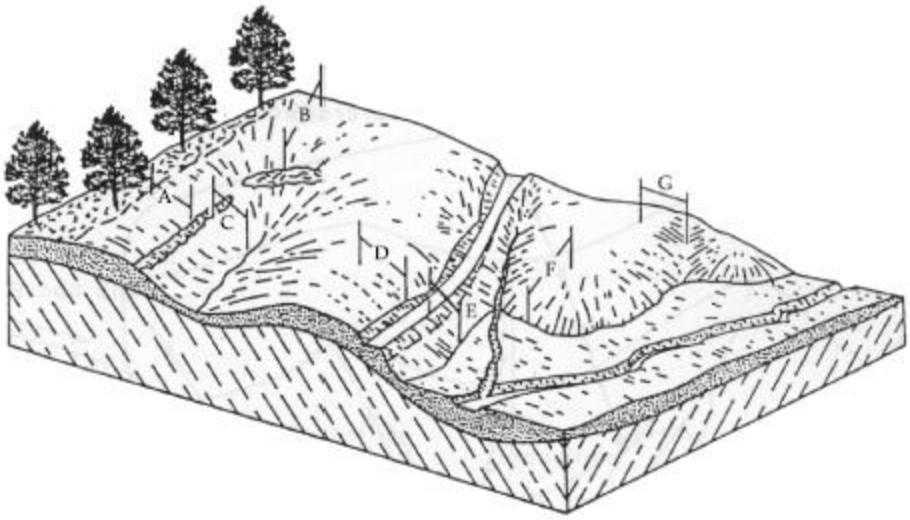


Figura 3.11. Formas de determinar el factor SL (Renard, 1997).

En la figura 5.41 se esquematizan las formas de determinar el factor SL, estas son (Renard, 1997):

- Pendiente (A) si un suelo de bosque no distribuido en la parte alta no produce escurrimiento superficial, el límite superior de la pendiente comienza en la orilla de este y se extiende pendiente abajo hasta donde exista una condición de flujo concentrado.
- Pendiente (B) punto de origen del escurrimiento hasta la zona de flujo concentrado
- Pendiente (C) de un punto a otro punto de concentración.
- Pendiente (D) del punto de origen del escurrimiento de una carretera que concentra el escurrimiento.
- Pendiente (E) de la carretera a una planicie de inundación donde ocurriría el depósito.
- Pendiente (F) en la nariz de un cerro desde el punto de origen del escurrimiento hasta la planicie de inundación.
- Pendiente (G) desde el punto de origen del escurrimiento hasta una ligera depresión donde se concentra el flujo.

El factor de grado de pendiente (S) refleja la influencia del ángulo de la misma en la erosión. La pendiente puede ser determinada usando mapas topográficos con curvas a nivel equidistantes, o en el mejor de los casos, utilizando un Modelo Digital de Elevaciones (MDE).

El factor L y S son considerados los parámetros más críticos en la USLE, por ende, varios investigadores (Quinn et al. (1991); McCool et al. (1989)) han hecho modificaciones a las ecuaciones originales del factor de Foster y Wischmeier (1974). En el presente trabajo se adopta el método desarrollado por Desmet y Govers (1996) para una superficie de dos dimensiones a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) siguiendo la ecuación (3.10):

$$L_i \cdot S_i = S_i \frac{(A_i + D^2) - A_i^{m+1}}{D^{m+2} \cdot x_i^m \cdot 22.13^m} \tag{3.10}$$

Donde:

S_i El grado de pendiente por cada celda calculado en función de los siguiente:

$S_i = 10.8 \cdot \sin(\theta) + 0.03$, cuando la pendiente es $< 9\%$

$S_i = 16.8 \cdot \sin(\theta) - 0.50$, cuando la pendiente es $\geq 9\%$

A_i Área de contribución (m^2) en la celda i, calculado con algoritmos disponibles en los Sistemas de Información Geográfica (SIG)

D La dimensión lineal de las celdas del MDE en metros.

x_i Factor de ajuste de la longitud de flujo obtenido a través de las herramientas disponibles en los sistemas de información geográfica (SIG)

Los valores de m varían de 0.2 a 0.5 siguiendo la tabla 3.4 (McCool et al. 1989):

m	PENDIENTE PROMEDIO
0.5	> 5 %
0.4	3 – 5 %
0.3	1 – 3 %
0.2	< 1 %

Tabla 3.4. Valores de m para la obtención del factor SL.

3.6.4. Factor de Cobertura Vegetal. Factor "C".

El factor C se asigna con el objeto de reflejar el efecto de la vegetación y las prácticas de manejo de las tasas de erosión. Se trata del factor usado con más frecuencia para comparar el efecto relativo de diferentes opciones de manejo en un plan de conservación.

Así para una condición estándar, es decir, sin cobertura vegetal y con barbecho continuo, la cual es extrema en cuanto a que representa las condiciones más favorables para la erosión, el valor de C es la unidad. A medida que la cobertura vegetal sea mayor, el valor de C es cada vez menor, por lo que el rango para este va de 0 (correspondiente a un terreno totalmente protegido) a 1.0 (para terrenos sin ninguna protección)

El valor a tomar de este factor será asignado de acuerdo con diversas bibliografías (Montes-León et al., 2011), los valores se presentan en la tabla 3.5.

VEGETACIÓN Y/O USO DE SUELO	C
Bosque de ayarin	0.01
Bosque de cedro	0.01
Bosque de encino	0.10
Bosque de encino-pina	0.01
Bosque de galería	0.10
Bosque oyamel	0.01
Bosque de pino	0.01
Bosque de pino-encino	0.01
Bosque de táscate	0.01
Bosque de mesófilo de montana	0.01
Chaparral	0.65
Manglar	0.10
Matorral crasicaule	0.65
Matorral de coníferas	0.20
Matorral desértico microfilo	0.25
Matorral desértico roetofilo	0.25
Matorral espinoso tamaulipeco	0.45
Matorral rosetofilo costero	0.25
Matorral sarcocaule	0.25
Matorral sarco-crasicaule	0.25
Matorral sarco-crasicaule de neblina	0.25
Matorral submontano	0.35
Matorral subtropical	0.12
Mezquital	0.65
Palmar inducido	0.75
Palmar natural	0.75

VEGETACIÓN Y/O USO DE SUELO	C
Pastizal gipsofilo	0.25
Pastizal halófilo	0.25
Pastizal inducido	0.02
Pastizal natural	0.07
Popal	0.85
Pradera de alta montaña	0.05
Sabana	0.54
Sabanoide	0.54
Selva alta perennifolia	0.45
Selva alta subperennifolia	0.45
Selva baja caducifolia	0.50
Selva baja espinosa caducifolia	0.50
Selva baja espinosa subperennifolia	0.50
Selva mediana caducifolia	0.45
Selva mediana perennifolia	0.45
Selva mediana subcaducifolia	0.45
Tular	0.10
Vegetación de desiertos arenosos	0.85
Vegetación de dunas costeras	0.85
Vegetación de galería	0.85
Vegetación halófila	0.85
Zona Urbana	0.005
Cuerpos de agua	1.0
Agricultura en riego	0.55
Agricultura de temporal	0.75
Agricultura de humedad	0.25

Tabla 3.5. Factor C asociado al tipo de vegetación y/o uso de suelo (Montes-León et al., 2011).

3.6.5. Factor de Prácticas de cultivo y conservación de suelo. Factor "P".

Por definición, el factor de práctica de cultivo y conservación de suelo P en la USLE es la tasa relativa de pérdida de suelo con una práctica específica con respecto a la pérdida de suelo correspondiente con un laboreo combinado, volteando el suelo pendiente arriba y pendiente abajo.

Las prácticas de soporte afectan principalmente la erosión mediante la modificación del patrón de flujo, grado de pendiente o dirección del escurrimiento superficial, y mediante la reducción de la tasa y cantidad de escurrimiento (Montes-León et al., 2011). Los valores del factor se encuentran en la tabla 3.6 y para establecer un valor considera la altura entre surcos para prácticas de contorno.

ALTURA ENTRE SURCOS	P MÍNIMO
Nula	1
Muy baja	0.5
Baja	0.3
Moderado	0.15
Alto	0.08
Muy alto	0.05

Tabla 3.6. Valores de P mínimos para prácticas de contorno. (Miliarium, 2013).

En este capítulo se describe la zona de estudio, sus principales características y la importancia de su estudio, de igual manera se presenta el resumen del análisis de los datos climatológicos, verificando la calidad de la información, para posteriormente obtener los datos faltantes mediante las técnicas de interpolación descritas en el capítulo 4. Esta información ya procesada se ajustará mediante el análisis de frecuencias de eventos extremos máximos, obteniendo la información necesaria para la construcción de las curvas intensidad – duración – periodo de retorno (i-d-Tr), parte fundamental en la metodología empleada para el cálculo del Factor Erosivo "R". Se concluye con la obtención del aporte de sedimentos y la determinación del nivel de perdida de suelo para las subcuencas en estudio considerando metodologías diferentes.

4.1. Descripción del Área de Estudio.

El Estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (Figura 4.1) es una región que presenta un extraordinario marco geográfico para el desarrollo de los trabajos de control de erosión hídrica y manejo de las condiciones físico-morfológicas de los terrenos, teniendo en cuenta su alta diversidad ambiental, con transiciones entre áreas subhúmedas y húmedas y una diversidad de ambientes serranos, llanuras con intensos procesos de erosión hídrica, integrados a planicies y depresiones receptoras de escurrimientos de agua y sedimentos.

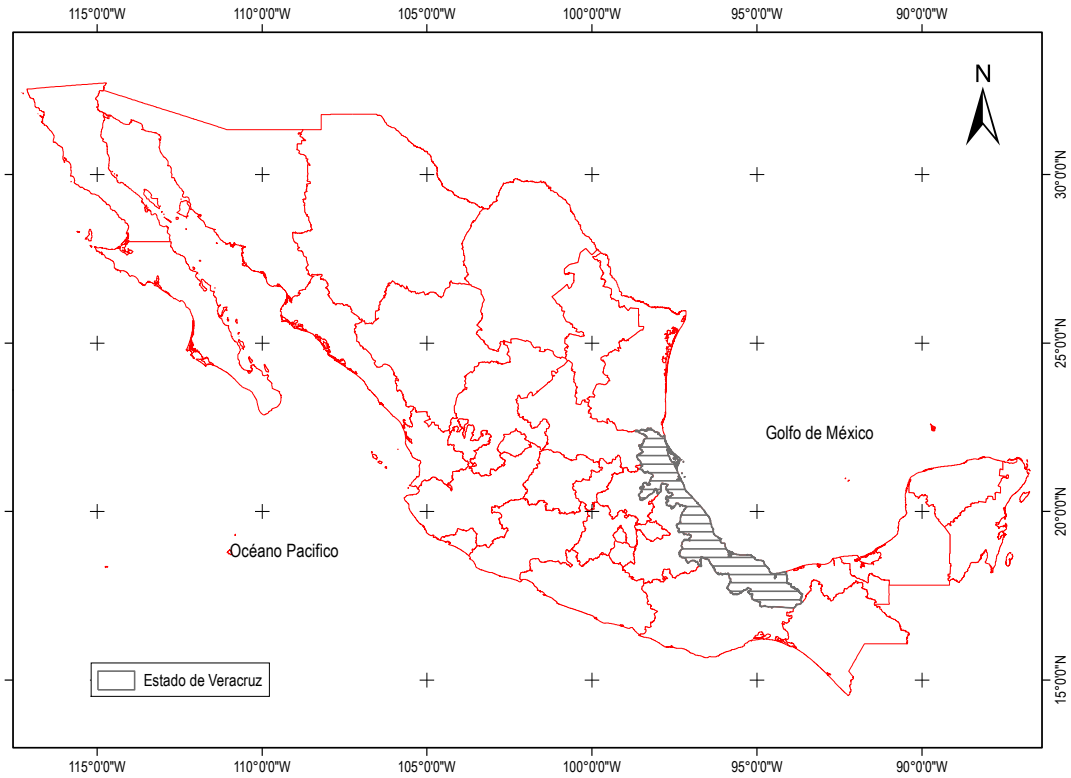


Figura 4.1. Localización del estado de Veracruz.

El estado de Veracruz se encuentra entre las coordenadas geográficas extremas siguientes: al norte 22°28´18´´, al sur 17°08´13´´ de latitud norte; al este 93°36´29´´, al oeste 98°40´54´´ de longitud oeste.

La capital del estado es Xalapa-Enríquez. El estado representa el 3.7% de la superficie del país, colinda al norte con Tamaulipas y el Golfo México; al este con el Golfo de México, Tabasco y Chiapas y Oaxaca; al oeste con Puebla, Hidalgo y San Luis Potosí (INEGI, 2015).

Las elevaciones principales en el territorio que comprende el estado son el Volcán Pico de Orizaba (Citlaltépetl) con una altitud de 5610 msnm en la zona central del estado, de ahí le sigue el Cerro Cofre de Perote (Naucampatépetl) con 4200 msnm. El estado se encuentra en 7 provincias fisiográficas que son (Figura 4.2):

- Sierra Madre Oriental
- Llanura Costera del Golfo Norte
- Eje Neovolcánico
- Sierra Madre del Sur
- Llanura Costera del Golfo Sur
- Sierras de Chiapas y Guatemala
- Cordillera Centroamericana

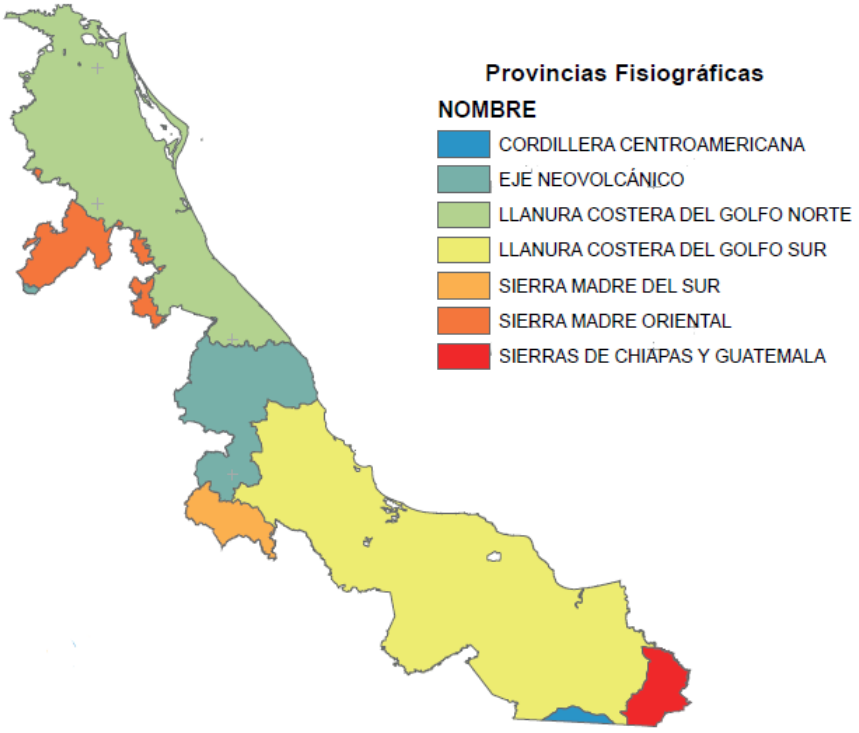


Figura 4.2. Provincias Fisiográficas en Veracruz.

Es de importancia resaltar las provincias Fisiográficas ya que estas ofrecen una visión general de las formas del relieve que caracterizan a la región, identificadas y definidas a partir del análisis integral de la información topográfica, geológica, hidrológica y edafológica, para formar unidades relativamente homogéneas.

Dentro de los últimos estudios realizados sobre el tema de la erosión hídrica en México, se tiene la información proporcionada por el INEGI que se muestra a continuación en la figura 4.4:

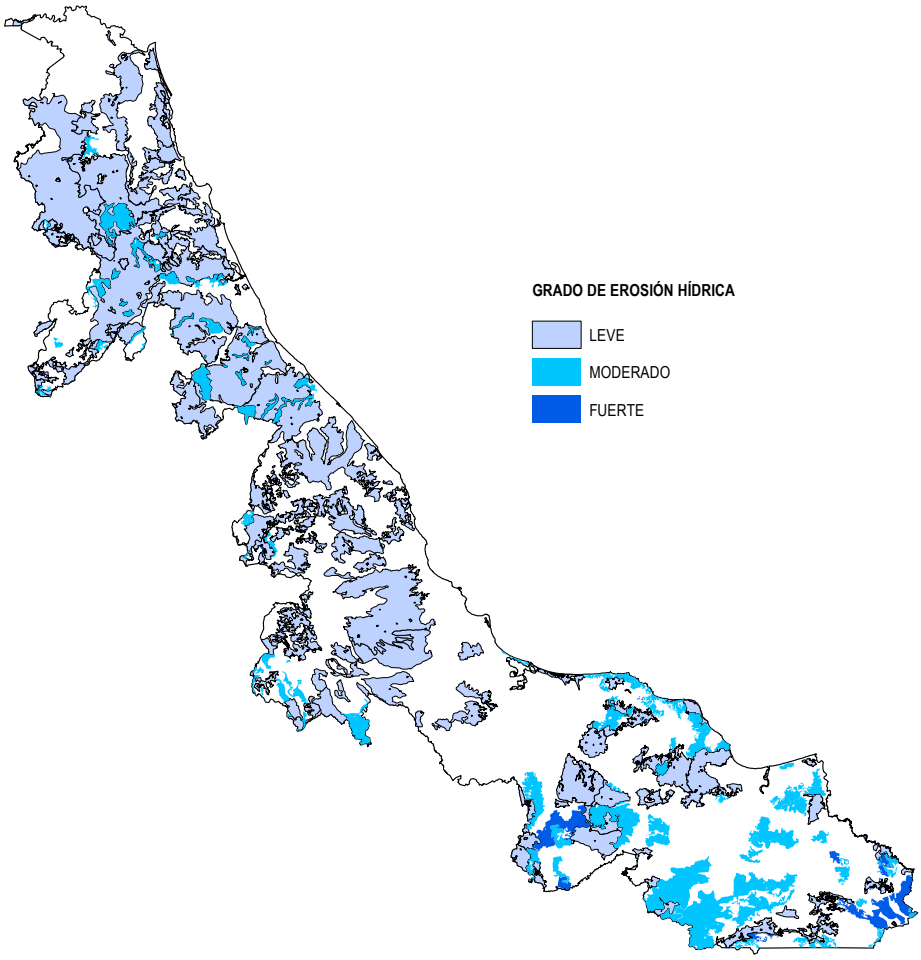


Figura 4.4. Grado de erosión hídrica en el estado de Veracruz (INEGI, 2014)

En la figura 4.3 se muestra la distribución de las estaciones climatológicas en el estado de Veracruz, se observa una alta concentración de estaciones en el centro y una menor en la parte norte y sur del territorio.

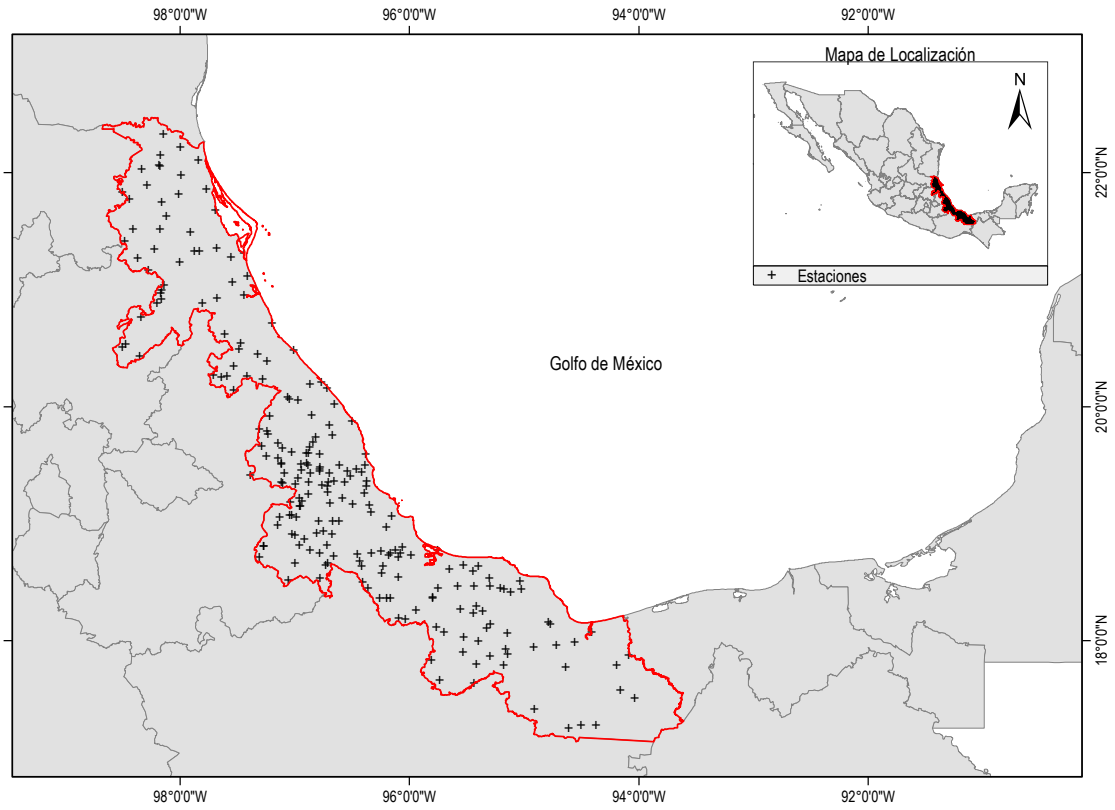


Figura 4.3. Localización de las estaciones climatológicas del estado de Veracruz.

En un intento de ejemplificar el comportamiento del fenómeno de la erosión en el estado de Veracruz y haciendo uso de la información compilada y aplicada en los capítulos anteriores, se tomaron 4 subcuencas (Figura 4.4). En la parte norte del estado se analizó la subcuenca la del río Chicayan (RH26Ab), en la zona centro la selección fue de tres subcuencas, estas son: La subcuenca del río Cedeño (RH28Bj), la subcuenca del río Ídolos (RH28Bg) y la subcuenca del río Decozalapa (RH28Bf), la única consideración en la elección de las subcuencas fue que cercanas a estas se encontrara una Estación Meteorológica Automatizada (EMA) con la cual se validaría los resultados obtenidos y se caracterizaría la duración característica para las zonas. En la tabla 4.1 se muestran las principales características de las subcuencas en estudio.

Dada la escasez de información en la zona sur del estado, además de ser la zona en la que presenta menores problemas en términos de erosión hídrica (Figura 4.3), se descartó realizar estimaciones en la zona.

Clave Subcuenca	Nombre Subcuenca	Cuenca	Área (km^2)	Perímetro (km)	X (m) UTM zona 14 N	Y (m) UTM zona 14 N
Zona norte						
RH26Ab	R. Chicayan	Río Pánuco	3753.49	379.4960	590144.0528	2392481.1482
Zona centro						
RH28Bg	Río Ídolos	Río Jamapa y otros	599.397	133.2043	740457.1490	2152449.1999
RH28Bj	Río Cedeño	Río Jamapa y otros	702.242	159.1259	719874.5385	2171912.5098
RH28Bf	R. Decozalapa	Río Jamapa y otros	1631.156	244.3428	709618.5830	2141641.7349

Tabla 4.1. Características principales de las subcuencas en estudio.

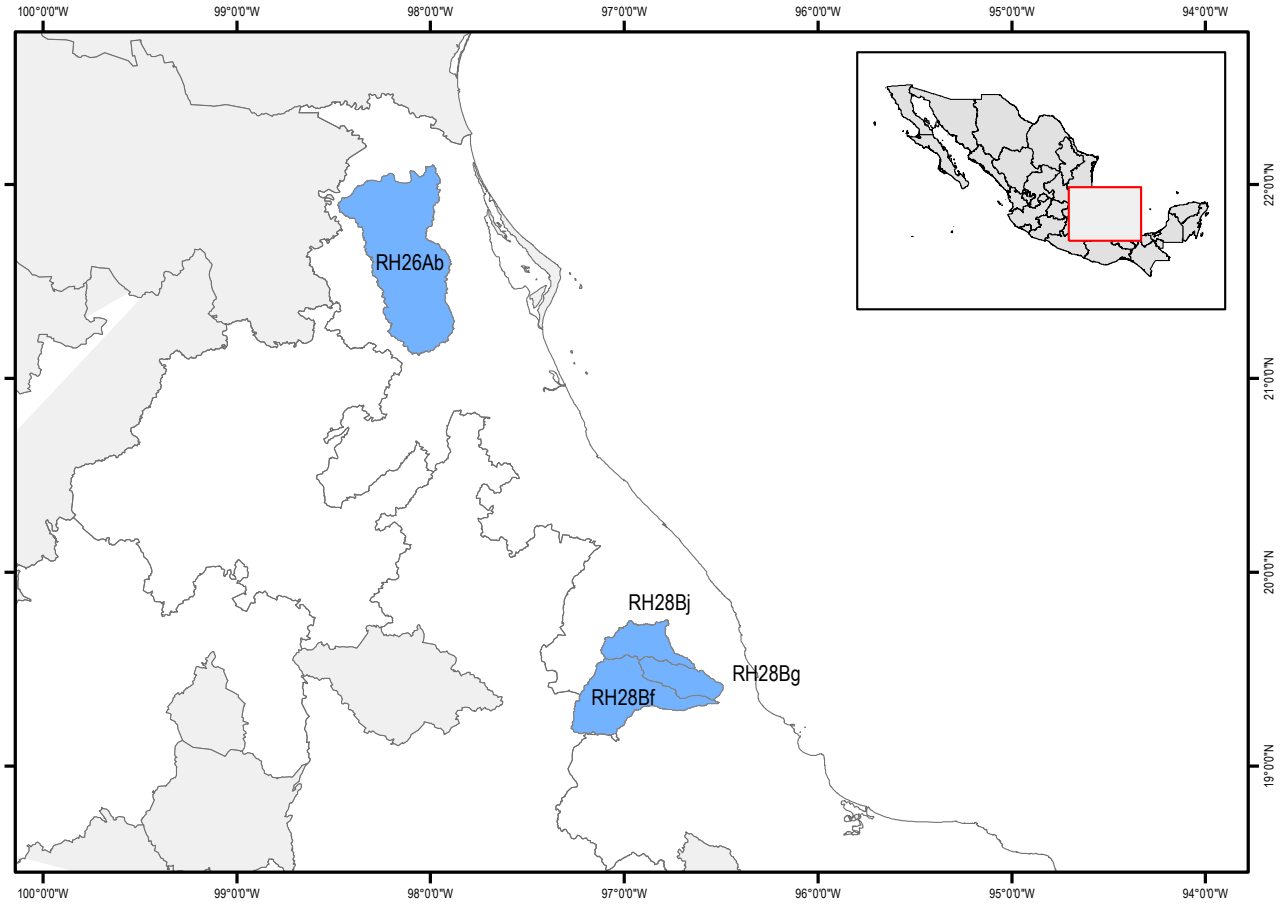


Figura 4.4. Localización de las subcuencas en estudio.

4.2. Análisis de datos climáticos

Dentro de las subcuencas existen 41 estaciones climatológicas. Las Estaciones Meteorológicas Automáticas Jalapa y Citlaltepec son las más cercanas a las subcuencas, Citlaltepec en el norte y Jalapa en el centro.

La información de las estaciones climatológicas se obtuvo de la base de datos CLICOM, software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa CLImate COMputing project. Las observaciones son diarias y representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas, finalizando a las 08:00 AM, al analizarlas se observó que varias estaciones no cuentan con información suficiente (más de 30 años de registro) para el análisis por lo que se decidió descartarlas; resultando las siguientes estaciones útiles para seguir con el proceso y cuya localización se muestra en las figuras 4.5 y 4.6:

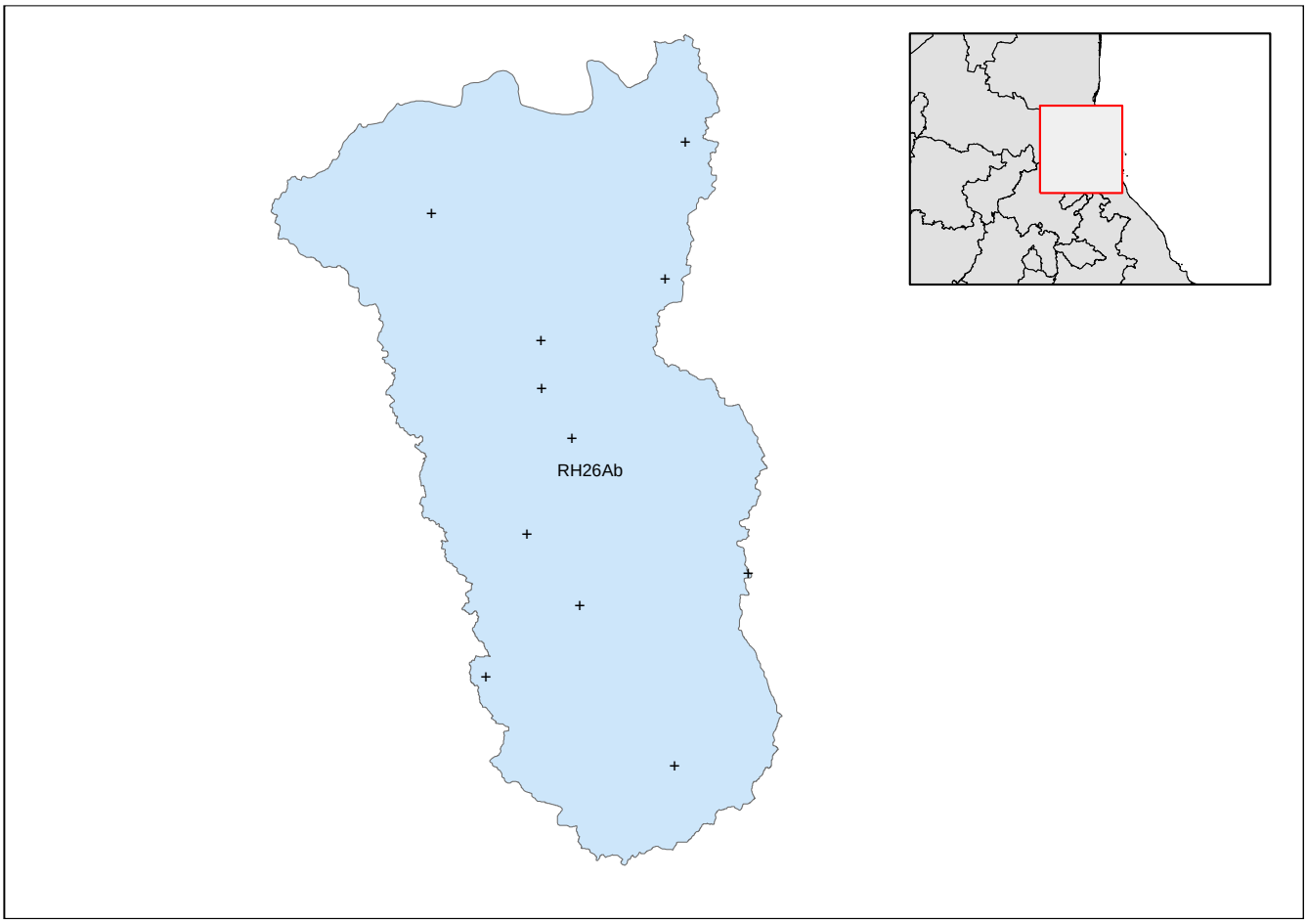


Figura 4.5. Localización de las estaciones climatológicas en la subcuenca RH26Ab (Zona Norte)

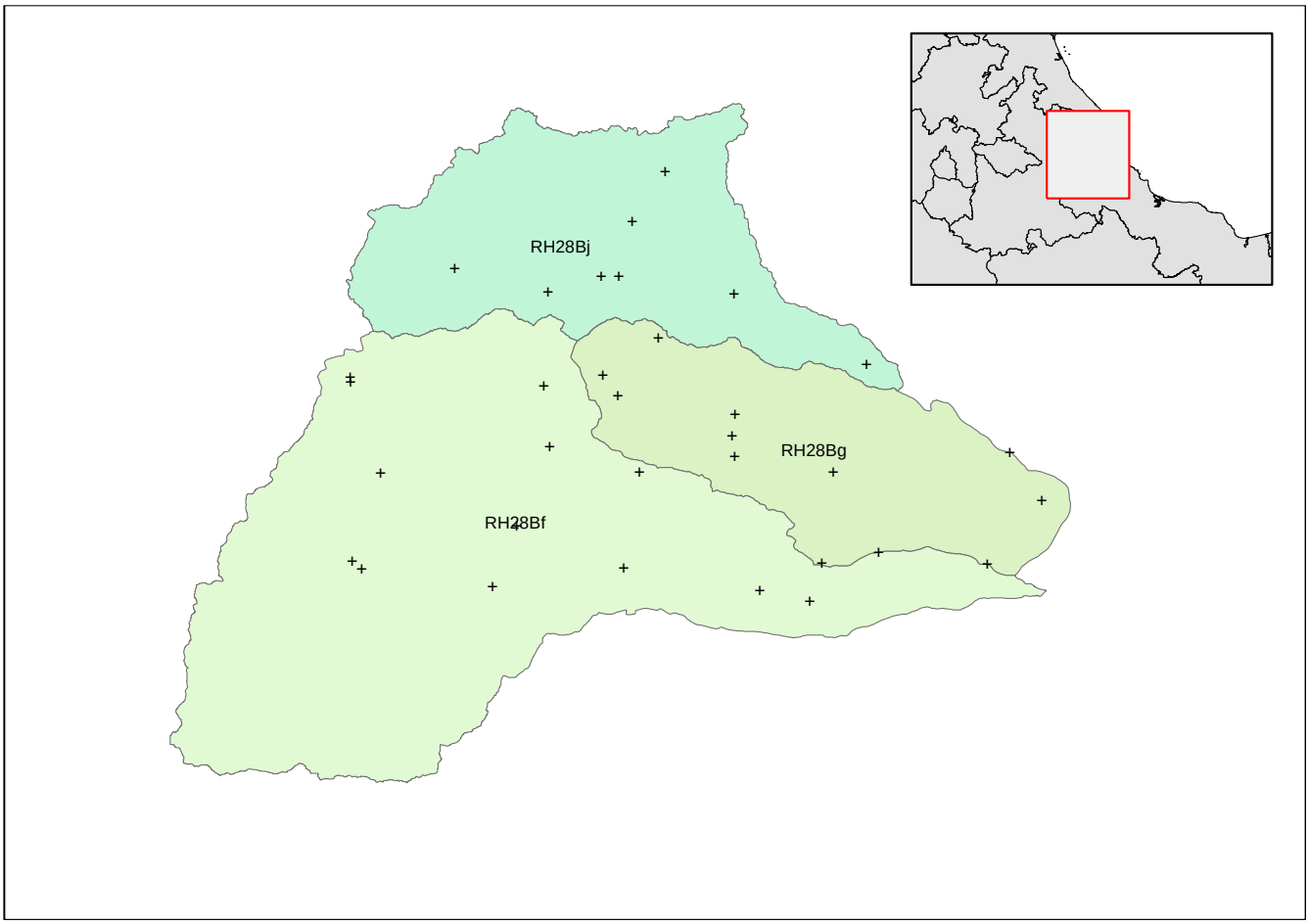


Figura 4.6 Localización de las estaciones climatológicas en las subcuencas RH28Bj, RH28Bg y RH28Bf (Zona Centro)

Finalmente, las estaciones 30141, 30087, 30068, 30195, 30021, 30140, 30266, 30339 y 30228 se utilizarán para el análisis completo de las metodologías, estas estaciones pertenecen a la subcuenca del río Ídolos (RH28Bg). Es importante resaltar que los datos, así como resultados de las demás subcuencas se encuentran en el Anexo A, en el disco adjunto al trabajo. La descripción de las estaciones climatológicas que ejemplifican las metodologías se muestra en la Tabla 4.2.

4.2.1. Obtención de datos faltantes en Registros históricos.

Para la obtención de registros faltantes de las estaciones en estudio se utilizó el método de la interpolación inversa al cuadrado, (Reyes y Escalante, 2014), con el uso de las coordenadas UTM (Universal Tranversal de Mercator) (Tabla 4.2). Los resultados del proceso se muestran en la tabla 4.3.

Estación	Nombre	Municipio	X [UTM]	Y [UTM]	Altitud
30141	Rinconada	Emiliano Zapata	755915.8473	2141665.9220	263
30087	Las Animas	Xalapa	721969.6528	2157520.8510	1281
30068	Los ídolos	Actopan	760819.6539	2147888.9142	100
30195	Emiliano Zapata (CFE)	Emiliano Zapata	732667.4929	2155810.2936	924
30021	El Carrizal	Emiliano Zapata	745974.5120	2142666.7320	242
30140	Rancho Viejo	Emiliano Zapata	732690.2865	2151781.0021	914
30266	El Diamante	Actopan	757835.3002	2152460.9463	146
30339	Cerro Gordo	Emiliano Zapata	741725.9108	2150361.5958	580
30228	Jalapa de Enríquez (DGE)	Xalapa	720545.3260	2159502.6189	1365

Tabla 4.2. Coordenadas de las estaciones climatológicas en estudio

Año	ESTACIONES								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
1964	70	110.8	65.7	29.5	54.2	26.9	60.9	40.9	125.1
1965	164	76.5	73.7	87.4	102.4	81.7	85	57.2	91.5
1966	97.5	71.2	117.8	82.8	82.9	75.9	103.2	71.2	64.5
1967	116	51.3	69.8	81.2	91	76	60.9	76.9	91.3
1968	49	74.8	50	34.9	56	31.7	39.9	29.4	71
1969	115.5	84.7	100	92	123.5	92	103.4	102.4	75.4
1970	121	70.6	75.4	104.2	101.5	48.1	65.6	70.5	74.4
1971	62	68.1	95.3	48	46	63	72.4	45.3	70.9
1972	151	102.1	136	105.2	123.5	103	134.5	117	107.1
1973	72	75	222	89.5	72	83.5	162	87.2	67.8
1974	195	175	197	167.8	200	180	183.9	179	176.2
1975	95	100.1	89.2	72.9	71	77	93.2	75.2	101.4
1976	120	93	100.3	140.1	114	78.4	109	101.1	81.2
1977	90	86.5	84.5	54	43	64	129.6	35.8	58
1978	65	103.5	111.6	47.1	46	85	64.5	50.6	96.9
1979	101	156	174.2	100.7	121	192	191	144.7	152
1980	65	84.9	60	108.4	94	128	31.6	100	107
1981	127	69.9	118.5	132.7	100	133.6	83.2	102	108.3
1982	58	62	100	47.3	52	91.8	103	61.8	56.6
1983	81	101	61.8	62	82	67.8	63.4	71.5	92.7
1984	167	83	84.7	124.6	122.5	138.2	86.8	93.8	84.2
1985	77	80	119	66.4	65	71	100.4	89	79.5
1986	102	56	137	73.2	75	81	100	76.5	56.4
1987	65	44.8	65.3	66	69	58.9	64.1	29.2	41.2
1988	85.5	52.3	95.6	63	74	112.3	180.5	43.1	49.9

Tabla 4.3. Valores de Hp máxima anual [mm] para las estaciones en estudio. Los valores en rojo son los estimados con el método de la interpolación inversa al cuadrado.

Año	Estaciones								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
1989	62	78	104.6	82.5	102	62.8	106.2	60.5	72.1
1990	63	93.5	103.5	125.2	82	160	49	62.1	85.5
1991	70	78.5	60.2	107.1	81	96	87.4	103.5	71.7
1992	146	88	122.8	153	110	61.5	117.2	109.5	89.7
1993	83	137.5	79.5	178.5	159	124.3	84.5	70.5	132.5
1994	90	78.9	49	82.9	102	90	53.5	123.5	76.3
1995	66	89.1	73.5	100.2	91	118.2	80.5	95.3	89.5
1996	73	54.4	69	69	61	54	116.5	57.8	54.5
1997	47	53.1	61	69.7	48	55	75.3	49.2	53.1
1998	62	83.5	75	97	84	110	68.6	130	83.4
1999	87	141.3	147	94.7	171.5	189.5	95	201.5	141.3
2000	100	86.3	65	106.1	118	74.5	89	109.2	86.3
2001	51.9	60.6	62.2	66.5	149	92.3	60.3	113	60.6
2002	60	55.5	68.8	51.7	48	108	60.8	54	55.5
2003	98	65.5	84.2	75.8	87	85	50.2	77.8	65.7
2004	58	56.7	65.4	59	58.5	61	76	51.6	56.6
2005	120	93.5	100.8	85.4	82	82.5	100.1	150.8	93.6
2006	85	80	97.7	98.2	71.5	83.5	93.2	122.4	79.9
2007	122	102.3	90.6	136.2	96	67	97	82.5	102.3
2008	125	79.9	91.2	94	133.5	110	72.3	83.7	79.9
2009	105	79	100.6	118.2	78.5	87.3	87.3	128.4	72.3
2010	138	23.1	178.2	150	200.4	172	145	216.7	25.1
2011	85	30	100.5	68.9	88.7	85	80.3	63.8	31.5
2012	130	124.3	189.9		150.5	183.5	54		
2013	180	145.5	251.6		128.8	145.5	170.5		

Tabla 4.3 (Continuación) Valores de Hp máxima anual (mm) para las estaciones en estudio. Valores en rojo estimados con el método de la interpolación inversa al cuadrado.

4.2.2. Verificación de Homogeneidad de los datos.

Se recopiló información de precipitaciones diarias para las estaciones climatológicas 30228, 30087, 30195, 30140, 30339, 30021, 30266, 30141 y 30068 contenidas en la base de datos Clima Computarizado (CLICOM) del Servicio Meteorológico Nacional. Para verificar que la serie de datos sea homogénea en las estaciones en estudio, se revisó la homogeneidad empleando las ecuaciones de Helmert, T-studen y Cramer, Pettitt, Normal Estandar, Buishand, Von Neuman y Fisher (Reyes y Escalante, 2014).

La homogeneidad indica el cambio en la tendencia del comportamiento de la serie de datos, así cuando una muestra es homogénea implicará que no existe cambio en el patrón del comportamiento de la variable en estudio, mientras

que en el caso de resultar no homogénea indicará que existe un cambio en el patrón de comportamiento. En las tablas 4.4 y 4.5 se muestran los resultados de las pruebas de homogeneidad.

ESTACIÓN	HELMERT	T-STUDENT	CRAMER	
			N_{30}	N_{60}
30021	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30068	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30087	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30140	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30141	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30195	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30228	Homogénea	Homogénea	Homogénea	No Homogénea
30266	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30399	Homogénea	Homogénea	No Homogénea	Homogénea

Tabla 4.4 Resultados de las pruebas de homogeneidad para los registros en estudio

ESTACIÓN	PETTITT	NORMAL ESTÁNDAR	BUISHAND	VON NEUMAN	FISHER
30021	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30068	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30087	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30140	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30141	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30195	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30228	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30266	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea
30399	No Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea	Homogénea

Tabla 4.5. Resultados de las pruebas de homogeneidad para los registros en estudio

4.2.3. Verificación de la Tendencia de los datos.

El análisis de la tendencia de las series se realizó empleando la prueba de Mann Kendall para un nivel de significancia del 5%. A continuación, se presenta el valor para cada estación del estadístico S, Si S es positivo se infiere de forma subjetiva que la tendencia es creciente, en caso contrario se dice que hay tendencia decreciente. También se presenta el valor del estadístico Z_{mk} (Tabla 4.6).

A partir de Z_{mk} se evalúa la hipótesis nula

H_o: no hay tendencia *vs.* H_i: hay tendencia decreciente

H_o: no hay tendencia *vs.* H_i: hay tendencia creciente

Estación	S	Z_{mk}	Resultado
30021	92	0.8091	H_0: Sin Tendencia
30068	-144	-0.1955	H_0: Sin Tendencia
30087	-23	-1.2710	H_0: Sin Tendencia
30140	147	1.2979	H_0: Sin Tendencia
30141	-67	-0.5869	H_0: Sin Tendencia
30195	150	1.3243	H_0: Sin Tendencia
30228	-216	-1.9109	H_0: Sin Tendencia
30266	-55	-0.4800	H_0: Sin Tendencia
30399	240	2.1242	H_1: Tendencia Creciente

Tabla 4.6. Resultado de las pruebas de tendencia en la variable de Hp máxima anual, para las estaciones en estudio.

4.2.4. Verificación de la independencia de las series de datos.

Para calcular la independencia de las series se emplea la prueba de Andrews (Reyes y Escalante, 2014), se muestran a continuación los correlogramas para las estaciones pertenecientes a la cuenca del rio Ídolos (RH28Bg) (Fig. 4.7 a 4.11).

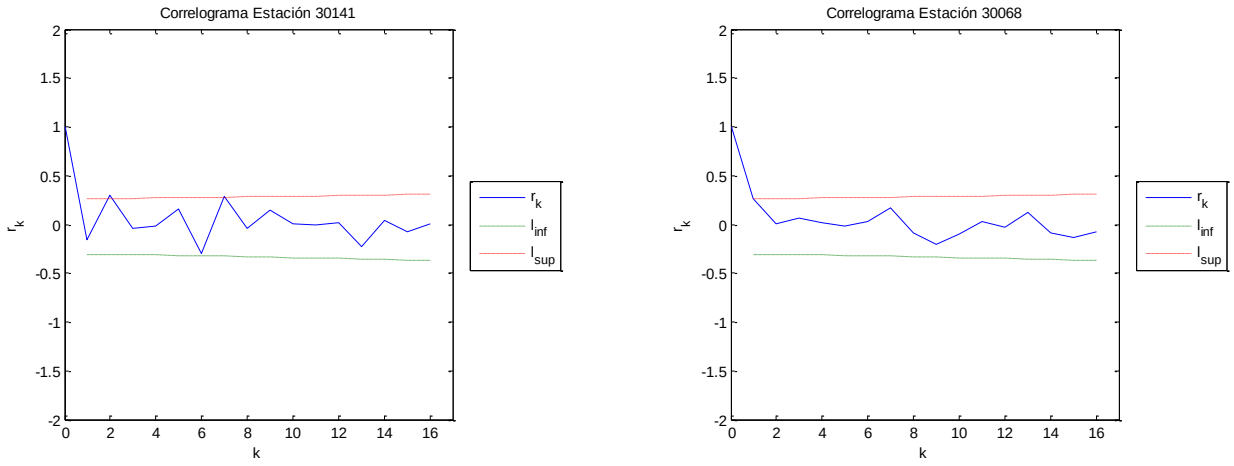
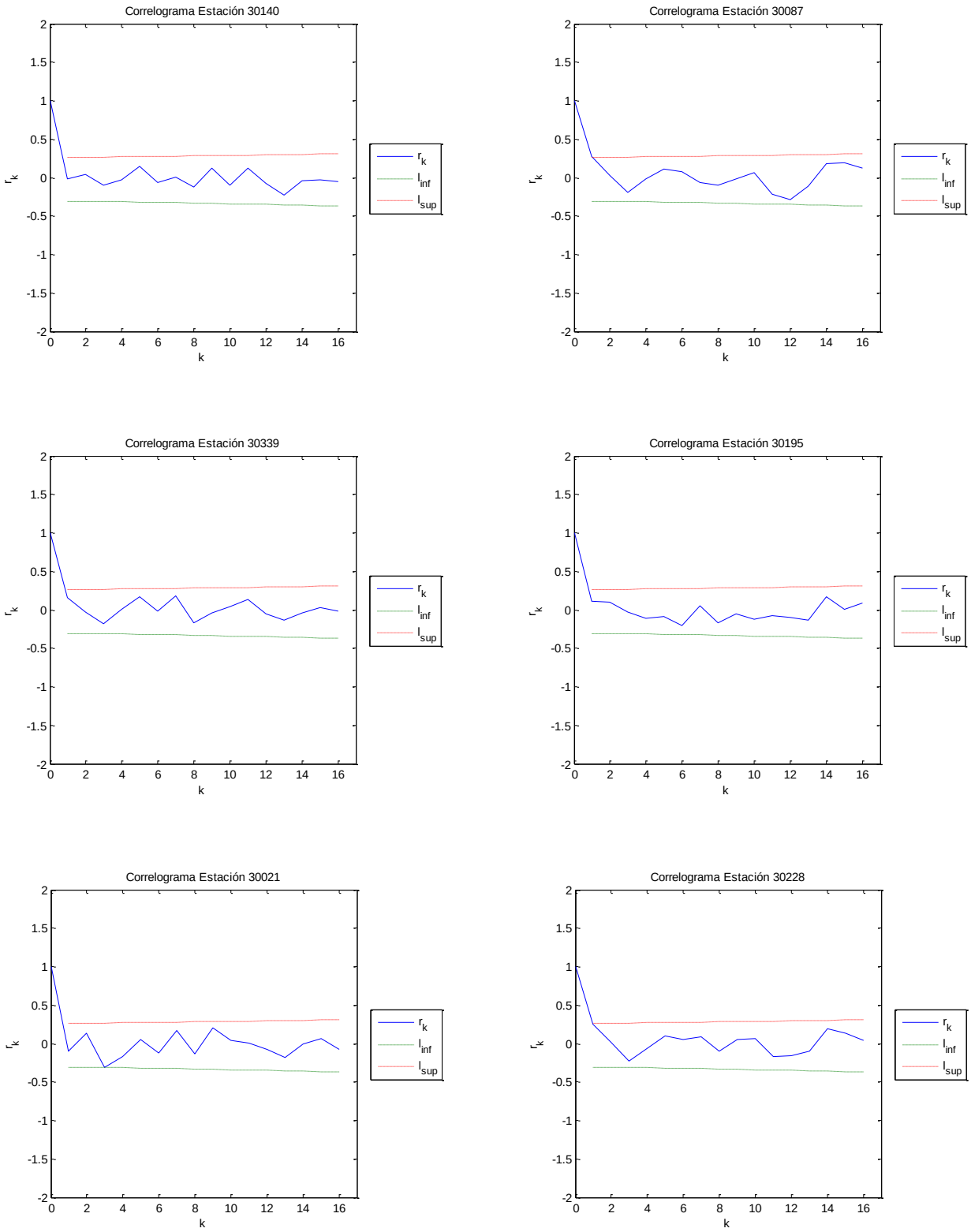


Figura 4.7 y 4.8. Correlogramas de independencia para las estaciones 30141 y 30068.



Figuras 4.9 a 4.10. Correlogramas de independencia para las estaciones 30140, 30087, 30339, 30195, 30021 y 30228.

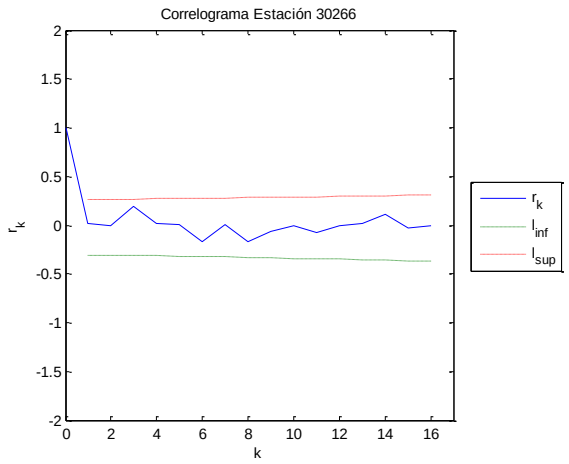


Figura 4.11. Correlograma de independencia para la estación 30266.

El resumen de los resultados de las pruebas de independencia se presenta en la tabla 4.7.

ESTACIÓN	RESULTADO
30021	Independiente
30068	Independiente
30087	Independiente
30140	Independiente
30141	Independiente
30195	Independiente
30228	Independiente
30266	Independiente
30399	Independiente

Tabla 4.7 Resultado de la independencia para los registros las estaciones en estudio.

4.2.5. Eventos extremos máximos.

La precipitación diaria se registra normalmente en el periodo de 24 h comprendido entre las 8 de la mañana de dos días consecutivos. Sin embargo, la precipitación máxima en un periodo de 24 rara vez coincidirá con la precipitación diaria, siendo habitualmente superior. Para hacer comparables ambos valores, se hace necesario establecer sus relaciones para determinar el factor de conversión que transforme el primero en el segundo.

Generalmente, la mayoría de los observatorios disponen de registros de precipitación diaria. Consecuentemente, el conocimiento de estas relaciones permite estimar las magnitudes de las máximas precipitaciones en 24 h, requeridas en la modelación hidrológica. El U.S. Weather Bureau (1962, 1965) utiliza el factor empírico 1.13, para convertir los datos de precipitación diaria en precipitación máxima en 24 h. Los valores se presentan a continuación en la Tabla 4.8.

Año	Estación								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
1964	79.1	125.2	74.2	33.3	61.2	30.4	68.8	46.2	141.4
1965	185.3	86.4	83.3	98.8	115.7	92.3	96.1	64.6	103.4
1966	110.2	80.5	133.1	93.6	93.7	85.8	116.6	80.5	72.9
1967	131.1	58.0	78.9	91.8	102.8	85.9	68.8	86.9	103.2
1968	55.4	84.5	56.5	39.4	63.3	35.8	45.1	33.2	80.2
1969	130.5	95.7	113.0	104.0	139.6	104.0	116.8	115.7	85.2
1970	136.7	79.8	85.2	117.7	114.7	54.4	74.1	79.7	84.1
1971	70.1	77.0	107.7	54.2	52.0	71.2	81.8	51.2	80.1
1972	170.6	115.4	153.7	118.9	139.6	116.4	152.0	132.2	121.0
1973	81.4	84.8	250.9	101.1	81.4	94.4	183.1	98.5	76.6
1974	220.4	197.8	222.6	189.6	226.0	203.4	207.8	202.3	199.1
1975	107.4	113.1	100.8	82.4	80.2	87.0	105.3	85.0	114.6
1976	135.6	105.1	113.3	158.3	128.8	88.6	123.2	114.2	91.8
1977	101.7	97.7	95.5	61.0	48.6	72.3	146.4	40.5	65.5
1978	73.5	117.0	126.1	53.2	52.0	96.1	72.9	57.2	109.5
1979	114.1	176.3	196.8	113.8	136.7	217.0	215.8	163.5	171.8
1980	73.5	95.9	67.8	122.5	106.2	144.6	35.7	113.0	120.9
1981	143.5	79.0	133.9	150.0	113.0	151.0	94.0	115.3	122.4
1982	65.5	70.1	113.0	53.4	58.8	103.7	116.4	69.8	64.0
1983	91.5	114.1	69.8	70.1	92.7	76.6	71.6	80.8	104.8
1984	188.7	93.8	95.7	140.8	138.4	156.2	98.1	106.0	95.1
1985	87.0	90.4	134.5	75.0	73.5	80.2	113.5	100.6	89.8
1986	115.3	63.3	154.8	82.7	84.8	91.5	113.0	86.4	63.7
1987	73.5	50.6	73.8	74.6	78.0	66.6	72.4	33.0	46.6
1988	96.6	59.1	108.0	71.2	83.6	126.9	204.0	48.7	56.4
1989	70.1	88.1	118.2	93.2	115.3	71.0	120.0	68.4	81.5
1990	71.2	105.7	117.0	141.5	92.7	180.8	55.4	70.2	96.6
1991	79.1	88.7	68.0	121.0	91.5	108.5	98.8	117.0	81.0
1992	165.0	99.4	138.8	172.9	124.3	69.5	132.4	123.7	101.4
1993	93.8	155.4	89.8	201.7	179.7	140.5	95.5	79.7	149.7
1994	101.7	89.2	55.4	93.7	115.3	101.7	60.5	139.6	86.2
1995	74.6	100.7	83.1	113.2	102.8	133.6	91.0	107.7	101.1
1996	82.5	61.5	78.0	78.0	68.9	61.0	131.6	65.3	61.6
1997	53.1	60.0	68.9	78.8	54.2	62.2	85.1	55.6	60.0
1998	70.1	94.4	84.8	109.6	94.9	124.3	77.5	146.9	94.2
1999	98.3	159.7	166.1	107.0	193.8	214.1	107.4	227.7	159.7
2000	113.0	97.5	73.5	119.9	133.3	84.2	100.6	123.4	97.5
2001	58.6	68.5	70.3	75.1	168.4	104.3	68.1	127.7	68.5

Tabla 4.8. Valores de Hp máxima anual (mm) para las estaciones en estudio.

Año	Estación								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
2002	67.8	62.7	77.7	58.4	54.2	122.0	68.7	61.0	62.7
2003	110.7	74.0	95.1	85.7	98.3	96.1	56.7	87.9	74.2
2004	65.5	64.1	73.9	66.7	66.1	68.9	85.9	58.3	64.0
2005	135.6	105.7	113.9	96.5	92.7	93.2	113.1	170.4	105.8
2006	96.1	90.4	110.4	111.0	80.8	94.4	105.3	138.3	90.3
2007	137.9	115.6	102.4	153.9	108.5	75.7	109.6	93.2	115.6
2008	141.3	90.3	103.1	106.2	150.9	124.3	81.7	94.6	90.3
2009	118.7	89.3	113.7	133.6	88.7	98.6	98.6	145.1	81.7
2010	155.9	26.1	201.4	169.5	226.5	194.4	163.9	244.9	28.4
2011	96.1	33.9	113.6	77.9	100.2	96.1	90.7	72.1	35.6
2012	146.9	140.5	214.6		170.1	207.4	61.0		
2013	203.4	164.4	284.3		145.5	164.4	192.7		

Tabla 4.8. (Continuación) Valores de Hp máxima anual (mm) para las estaciones en estudio.

4.3. Análisis de frecuencias de eventos extremos máximos.

Para la obtención de las curvas i-d-T se emplearon diferentes distribuciones de probabilidad, así como diferentes métodos de obtención de sus parámetros, estos son: Momentos (M), Máxima Verosimilitud (MV), Momentos-L (ML) y Momentos de Probabilidad Pesada (MP).

Así las distribuciones de probabilidad utilizadas y los métodos con que se obtuvieron sus parámetros fueron: Normal (M), Normal (MV), Normal (ML), Gumbel (M), Gumbel (MV), Gumbel (ML), Gumbel (ME), Gamma 2P (M), Gamma 2P (MV), Gamma 2P (ML), Gamma 3P (M), Gamma 3P (MP), GVE (M), GVE (MV), Log Normal 2P (M), Log Normal 2P (MV), Log Normal 3P (M), Log Normal 3P (MV), Exponencial (M), Exponencial 2P (M), Exponencial 2P (MV), LogPearson tipo III (M), Frechet (M), Gumbel doble (M), Gumbel doble (MV), Gumbel doble (ML), Log Normal doble (M) y Log Normal doble (MV).

Para determinar la función de mejor ajuste se empleó la prueba de bondad de ajuste (EEA) cuyo desarrollo se puede ver en Reyes y Escalante (2014). En las tablas 4.9 y 4.10 se muestran los resultados obtenidos para diferentes periodos de retorno.

		Estación				
		30141	30087	30068	30195	30021
	Distribución de ajuste	Gumbel Doble (ML)	Gumbel Doble (ML)	LogNormal Doble (M)	Gumbel (MV)	LogNormal Doble (M)
Tr (años)	2	101.1781	88.1159	102.2303	96.2325	97.1718
	5	140.3442	119.1766	141.2368	132.3801	139.0896
	10	176.5695	148.3194	200.4348	156.3130	168.1151
	20	200.0452	172.1310	234.0375	179.2699	196.1643
	50	220.2232	191.8032	260.8572	208.9853	232.4746
	100	234.7393	204.9839	276.9389	231.2529	259.6398
	500	271.0913	234.8628	308.7638	282.7097	322.3674
	1000	288.5612	247.9870	320.8265	304.8317	349.379
	EEA	**4.1476**	**5.7650**	**5.3602**	**3.3317**	**4.5722**

Tabla 4.9. Eventos de diseño obtenidos del análisis de frecuencias de eventos máximos para diferentes periodos de retorno en (mm), distribución de ajuste y EEA en (mm).

		Estación			
		30140	30266	30339	30228
	Distribución de ajuste	Gumbel Doble (ML)	Gumbel Doble (ML)	Gumbel Doble (ML)	Gumbel (MV)
Tr (años)	2	99.1654	95.8503	90.4803	87.7596
	5	142.9251	134.9431	132.1139	118.8970
	10	197.4055	183.8340	173.1036	139.5127
	20	209.9760	203.1573	212.8975	159.2878
	50	218.6675	214.7241	238.6720	184.8846
	100	226.9998	223.3592	255.3445	204.0659
	500	266.5823	249.5069	292.7677	248.3907
	1000	287.2048	265.0952	308.9977	267.4466
	EEA	**4.3900**	**3.8786**	**5.3190**	**5.0269**

Tabla 4.10. Eventos de diseño obtenidos del análisis de frecuencias de eventos máximos para diferentes periodos de retorno en (mm), distribución de ajuste y EEA en (mm).

4.4. Curvas Intensidad-Duración-Periodo de retorno (i-d-Tr).

El cálculo de las curvas i-d-Tr se realizó con el método empírico del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS-USA) (Reyes y Escalante, 2014) al contar únicamente con los registros provenientes de información pluviométrica, los valores de días con lluvia apreciable para cada año y estación se presentan en la tabla 4.11.

AÑO	ESTACIÓN								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
1964	65	115	67	73	106	101	78	111	114
1965	71	125	68	78	107	100	90	112	124
1966	76	130	65	86	112	118	84	130	130
1967	56	112	62	63	70	90	72	91	120
1968	74	136	65	76	77	107	82	110	138
1969	77	134	71	84	70	100	91	117	131
1970	62	110	64	67	58	79	76	94	108
1971	47	113	56	60	54	72	78	99	106
1972	75	136	72	102	65	104	96	125	148
1973	64	114	66	72	63	96	82	102	121
1974	61	96	70	64	59	72	80	92	99
1975	65	109	61	65	66	79	60	99	106
1976	65	124	51	63	61	99	66	108	134
1977	58	113	53	56	53	92	46	99	116
1978	70	126	64	71	74	95	63	113	131
1979	64	135	61	72	65	102	62	106	133
1980	55	123	58	68	66	104	51	82	132
1981	73	126	69	82	82	112	70	73	131
1982	50	104	56	62	57	76	44	50	107
1983	63	127	60	75	66	95	60	86	132
1984	82	129	76	86	77	109	79	91	137
1985	61	120	68	93	69	82	64	79	123
1986	78	123	79	69	75	95	76	77	127
1987	50	111	64	60	53	83	62	76	116
1988	51	132	74	71	69	72	70	83	139
1989	48	92	57	55	56	66	58	61	99
1990	50	106	69	69	60	81	69	63	112
1991	62	128	83	73	65	93	60	82	131
1992	74	149	104	85	82	116	86	93	156
1993	58	142	82	69	68	90	68	63	143
1994	47	145	75	55	61	88	58	76	145

Tabla 4.11 Días con lluvia apreciable en el año de los registros rellenados para las estaciones en estudio.

AÑO	ESTACIÓN								
	E30141	E30087	E30068	E30195	E30021	E30140	E30266	E30339	E30228
1995	44	139	56	64	57	102	54	97	141
1996	42	90	49	61	63	86	53	91	90
1997	45	106	58	71	72	103	73	87	106
1998	52	94	52	74	69	96	60	71	94
1999	44	86	49	52	61	98	51	74	87
2000	69	108	71	78	77	98	73	77	107
2001	49	90	56	59	64	84	62	60	90
2002	54	84	54	58	56	75	53	62	84
2003	48	101	51	92	49	88	50	63	103
2004	55	88	52	63	58	90	54	98	89
2005	74	107	66	84	72	101	68	78	106
2006	61	99	63	76	65	88	58	54	98
2007	62	78	53	54	55	67	57	32	79
2008	71	81	64	69	65	75	65	39	82
2009	66	103	60	74	53	81	55	44	105
2010	85	145	75	122	77	96	67	64	152
2011	51	96	53	85	57	71	45	31	99
2012	64	88	66		72	95	86		
2013	55	90	49		65	102	68		

Tabla 4.11 (Continuación) Días con lluvia apreciable en el año de los registros rellenados para las estaciones en estudio.

Obtenido de las tablas 4.8 y 4.11, en la tabla 4.12 se muestran los valores medios para días con lluvia y altura de precipitación máxima media (valores maximizados), para las diferentes estaciones.

ESTACIÓN	DÍAS CON LLUVIA	HP_{MAX} 24 HORAS
E30141	60.9	108.9
E30087	114.2	94.7
E30068	64.0	115.2
E30195	72.0	102.4
E30021	67.4	107.7
E30140	91.0	108.5
E30266	66.2	104.9
E30339	82.6	100.5
E30228	116.7	92.7

Tabla 4.12 Valores medios de días con lluvia apreciable y altura de precipitación máxima (valores maximizados) de los registros rellenados para las estaciones en estudio.

Con la figura 4.12 se obtiene las $hp_{T=2\ años}^{1hr}$, para este fin se consideran que los días con lluvia y la precipitación media máxima son los que se muestran en la tabla 4.12. Los resultados del uso de la figura 4.12 se muestran en la tabla 4.13.

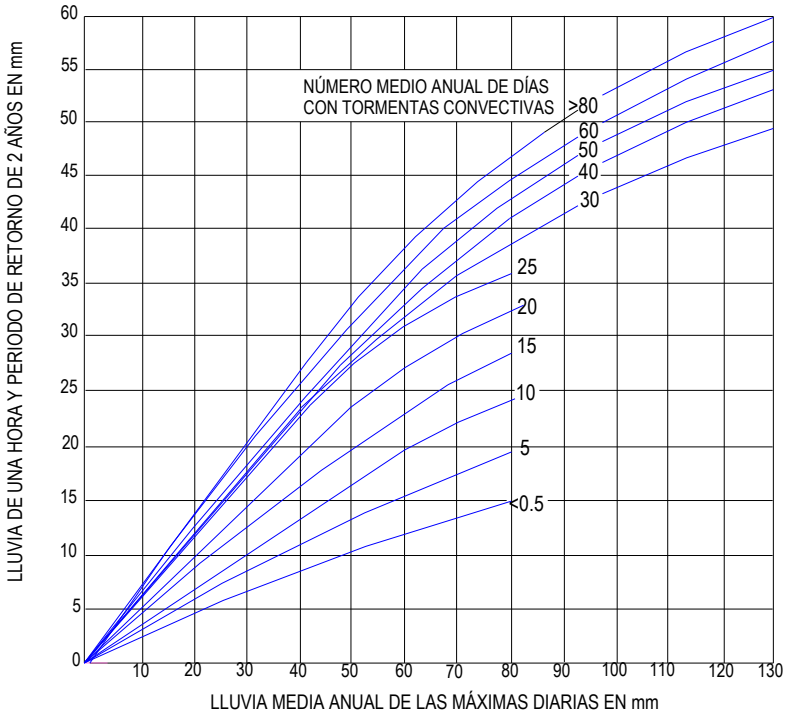


Figura 4.12. Estimación empírica de la lámina de lluvia Hp_{ih}^{2} (Reyes et al., 2014).

ESTACIÓN	DÍAS CON LLUVIA	HP_{MAX} 24 HORAS	$hp_{T=2\ años}^{1hr}$
E30141	60.9	108.9	53.3
E30087	114.2	94.7	56.3
E30068	64.0	115.2	55.2
E30195	72.0	102.4	53.2
E30021	67.4	107.7	54.0
E30140	91.0	108.5	57.8
E30266	66.2	104.9	53.0
E30339	82.6	100.5	54.1
E30228	116.7	92.7	55.8

Tabla 4.13 Valores medios de días con lluvia apreciable, altura de precipitación máxima (valores maximizados), $hp_{T=2\ años}^{1hr}$ de los registros para las estaciones en estudio.

El valor del porcentaje de la lluvia de 24 horas que precipita en una hora, R, se presenta en la tabla 4.14. En México el valor máximo de esta relación, en promedio, es de 0.7, de los resultados obtenidos se puede inferir que la probabilidad de inundación en la zona es alta.

$$R = \frac{hp_{T=2\ años}^{1hr}}{hp_{T=2\ años}^{24hr}}$$

ESTACIÓN	R
E30141	0.526975
E30087	0.588702
E30068	0.52729
E30195	0.540985
E30021	0.547523
E30140	0.558215
E30266	0.554717
E30339	0.571336
E30228	0.595695

Tabla 4.14 Valor del coeficiente R para las estaciones en estudio.

Los valores y las gráficas de las curvas i-d-Tr para las estaciones en estudio se muestran en las Tablas 4.15 a 4.32 y las Figuras 4.13 a 4.24.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MENORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(minutos)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
10	103.68	148.405	179.375	209.303	248.045	372.779
20	87.48	125.217	151.347	176.599	209.288	314.532
30	76.68	109.758	132.663	154.797	183.45	275.701
40	66.42	95.072	114.912	134.085	158.904	238.812
50	58.968	84.406	102.019	119.041	141.076	212.018
60	54	77.294	93.424	109.012	129.19	194.156

Tabla 4.15. Valores de I (mm/hr) para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 30021.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MAYORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(horas)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
1	54	77.294	93.424	109.012	129.19	194.156
2	27.939	39.991	48.336	56.401	66.84	100.452
3	19.251	27.556	33.306	38.863	46.057	69.218
4	14.908	21.339	25.792	30.095	35.665	53.601
5	12.302	17.608	21.283	24.834	29.431	44.23
6	10.564	15.121	18.277	21.326	25.274	37.983
7	9.323	13.345	16.13	18.821	22.305	33.521
8	8.392	12.013	14.52	16.942	20.078	30.175
9	7.668	10.976	13.267	15.481	18.346	27.572
10	7.089	10.148	12.265	14.311	16.961	25.49
11	6.615	9.469	11.445	13.355	15.827	23.786
12	6.221	8.904	10.762	12.558	14.882	22.366
13	5.886	8.426	10.184	11.883	14.083	21.165
14	5.6	8.016	9.689	11.305	13.398	20.135
15	5.352	7.661	9.259	10.804	12.804	19.243
16	5.135	7.35	8.883	10.366	12.284	18.462
17	4.943	7.075	8.552	9.979	11.826	17.773
18	4.773	6.832	8.257	9.635	11.418	17.16
19	4.62	6.613	7.994	9.327	11.054	16.612
20	4.483	6.417	7.756	9.05	10.726	16.119
21	4.359	6.239	7.542	8.8	10.429	15.673
22	4.246	6.078	7.346	8.572	10.159	15.267
23	4.143	5.931	7.168	8.364	9.912	14.897
24	4.049	5.795	7.005	8.174	9.686	14.557

Tabla 4.16. Valores de I (mm/hr) para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 30021.

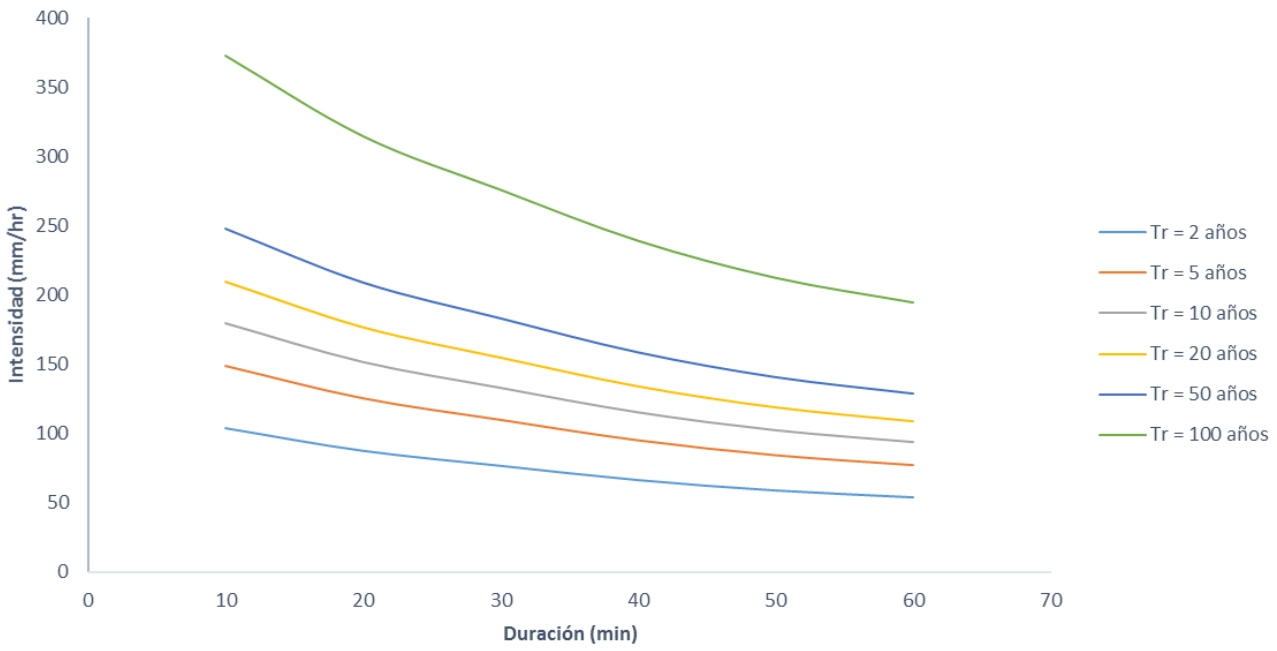


Figura 4.13. Curvas i-d-Tr de la estación 30021 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

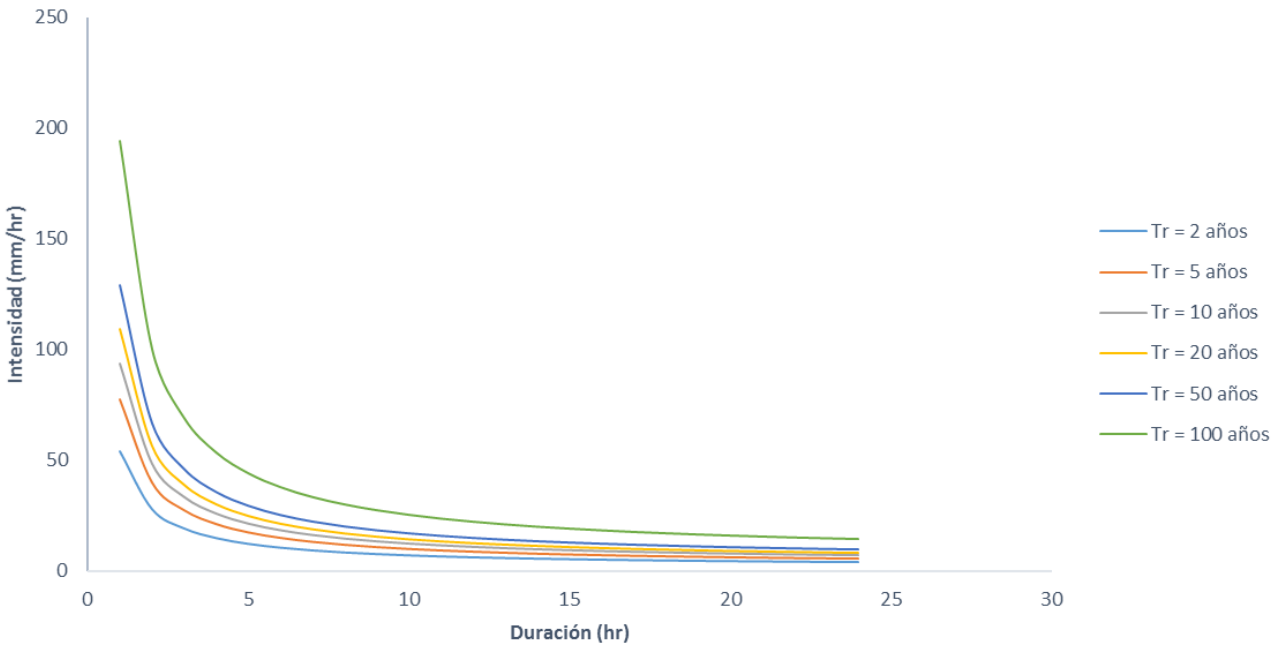


Figura 4.14. Curvas i-d-Tr de la estación 30021 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MENORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(minutos)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
10	105.984	146.423	207.794	242.631	270.435	287.108
20	89.424	123.544	175.327	204.72	228.18	242.247
30	78.384	108.292	153.681	179.446	200.009	212.34
40	67.896	93.802	133.118	155.435	173.248	183.928
50	60.278	83.278	118.183	137.996	153.81	163.292
60	55.2	76.262	108.226	126.37	140.852	149.535

Tabla 4.17. Valores de I (mm/hr) para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 30068.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MAYORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(horas)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
1	55.2	76.262	108.226	126.37	140.852	149.535
2	28.622	39.543	56.118	65.526	73.035	77.537
3	19.763	27.304	38.748	45.244	50.429	53.538
4	15.334	21.184	30.063	35.103	39.126	41.538
5	12.676	17.512	24.853	29.019	32.344	34.338
6	10.904	15.064	21.379	24.963	27.823	29.539
7	9.638	13.316	18.897	22.065	24.594	26.11
8	8.689	12.005	17.036	19.892	22.172	23.539
9	7.951	10.985	15.589	18.202	20.288	21.539
10	7.36	10.169	14.431	16.85	18.781	19.939
11	6.877	9.501	13.483	15.744	17.548	18.63
12	6.474	8.945	12.694	14.822	16.52	17.539
13	6.134	8.474	12.026	14.042	15.651	16.616
14	5.842	8.07	11.453	13.373	14.906	15.825
15	5.588	7.721	10.957	12.794	14.26	15.139
16	5.367	7.415	10.523	12.287	13.695	14.539
17	5.172	7.145	10.139	11.839	13.196	14.01
18	4.998	6.905	9.799	11.442	12.753	13.539
19	4.842	6.69	9.494	11.086	12.356	13.118
20	4.703	6.497	9.22	10.766	11.999	12.739
21	4.576	6.322	8.972	10.476	11.676	12.396
22	4.461	6.163	8.746	10.213	11.383	12.085
23	4.356	6.018	8.54	9.972	11.115	11.8
24	4.26	5.885	8.351	9.752	10.869	11.539

Tabla 4.18. Valores de I (mm/hr) para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 30068.

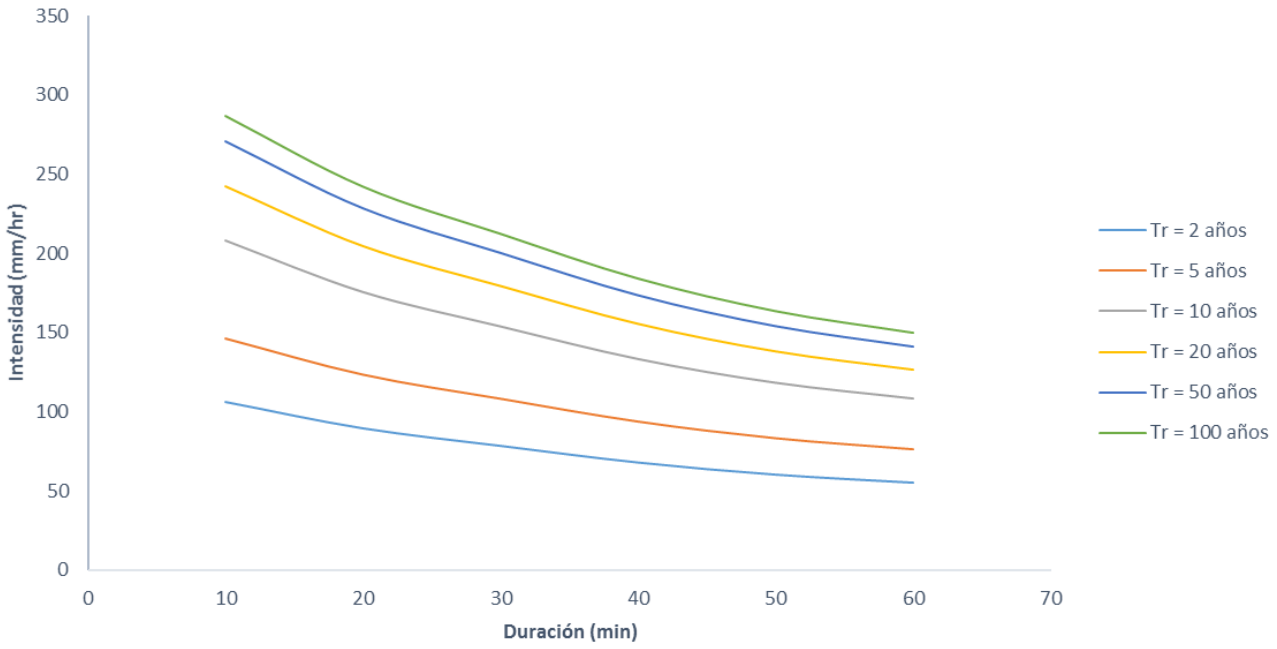


Figura 4.15. Curvas i-d-Tr de la estación 30068 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

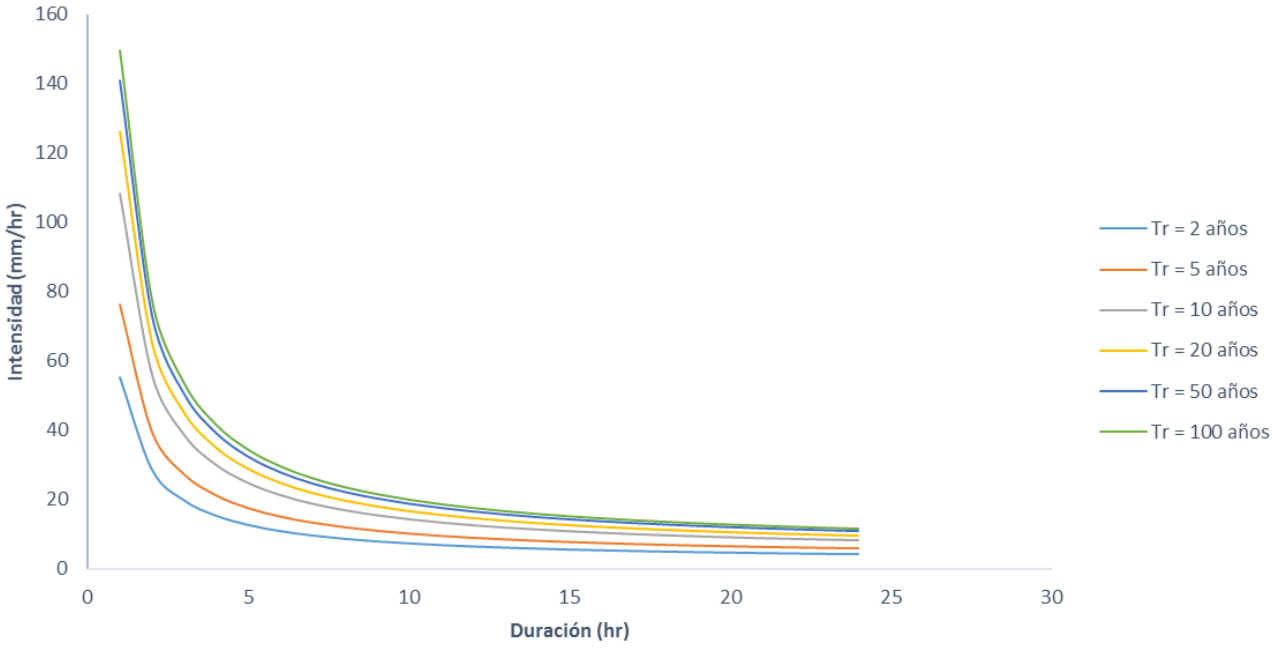


Figura 4.16. Curvas i-d-Tr de la estación 30068 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MENORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(minutos)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
10	108.096	146.2	181.951	211.161	235.294	251.464
20	91.206	123.356	153.521	178.167	198.529	212.172
30	79.946	108.127	134.568	156.171	174.02	185.978
40	69.249	93.659	116.562	135.275	150.735	161.094
50	61.48	83.151	103.484	120.098	133.824	143.02
60	56.3	76.146	94.766	109.98	122.549	130.971

Tabla 4.19. Valores de I (mm/hr) para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 30087.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MAYORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(horas)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
1	56.3	76.146	94.766	109.98	122.549	130.971
2	28.842	39.008	48.547	56.341	62.78	67.094
3	19.689	26.629	33.141	38.461	42.857	45.802
4	15.112	20.44	25.438	29.522	32.896	35.156
5	12.367	16.726	20.816	24.158	26.919	28.768
6	10.536	14.25	17.735	20.582	22.934	24.51
7	9.229	12.482	15.534	18.028	20.088	21.468
8	8.248	11.155	13.883	16.112	17.953	19.187
9	7.485	10.124	12.599	14.622	16.293	17.413
10	6.875	9.298	11.572	13.43	14.965	15.993
11	6.376	8.623	10.732	12.455	13.878	14.832
12	5.96	8.06	10.032	11.642	12.973	13.864
13	5.608	7.584	9.439	10.954	12.206	13.045
14	5.306	7.176	8.931	10.365	11.549	12.343
15	5.044	6.823	8.491	9.854	10.98	11.735
16	4.816	6.513	8.106	9.407	10.482	11.203
17	4.614	6.24	7.766	9.013	10.043	10.733
18	4.434	5.997	7.464	8.662	9.652	10.315
19	4.274	5.78	7.194	8.348	9.303	9.942
20	4.129	5.585	6.95	8.066	8.988	9.606
21	3.998	5.408	6.73	7.811	8.703	9.301
22	3.88	5.247	6.53	7.578	8.445	9.025
23	3.771	5.1	6.347	7.366	8.208	8.772
24	3.671	4.966	6.18	7.172	7.992	8.541

Tabla 4.20. Valores de I (mm/hr) para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 30087.

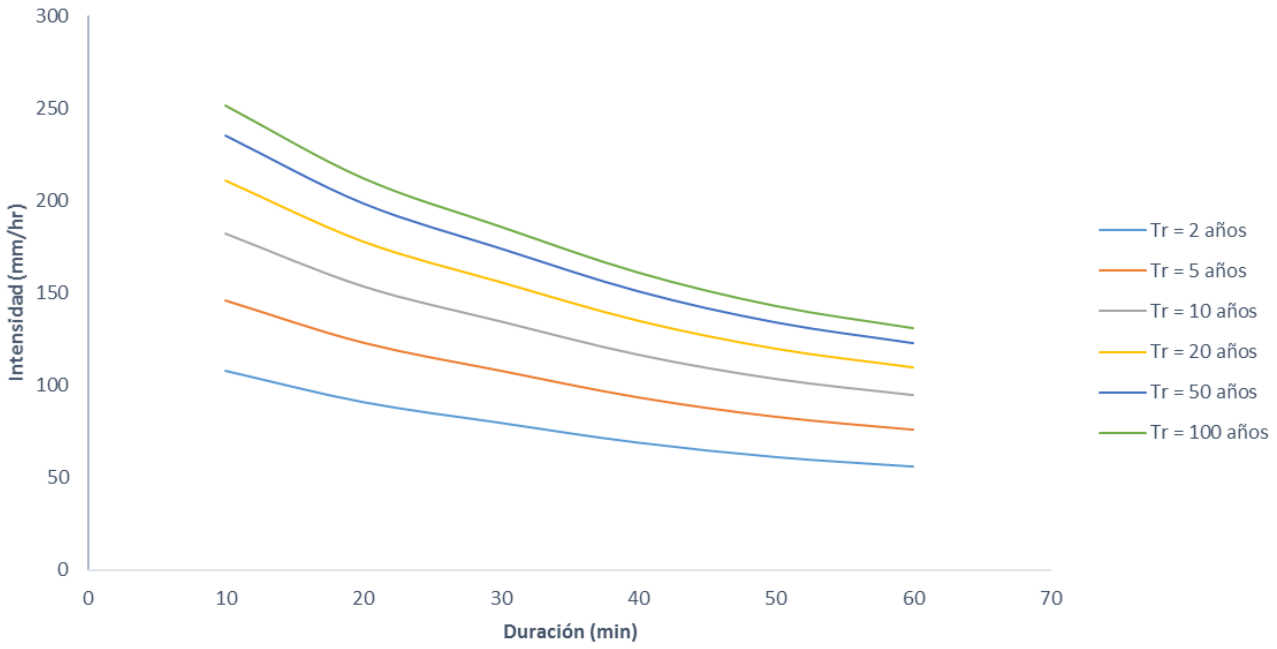


Figura 4.17. Curvas i-d-Tr de la estación 30087 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

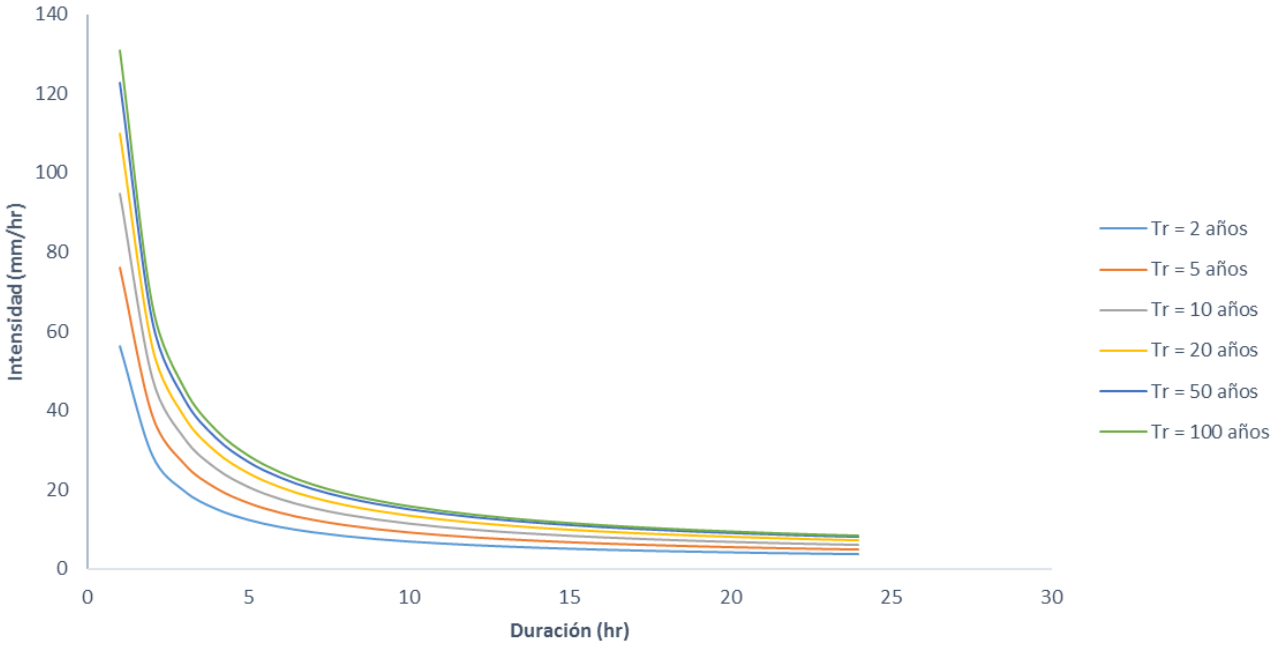


Figura 4.18. Curvas i-d-Tr de la estación 30087 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MENORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(minutos)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
10	110.976	159.947	220.916	234.984	244.711	254.035
20	93.636	134.956	186.398	198.268	206.475	214.342
30	82.076	118.294	163.386	173.79	180.984	187.88
40	71.094	102.466	141.525	150.537	156.768	162.741
50	63.118	90.97	125.646	133.647	139.179	144.483
60	57.8	83.306	115.061	122.388	127.454	132.31

Tabla 4.21. Valores de I (mm/hr) para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 30140.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MAYORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(horas)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
1	57.8	83.306	115.061	122.388	127.454	132.31
2	29.799	42.949	59.32	63.098	65.71	68.214
3	20.466	29.497	40.74	43.335	45.128	46.848
4	15.799	22.771	31.45	33.453	34.838	36.165
5	12.999	18.735	25.876	27.524	28.663	29.756
6	11.132	16.044	22.16	23.571	24.547	25.482
7	9.799	14.123	19.506	20.748	21.607	22.43
8	8.799	12.681	17.515	18.631	19.402	20.141
9	8.021	11.56	15.967	16.984	17.687	18.361
10	7.399	10.664	14.728	15.666	16.315	16.936
11	6.89	9.93	13.715	14.588	15.192	15.771
12	6.465	9.318	12.87	13.69	14.256	14.8
13	6.106	8.801	12.156	12.93	13.465	13.978
14	5.799	8.357	11.543	12.278	12.786	13.274
15	5.532	7.973	11.012	11.713	12.198	12.663
16	5.299	7.637	10.548	11.219	11.684	12.129
17	5.093	7.34	10.138	10.783	11.23	11.658
18	4.91	7.076	9.774	10.396	10.826	11.239
19	4.746	6.84	9.448	10.049	10.465	10.864
20	4.599	6.628	9.154	9.737	10.14	10.527
21	4.465	6.436	8.889	9.455	9.846	10.221
22	4.344	6.261	8.648	9.198	9.579	9.944
23	4.233	6.101	8.427	8.964	9.335	9.691
24	4.132	5.955	8.225	8.749	9.111	9.458

Tabla 4.22. Valores de I (mm/hr) para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 30140.

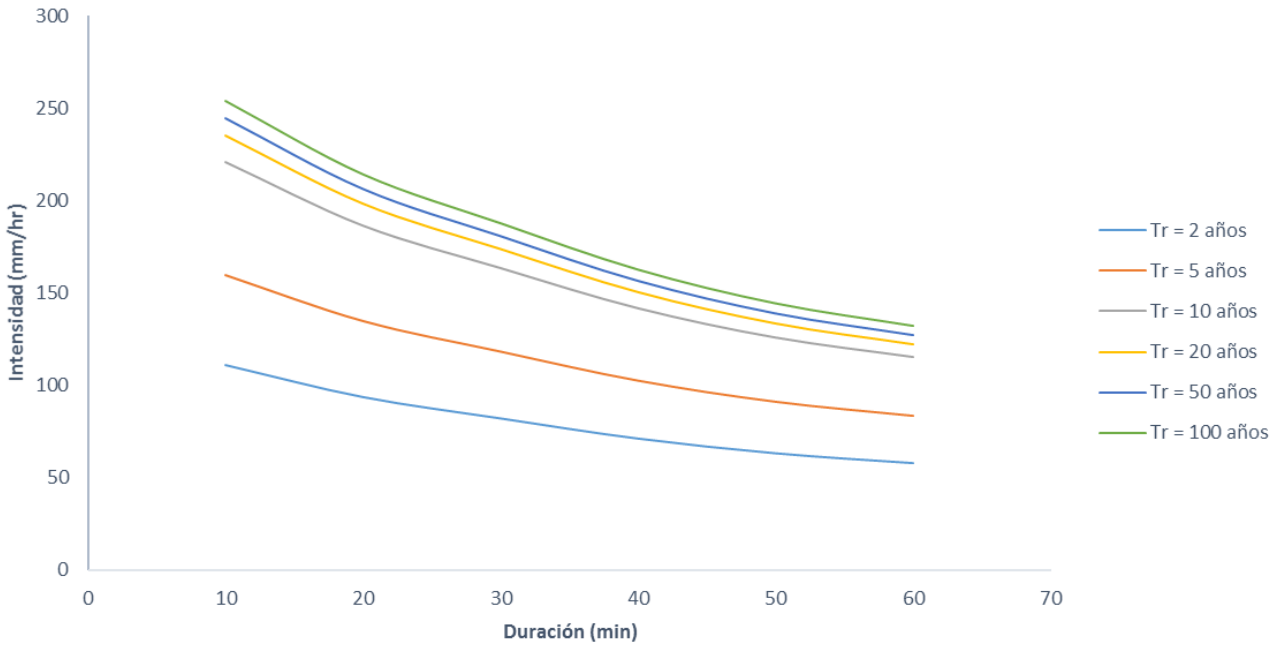


Figura 4.19. Curvas i-d-Tr de la estación 30140 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

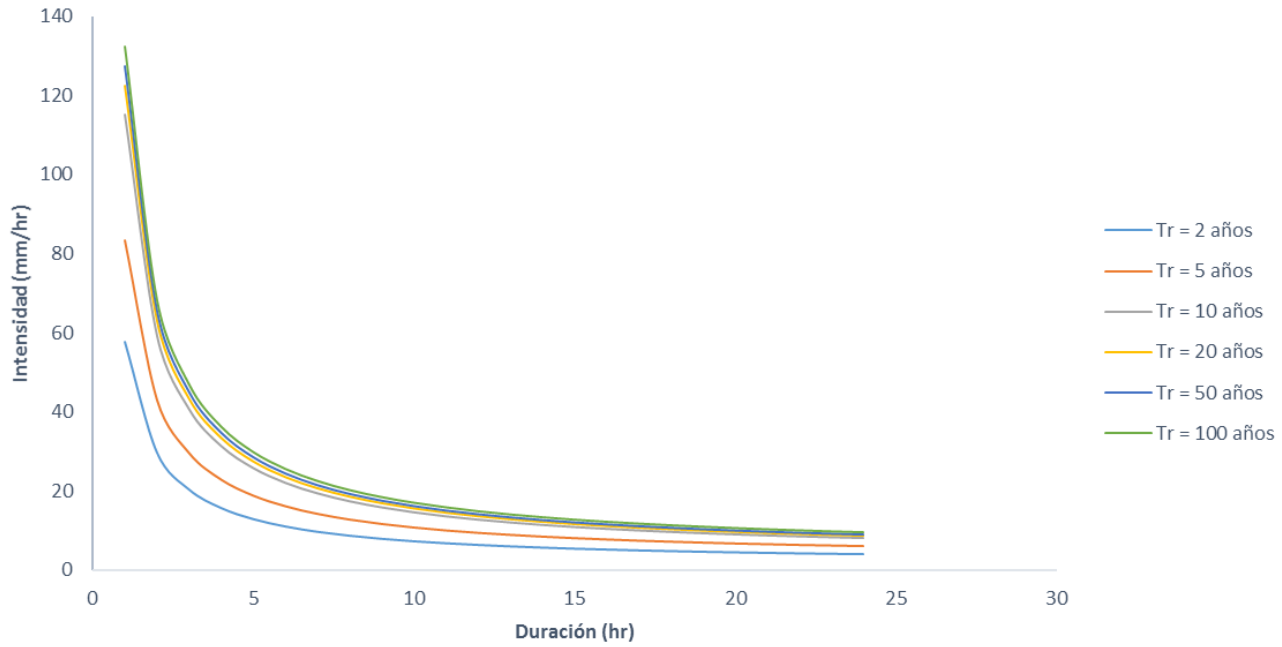


Figura 4.20. Curvas i-d-Tr de la estación 30140 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MENORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(minutos)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
10	102.336	141.95	178.59	202.335	222.743	237.426
20	86.346	119.771	150.685	170.72	187.94	200.328
30	75.686	104.984	132.082	149.643	164.737	175.596
40	65.559	90.937	114.409	129.621	142.695	152.101
50	58.204	80.734	101.573	115.078	126.685	135.036
60	53.3	73.932	93.016	105.383	116.012	123.659

Tabla 4.23. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 30141.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MAYORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(horas)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
1	53.3	73.932	93.016	105.383	116.012	123.659
2	27.691	38.41	48.324	54.749	60.272	64.244
3	19.154	26.569	33.427	37.871	41.691	44.439
4	14.886	20.649	25.979	29.432	32.401	34.537
5	12.325	17.096	21.509	24.369	26.827	28.595
6	10.618	14.728	18.53	20.994	23.111	24.635
7	9.399	13.037	16.402	18.582	20.457	21.805
8	8.484	11.768	14.806	16.774	18.466	19.683
9	7.773	10.781	13.564	15.368	16.918	18.033
10	7.203	9.992	12.571	14.242	15.679	16.713
11	6.738	9.346	11.758	13.322	14.666	15.632
12	6.35	8.808	11.081	12.555	13.821	14.732
13	6.022	8.352	10.508	11.906	13.106	13.97
14	5.74	7.962	10.017	11.349	12.494	13.317
15	5.496	7.624	9.592	10.867	11.963	12.752
16	5.283	7.328	9.219	10.445	11.498	12.256
17	5.095	7.067	8.891	10.073	11.089	11.82
18	4.927	6.834	8.598	9.742	10.724	11.431
19	4.777	6.627	8.337	9.446	10.398	11.084
20	4.643	6.44	8.102	9.179	10.105	10.771
21	4.521	6.271	7.889	8.938	9.84	10.488
22	4.41	6.117	7.696	8.719	9.598	10.231
23	4.309	5.976	7.519	8.519	9.378	9.996
24	4.216	5.848	7.357	8.335	9.176	9.781

Tabla 4.24. Valores de I (mm/hr) para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 30141.

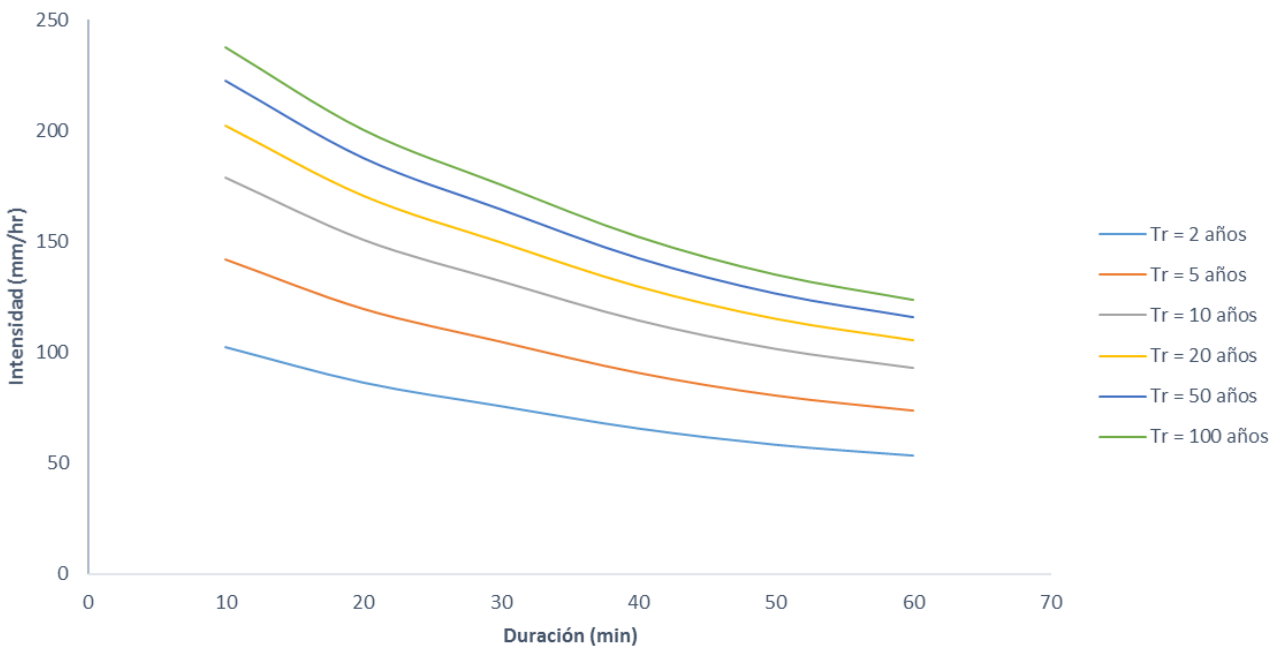


Figura 4.21. Curvas i-d-Tr de la estación 30141 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

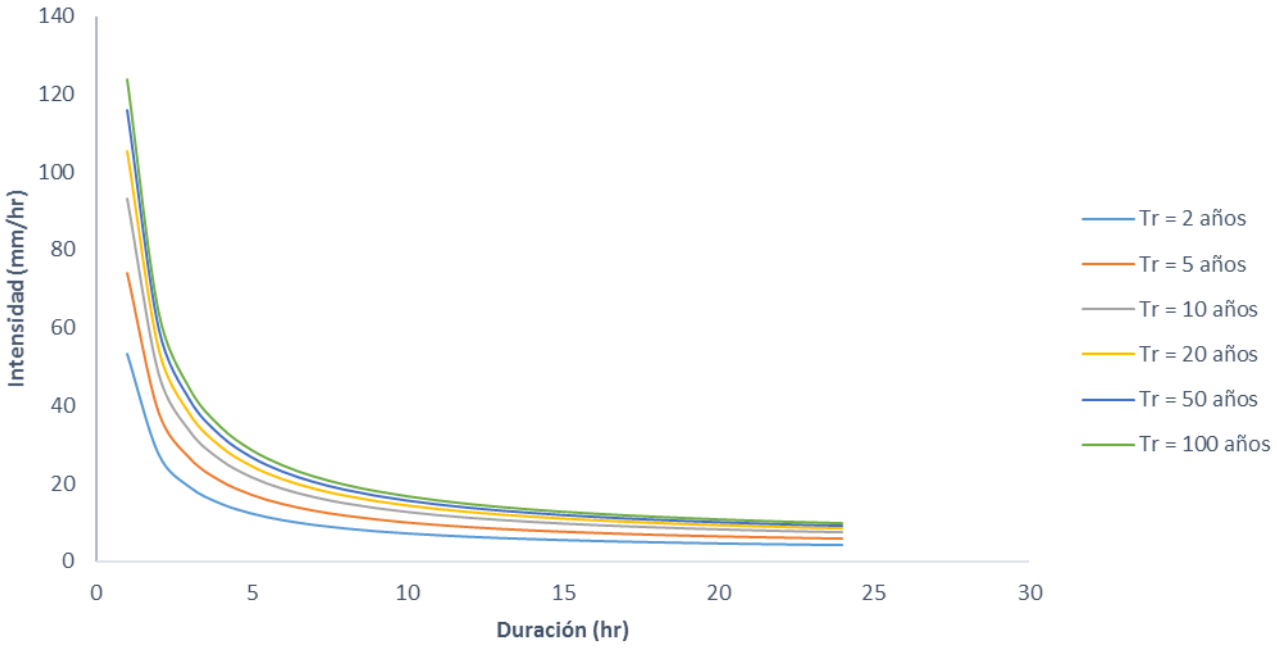


Figura 4.22. Curvas i-d-Tr de la estación 30141 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MENORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(minutos)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
10	102.144	140.512	165.915	190.282	221.823	245.459
20	86.184	118.557	139.991	160.551	187.163	207.106
30	75.544	103.92	122.708	140.73	164.057	181.537
40	65.436	90.016	106.289	121.9	142.105	157.247
50	58.094	79.916	94.364	108.223	126.162	139.605
60	53.2	73.183	86.414	99.105	115.533	127.843

Tabla 4.25. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 30195.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MAYORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(horas)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
1	53.2	73.183	86.414	99.105	115.533	127.843
2	27.535	37.879	44.727	51.295	59.798	66.17
3	18.981	26.11	30.831	35.359	41.22	45.612
4	14.703	20.226	23.883	27.39	31.931	35.333
5	12.137	16.696	19.714	22.609	26.357	29.165
6	10.426	14.342	16.935	19.422	22.641	25.054
7	9.204	12.661	14.95	17.145	19.987	22.117
8	8.287	11.4	13.461	15.438	17.997	19.914
9	7.574	10.419	12.303	14.11	16.449	18.201
10	7.004	9.635	11.377	13.047	15.21	16.831
11	6.537	8.993	10.619	12.178	14.197	15.709
12	6.148	8.458	9.987	11.454	13.352	14.775
13	5.819	8.005	9.453	10.841	12.638	13.984
14	5.537	7.617	8.994	10.315	12.025	13.307
15	5.293	7.281	8.597	9.86	11.494	12.719
16	5.079	6.987	8.25	9.462	11.03	12.205
17	4.89	6.727	7.943	9.11	10.62	11.752
18	4.723	6.497	7.671	8.798	10.256	11.349
19	4.573	6.29	7.427	8.518	9.93	10.988
20	4.437	6.104	7.208	8.266	9.637	10.663
21	4.315	5.936	7.009	8.039	9.371	10.37
22	4.204	5.783	6.829	7.832	9.13	10.103
23	4.103	5.644	6.664	7.643	8.91	9.859
24	4.01	5.516	6.513	7.47	8.708	9.636

Tabla 4.26. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 30195.

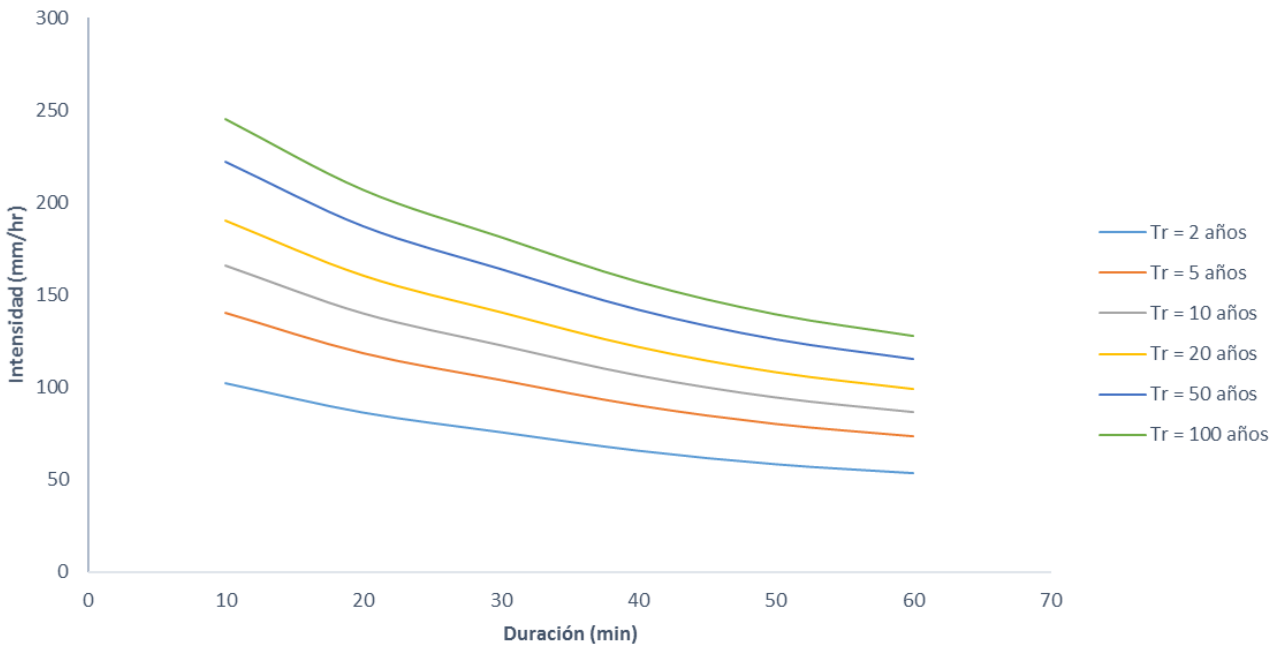


Figura 4.23. Curvas i-d-Tr de la estación 30195 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

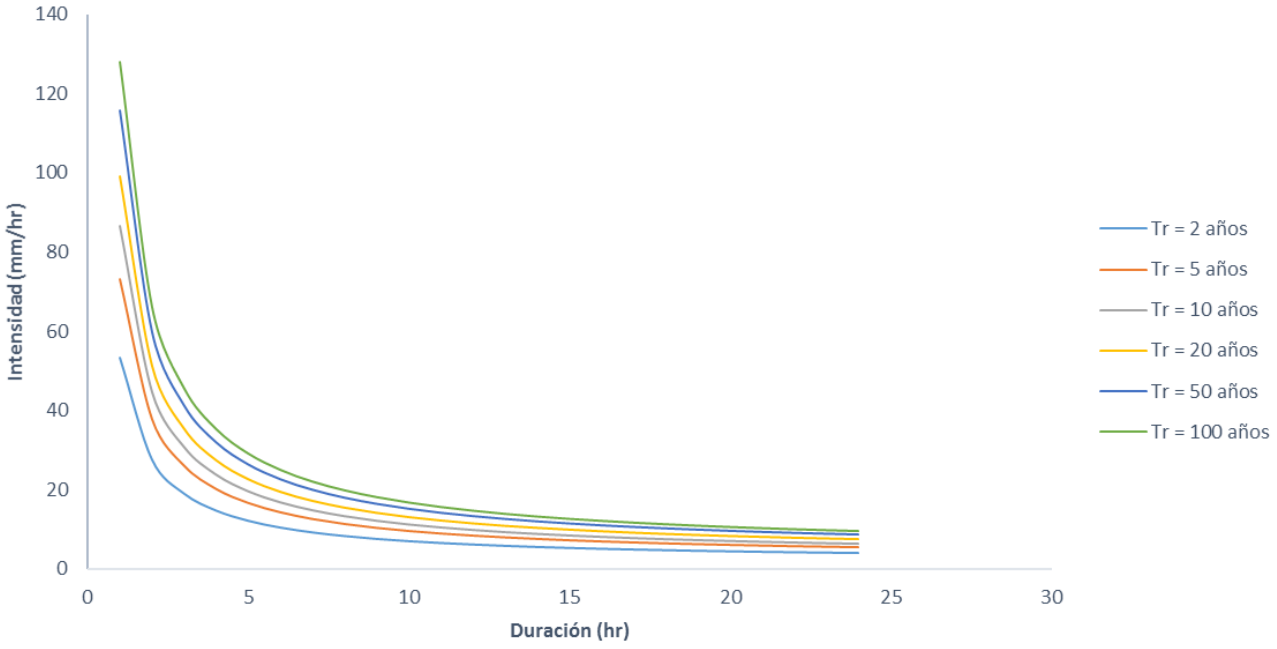


Figura 4.24. Curvas i-d-Tr de la estación 30195 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MENORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(minutos)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
10	107.136	145.148	170.316	194.457	225.705	249.122
20	90.396	122.469	143.704	164.073	190.439	210.196
30	79.236	107.349	125.963	143.817	166.928	184.246
40	68.634	92.986	109.108	124.574	144.592	159.593
50	60.934	82.553	96.867	110.597	128.37	141.688
60	55.8	75.598	88.706	101.28	117.555	129.751

Tabla 4.27. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 30228.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MAYORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(horas)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
1	55.8	75.598	88.706	101.28	117.555	129.751
2	28.595	38.74	45.458	51.901	60.241	66.491
3	19.526	26.454	31.041	35.441	41.137	45.404
4	14.992	20.311	23.833	27.211	31.584	34.861
5	12.272	16.626	19.508	22.274	25.853	28.535
6	10.458	14.168	16.625	18.982	22.032	24.318
7	9.162	12.413	14.566	16.63	19.303	21.305
8	8.191	11.097	13.021	14.867	17.256	19.046
9	7.435	10.073	11.82	13.495	15.664	17.289
10	6.831	9.254	10.859	12.398	14.39	15.883
11	6.336	8.584	10.072	11.5	13.348	14.733
12	5.924	8.026	9.417	10.752	12.48	13.774
13	5.575	7.553	8.863	10.119	11.745	12.963
14	5.276	7.148	8.387	9.576	11.115	12.268
15	5.017	6.797	7.975	9.106	10.569	11.666
16	4.79	6.49	7.615	8.694	10.092	11.139
17	4.59	6.219	7.297	8.331	9.67	10.673
18	4.412	5.978	7.014	8.009	9.296	10.26
19	4.253	5.762	6.761	7.72	8.96	9.89
20	4.11	5.568	6.534	7.46	8.659	9.557
21	3.981	5.393	6.328	7.225	8.386	9.256
22	3.863	5.233	6.141	7.011	8.138	8.982
23	3.755	5.088	5.97	6.816	7.911	8.732
24	3.657	4.954	5.813	6.637	7.704	8.503

Tabla 4.28. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 30228.

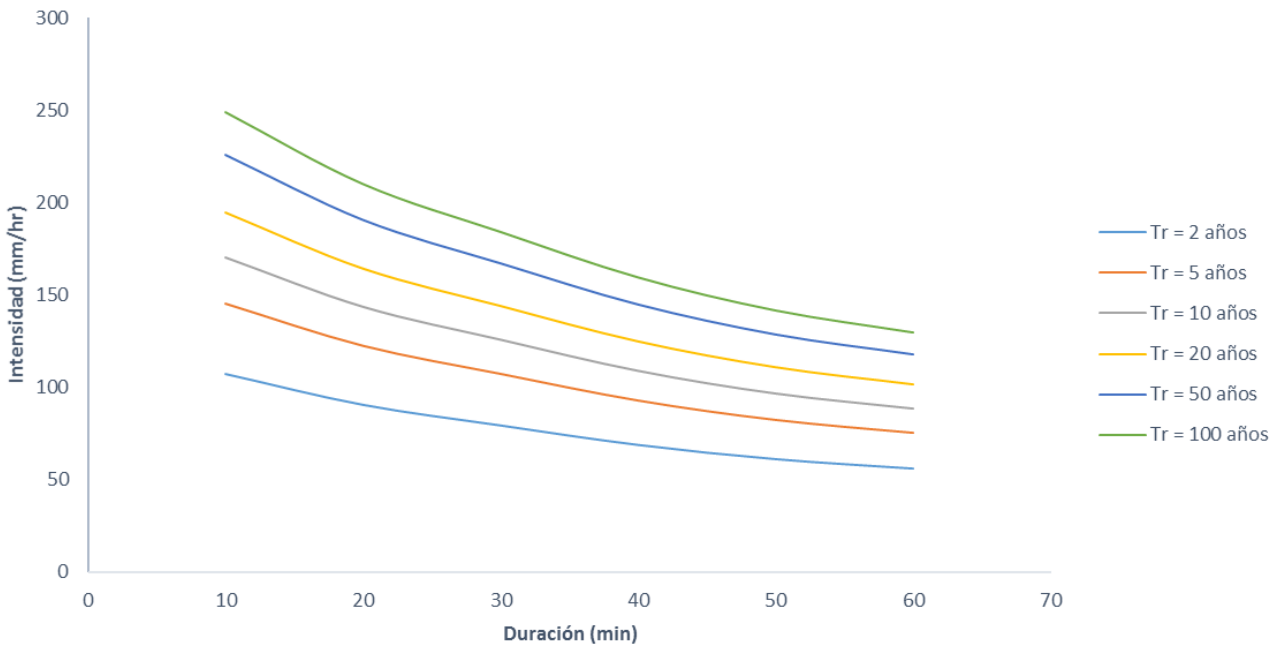


Figura 4.25. Curvas i-d-Tr de la estación 30228 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

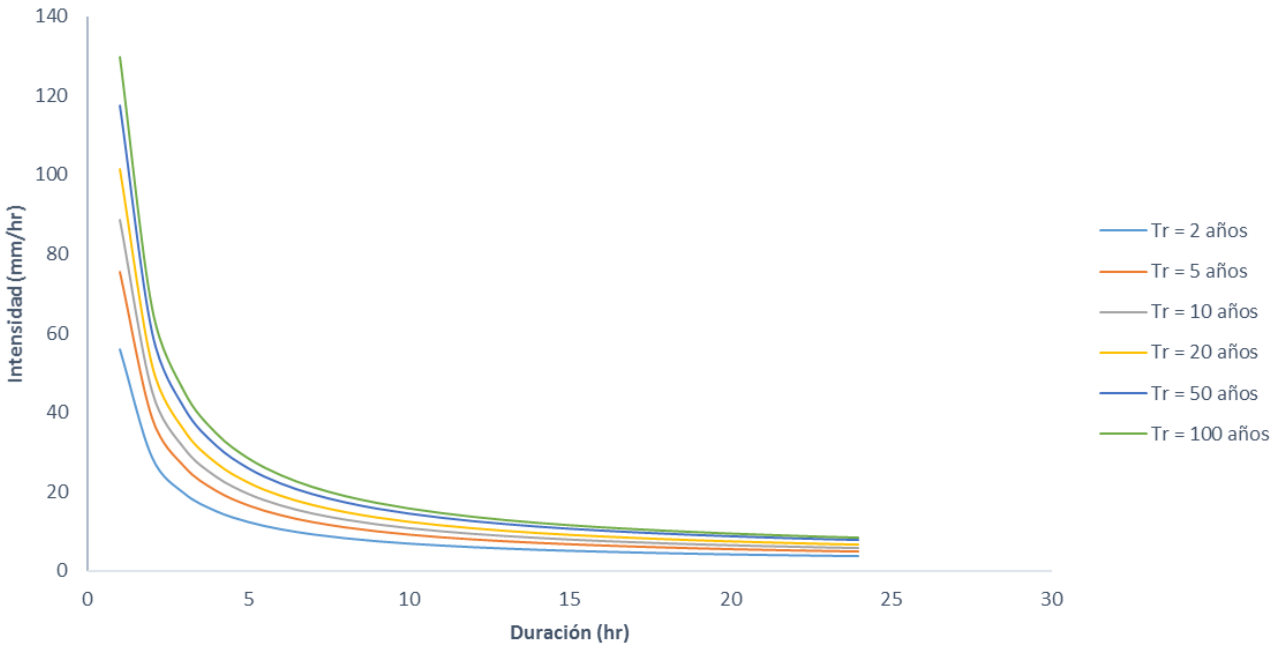


Figura 4.26. Curvas i-d-Tr de la estación 30228 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MENORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(minutos)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
10	101.76	143.263	195.168	215.683	227.963	237.131
20	85.86	120.878	164.673	181.983	192.344	200.079
30	75.26	105.955	144.343	159.516	168.598	175.378
40	65.19	91.778	125.03	138.172	146.039	151.912
50	57.876	81.481	111.002	122.67	129.654	134.868
60	53	74.616	101.65	112.335	118.731	123.505

Tabla 4.29. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 30266.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MAYORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(horas)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
1	53	74.616	101.65	112.335	118.731	123.505
2	27.432	38.62	52.612	58.142	61.452	63.923
3	18.909	26.621	36.266	40.078	42.359	44.063
4	14.647	20.621	28.092	31.045	32.813	34.132
5	12.09	17.022	23.189	25.626	27.085	28.174
6	10.386	14.622	19.919	22.013	23.266	24.202
7	9.168	12.908	17.584	19.433	20.539	21.365
8	8.255	11.622	15.833	17.497	18.493	19.237
9	7.545	10.622	14.471	15.992	16.902	17.582
10	6.977	9.822	13.381	14.787	15.629	16.258
11	6.512	9.168	12.489	13.802	14.588	15.175
12	6.124	8.622	11.746	12.981	13.72	14.272
13	5.797	8.161	11.118	12.286	12.986	13.508
14	5.516	7.765	10.579	11.691	12.356	12.853
15	5.272	7.422	10.112	11.175	11.811	12.286
16	5.059	7.122	9.703	10.723	11.333	11.789
17	4.871	6.858	9.342	10.324	10.912	11.351
18	4.704	6.623	9.022	9.97	10.538	10.962
19	4.554	6.412	8.735	9.653	10.203	10.613
20	4.42	6.223	8.477	9.368	9.901	10.3
21	4.298	6.051	8.244	9.11	9.629	10.016
22	4.187	5.895	8.031	8.875	9.381	9.758
23	4.086	5.753	7.837	8.661	9.154	9.523
24	3.994	5.623	7.66	8.465	8.947	9.307

Tabla 4.30. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 30266.

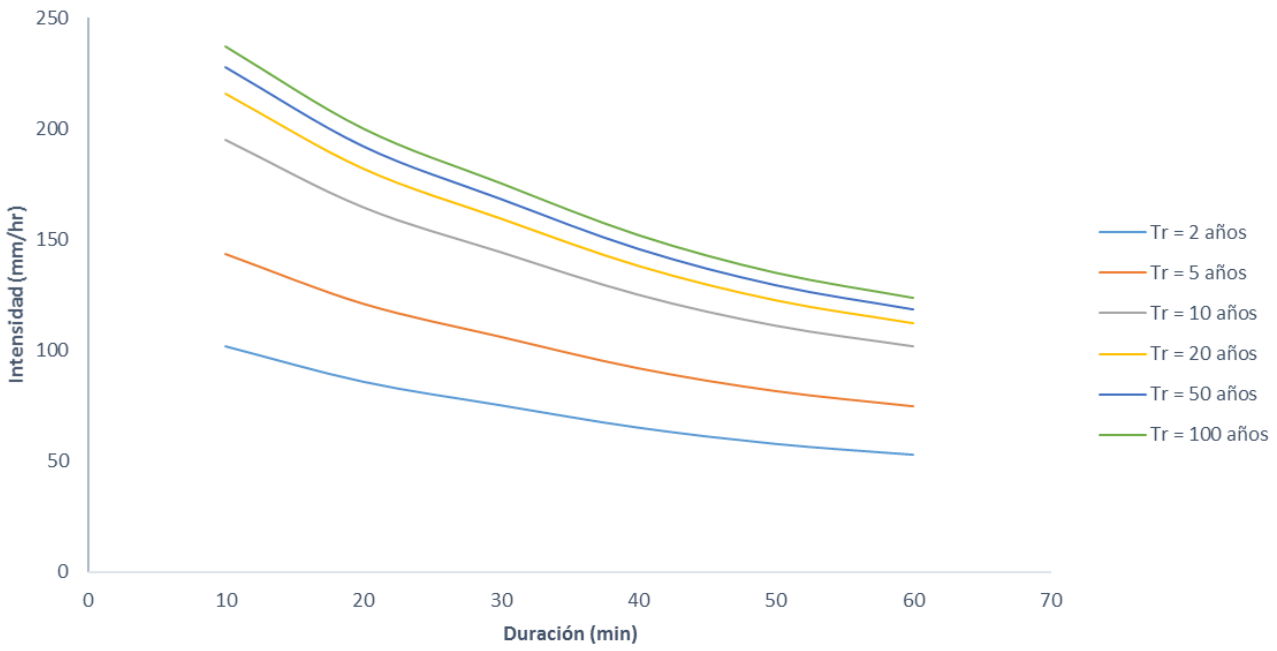


Figura 4.27. Curvas i-d-Tr de la estación 30266 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

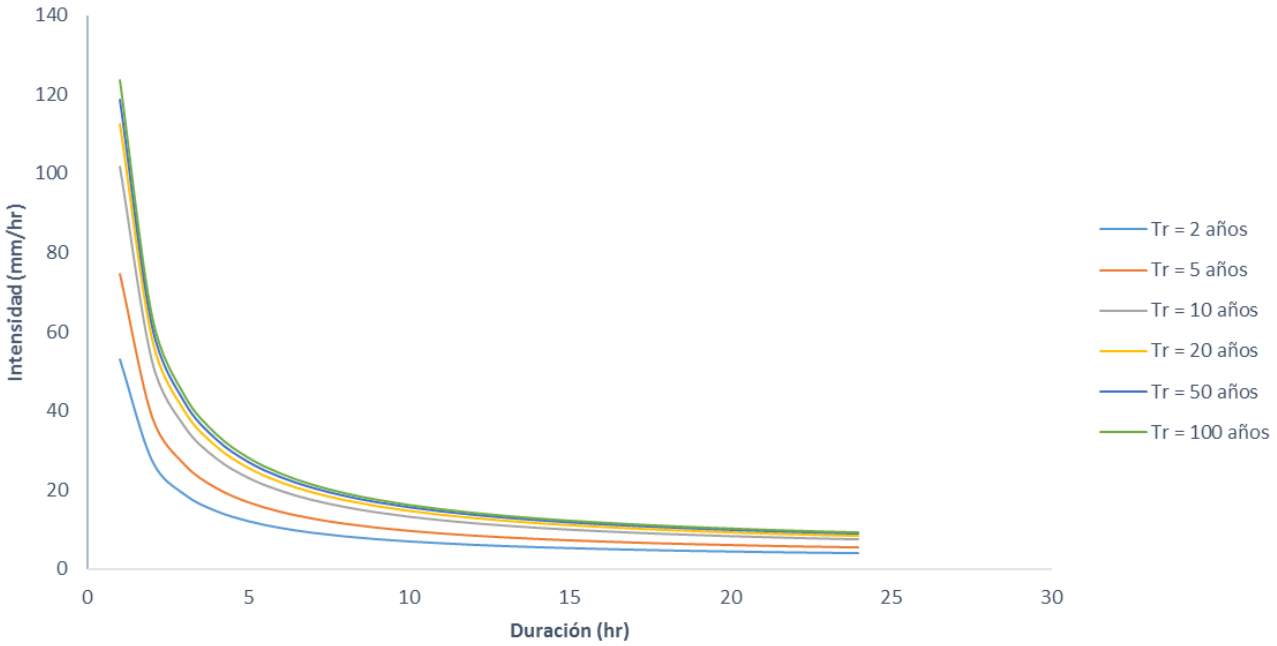


Figura 4.28. Curvas i-d-Tr de la estación 30266 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MENORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(minutos)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
10	103.872	151.668	198.724	244.408	273.997	293.137
20	87.642	127.97	167.673	206.219	231.185	247.335
30	76.822	112.171	146.973	180.76	202.644	216.799
40	66.543	97.162	127.308	156.574	175.529	187.791
50	59.077	86.261	113.024	139.007	155.836	166.722
60	54.1	78.994	103.502	127.296	142.707	152.676

Tabla 4.31. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones menores a una hora para la estación 30339.

CURVAS I-D-TR PARA DURACIONES MAYORES A UNA HORA						
DURACIÓN	**PERIODO DE RETORNO (AÑOS)**					
(horas)	**2**	**5**	**10**	**20**	**50**	**100**
1	54.1	78.994	103.502	127.296	142.707	152.676
2	27.841	40.652	53.264	65.509	73.44	78.57
3	19.088	27.871	36.518	44.913	50.351	53.868
4	14.711	21.481	28.145	34.615	38.806	41.517
5	12.085	17.646	23.121	28.437	31.879	34.106
6	10.335	15.09	19.772	24.317	27.261	29.166
7	9.084	13.264	17.38	21.375	23.963	25.637
8	8.147	11.895	15.586	19.169	21.489	22.99
9	7.417	10.83	14.19	17.452	19.565	20.932
10	6.834	9.978	13.074	16.079	18.026	19.285
11	6.356	9.281	12.16	14.956	16.766	17.938
12	5.958	8.7	11.399	14.02	15.717	16.815
13	5.622	8.208	10.755	13.228	14.829	15.865
14	5.333	7.787	10.203	12.549	14.068	15.05
15	5.083	7.422	9.725	11.96	13.408	14.345
16	4.864	7.102	9.306	11.445	12.831	13.727
17	4.671	6.82	8.937	10.991	12.321	13.182
18	4.499	6.57	8.608	10.587	11.869	12.698
19	4.346	6.346	8.314	10.226	11.464	12.264
20	4.208	6.144	8.05	9.901	11.099	11.874
21	4.083	5.961	7.811	9.606	10.769	11.522
22	3.969	5.795	7.593	9.339	10.469	11.201
23	3.865	5.644	7.395	9.095	10.196	10.908
24	3.77	5.505	7.213	8.871	9.945	10.639

Tabla 4.32. Valores de I [mm/hr] para diferentes periodos de retorno (Tr) y duraciones mayores a una hora para la estación 30339.

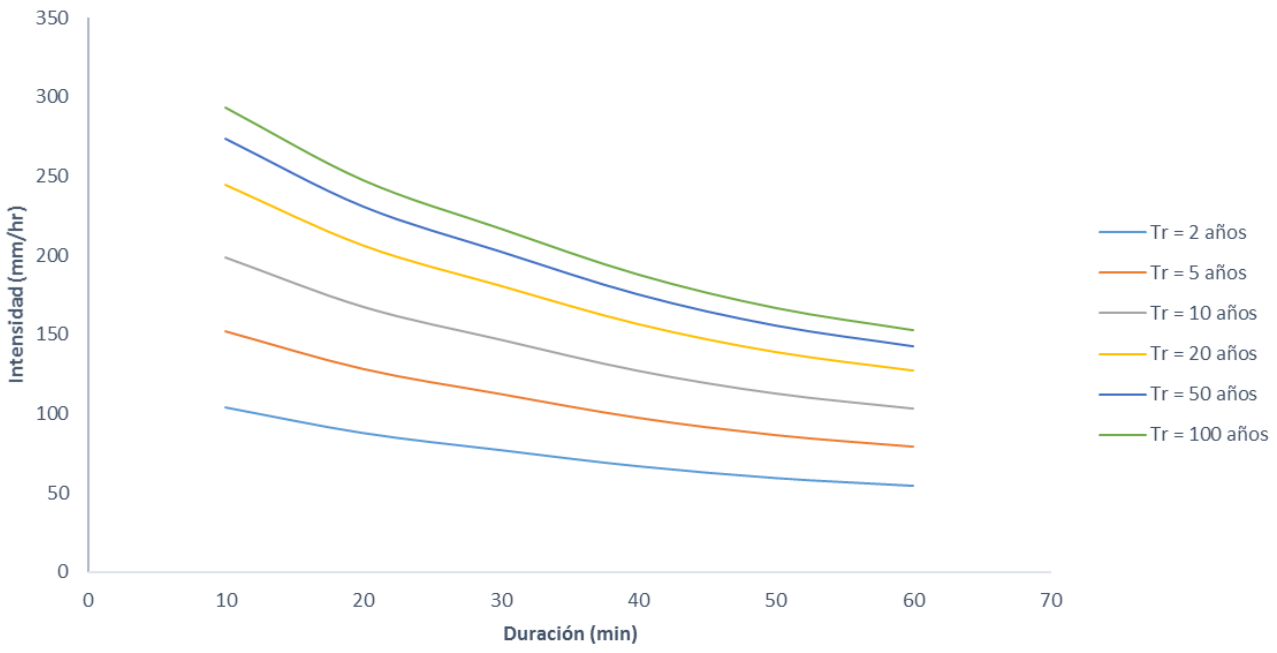


Figura 4.29. Curvas i-d-Tr de la estación 30339 para duraciones menores de una hora y diferentes periodos de retorno.

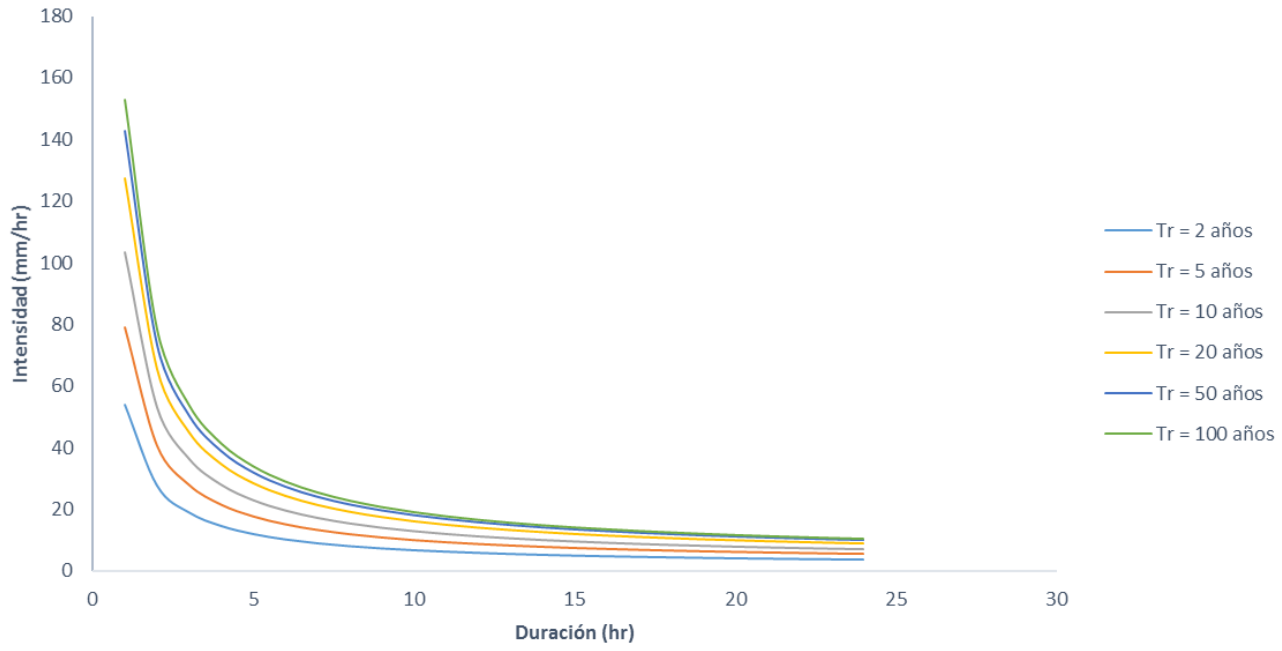


Figura 4.30. Curvas i-d-Tr de la estación 30339 para duraciones mayores de una hora y diferentes periodos de retorno.

4.5. Aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE).

4.5.1.1. Obtención del factor erosivo R a través de Registros Pluviógraficos - Registros de EMA´s.

Analizando el registro de precipitación diaria para la EMA Jalapa en la zona central del estado se encontraron 369 eventos de tormentas erosivas; para cada hp se obtuvo el potencial erosivo R con la ecuación (3.4), Los resultados se presentan en la tabla 4.33.

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2000	MAR	17	1.17	10.91	9.35	19.80	5.219
2000	ABR	28	2.33	25.12	10.77	45.72	31.456
2000	ABR	29	3.00	25.63	8.54	32.50	20.267
2000	MAY	05	1.17	20.57	17.63	36.06	18.242
2000	MAY	07	2.50	42.95	17.18	67.58	76.038
2000	MAY	10	0.67	14.47	21.71	28.44	10.623
2000	MAY	13	0.83	29.46	35.35	46.74	35.498
2000	MAY	14	2.67	11.18	4.19	6.12	1.192
2000	MAY	20	0.67	14.47	21.71	27.94	9.874
2000	MAY	21	1.67	12.95	7.77	13.22	3.807
2000	MAY	28	2.33	19.55	8.38	25.92	11.407
2000	MAY	29	1.17	26.93	23.08	28.46	18.421
2000	MAY	29	3.33	13.18	3.95	18.30	5.003
2000	JUN	06	3.67	29.74	8.11	29.48	18.866
2000	JUN	07	4.33	41.64	9.61	54.36	55.230
2000	JUN	08	4.33	40.86	9.43	43.70	42.303
2000	JUN	10	4.17	27.16	6.52	13.20	7.080
2000	JUN	12	5.67	15.98	2.82	7.62	2.130
2000	JUN	19	2.17	19.8	9.14	13.22	5.610
2000	JUN	20	2.33	15.73	6.74	15.74	5.189
2000	JUN	24	2.00	44.95	22.48	53.84	60.564
2000	JUL	08	1.83	23.61	12.88	28.44	16.049
2000	JUL	26	1.33	12.2	9.15	17.28	4.548
2000	JUL	28	1.50	27.67	18.45	41.64	28.646
2000	AGO	03	0.50	13.71	27.42	26.92	8.979
2000	AGO	03	0.50	10.16	20.32	19.82	4.719
2000	AGO	04	1.33	17.01	12.76	23.86	9.239
2000	AGO	09	6.33	84.34	13.32	45.20	88.277
2000	AGO	09	4.33	16.2	3.74	13.70	4.184

Tabla 4.33. Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa.

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2000	AGO	10	2.50	24.38	9.75	19.30	10.177
2000	AGO	12	6.33	28.14	4.44	33.52	20.326
2000	AGO	13	2.33	31.49	13.50	41.66	31.808
2000	AGO	15	3.33	47.49	14.25	44.20	51.126
2000	AGO	18	1.50	23.36	15.57	37.08	21.491
2000	AGO	29	3.50	11.42	3.26	5.08	0.962
2000	AGO	31	2.17	11.92	5.50	19.82	5.236
2000	SEP	12	1.33	22.1	16.58	39.12	21.575
2000	SEP	15	0.50	26.92	53.84	49.78	35.288
2000	SEP	15	0.50	10.92	21.84	20.82	5.367
2000	SEP	16	1.67	13.71	8.23	13.70	3.828
2000	SEP	19	2.17	10.4	4.80	7.62	1.518
2000	SEP	26	5.33	16.99	3.19	8.62	2.673
2000	OCT	11	5.00	13.92	2.78	7.12	1.701
2001	MAR	02	1.67	20.57	12.34	33.04	16.349
2001	ABR	18	1.83	17.28	9.43	20.34	7.578
2001	ABR	24	0.83	18.02	21.62	23.86	10.076
2001	MAY	08	1.33	29.45	22.09	38.60	29.141
2001	MAY	11	3.50	24.91	7.12	17.28	8.674
2001	MAY	12	3.17	26.65	8.42	21.32	12.451
2001	MAY	22	4.17	14.46	3.47	9.64	2.578
2001	MAY	23	3.67	24.09	6.57	21.32	10.897
2001	MAY	27	1.00	11.68	11.68	19.82	5.221
2001	JUN	01	1.50	14.99	9.99	15.24	4.814
2001	JUN	02	1.00	23.12	23.12	27.94	15.673
2001	JUN	04	2.00	48.75	24.38	78.74	106.087
2001	JUN	06	2.17	14.98	6.91	12.70	3.915
2001	JUN	26	3.33	16.5	4.95	16.78	5.418
2001	JUN	26	2.00	11.41	5.71	14.24	3.368
2001	JUN	27	1.50	11.68	7.79	11.68	2.758
2001	JUN	28	1.67	22.35	13.41	25.42	13.439
2001	JUL	03	0.83	10.42	12.50	15.24	3.433
2001	JUL	03	4.00	15.22	3.81	9.14	2.554
2001	JUL	16	2.50	25.65	10.26	33.04	20.148
2001	JUL	24	1.00	21.07	21.07	37.08	19.577
2001	AGO	03	1.33	15.75	11.81	20.84	7.336

Tabla 4.33. (Continuación) Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2001	AGO	04	1.50	34.8	23.20	35.06	29.980
2001	AGO	05	1.00	11.42	11.42	17.78	4.512
2001	AGO	23	9.50	26.36	2.77	8.12	3.719
2001	AGO	24	2.33	16.76	7.18	18.30	6.466
2001	AGO	24	2.17	10.66	4.92	9.14	1.880
2001	AGO	24	3.17	10.43	3.29	5.60	1.014
2001	AGO	25	3.17	40.37	12.75	40.12	38.544
2001	AGO	26	5.00	30.46	6.09	17.78	11.033
2001	SEP	09	2.33	20.05	8.59	23.36	10.704
2001	SEP	10	2.00	37.08	18.54	28.44	24.526
2001	SEP	14	3.00	10.9	3.63	8.64	1.690
2001	SEP	17	1.00	12.44	12.44	22.88	6.704
2001	SEP	24	3.67	38.57	10.52	48.26	44.704
2001	SEP	25	6.33	15.95	2.52	5.58	1.468
2001	OCT	10	5.17	19.28	3.73	7.12	2.404
2001	OCT	14	2.00	47	23.50	40.14	47.272
2001	OCT	14	5.33	79.51	14.91	63.00	125.367
2001	OCT	25	0.67	14.73	22.10	27.94	10.273
2001	OCT	27	7.50	15.43	2.06	5.08	1.248
2001	NOV	03	1.00	11.17	11.17	16.26	3.921
2001	NOV	07	5.50	10.85	1.97	6.12	1.036
2001	DIC	26	7.67	15.17	1.98	5.58	1.362
2002	ABR	10	2.67	38.61	14.48	50.82	48.193
2002	MAY	31	0.83	14.98	17.98	27.44	10.278
2002	JUN	03	0.83	10.15	12.18	17.26	3.841
2002	JUN	05	1.67	42.66	25.60	60.96	67.277
2002	JUN	07	1.17	17.52	15.02	27.94	11.685
2002	JUN	09	3.67	26.64	7.27	24.88	14.532
2002	JUN	10	1.67	17.75	10.65	29.44	12.536
2002	JUN	13	0.67	21.59	32.39	40.14	22.642
2002	JUN	15	1.00	28.7	28.70	39.62	28.804
2002	JUN	16	4.00	11.64	2.91	15.76	3.628
2002	JUN	21	4.17	36.81	8.83	26.42	21.261
2002	JUN	22	1.67	17.78	10.67	20.34	8.123
2002	JUN	23	1.17	13.45	11.53	14.72	4.293
2002	JUN	27	3.50	41.9	11.97	28.44	27.117
2002	JUL	22	6.67	44.67	6.70	14.72	13.368

Tabla 4.33. (Continuación) Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2002	AGO	24	2.17	15.76	7.27	19.32	6.489
2002	SEP	01	0.83	13.71	16.45	21.32	6.636
2002	SEP	04	6.17	67.53	10.95	26.42	39.853
2002	SEP	08	3.50	21.31	6.09	23.86	11.516
2002	SEP	09	1.00	27.18	27.18	35.06	23.322
2002	SEP	11	5.00	21.32	4.26	10.68	4.156
2002	SEP	14	3.33	35.29	10.59	31.48	25.362
2002	SEP	20	1.00	18.53	18.53	34.02	15.883
2002	SEP	27	2.67	12.44	4.67	7.12	1.618
2002	OCT	01	1.17	18.04	15.46	21.84	9.051
2002	OCT	05	2.33	19.07	8.17	18.80	7.526
2002	OCT	07	1.17	22.59	19.36	38.60	21.536
2002	OCT	10	2.33	25.39	10.88	22.36	12.454
2002	OCT	16	1.00	19.05	19.05	30.98	14.221
2002	OCT	16	3.83	18.01	4.70	11.16	3.803
2002	NOV	02	3.67	15.22	4.15	9.64	2.730
2002	DIC	25	5.67	10.11	1.78	3.06	0.462
2003	MAR	23	3.67	20.56	5.61	15.24	6.430
2003	ABR	09	2.00	13.46	6.73	10.14	2.928
2003	MAY	29	1.33	43.95	32.96	65.54	75.871
2003	MAY	29	0.83	28.44	34.13	46.22	33.890
2003	JUN	06	1.67	25.9	15.54	36.56	22.675
2003	JUN	06	1.50	20.82	13.88	23.88	11.311
2003	JUN	08	2.00	20.29	10.15	24.88	11.851
2003	JUN	16	2.00	13.19	6.60	21.84	6.387
2003	JUN	18	1.00	28.19	28.19	52.84	39.261
2003	JUN	30	4.00	10.64	2.66	5.60	0.989
2003	JUN	30	2.50	21.07	8.43	21.34	10.120
2003	JUL	01	0.83	11.68	14.02	18.28	4.723
2003	JUL	08	4.17	13.7	3.29	8.12	1.991
2003	JUL	11	1.33	10.42	7.82	18.30	4.301
2003	JUL	13	0.83	21.08	25.30	35.06	18.279
2003	JUL	19	2.67	23.11	8.67	22.86	11.665
2003	JUL	26	2.83	29.46	10.40	19.32	12.351
2003	JUL	26	1.33	12.18	9.14	12.70	3.202
2003	JUL	26	5.17	11.37	2.20	8.12	1.569
2003	AGO	13	0.67	20.57	30.86	37.08	19.470

Tabla 4.33. (Continuación) Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2003	AGO	14	1.33	10.92	8.19	11.68	2.647
2003	AGO	15	1.00	25.9	25.90	37.08	23.875
2003	AGO	29	0.67	12.69	19.04	24.88	8.061
2003	AGO	31	3.00	40.36	13.45	42.66	42.077
2003	SEP	01	0.67	10.16	15.24	17.78	4.100
2003	SEP	04	0.83	10.41	12.49	16.26	3.772
2003	SEP	05	5.00	73.86	14.77	79.76	156.354
2003	SEP	15	4.00	12.93	3.23	9.66	2.200
2003	SEP	27	6.50	57.37	8.83	42.16	56.448
2003	SEP	27	4.33	27.37	6.32	43.18	28.539
2003	SEP	28	4.83	17.23	3.56	16.26	5.529
2003	OCT	18	0.50	15.74	31.48	30.98	12.405
2003	OCT	27	2.67	13.95	5.23	12.18	3.283
2003	OCT	27	11.50	14.83	1.29	3.04	0.644
2003	NOV	01	5.00	21.07	4.21	20.84	8.772
2004	MAR	14	2.83	15.5	5.47	9.14	2.867
2004	ABR	06	3.50	35.29	10.08	20.32	16.329
2004	MAY	14	2.83	20.32	7.17	22.36	9.745
2004	JUN	02	2.50	21.83	8.73	20.32	9.861
2004	JUN	04	6.67	28.2	4.23	9.64	4.943
2004	JUN	09	3.67	39.34	10.73	51.82	51.344
2004	JUN	13	1.50	24.13	16.09	32.52	18.388
2004	JUN	18	1.00	11.68	11.68	19.30	5.111
2004	JUL	14	0.83	11.92	14.30	22.34	6.301
2004	JUL	30	0.83	23.62	28.34	42.16	25.809
2004	JUL	30	2.50	15.48	6.19	23.36	8.190
2004	AGO	02	1.67	16.49	9.89	16.24	5.751
2004	AGO	04	3.00	17.78	5.93	12.70	4.640
2004	AGO	12	0.67	16.5	24.75	32.00	13.517
2004	SEP	07	1.00	28.19	28.19	43.18	31.621
2004	SEP	11	2.50	33.25	13.30	48.76	40.659
2004	SEP	23	1.83	11.42	6.23	13.72	3.308
2004	SEP	24	6.50	64.2	9.88	55.36	86.513
2004	SEP	25	2.33	16	6.86	13.72	4.606
2004	SEP	29	5.00	14.97	2.99	7.12	1.805
2004	OCT	08	5.00	34.51	6.90	21.34	15.286
2004	OCT	08	3.00	36.79	12.26	55.36	51.551

Tabla 4.33. (Continuación) Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2004	OCT	09	2.17	12.95	5.98	12.70	3.272
2004	OCT	15	1.33	12.93	9.70	16.24	4.432
2004	OCT	31	5.00	23.34	4.67	9.66	4.340
2005	FEB	05	13.17	12.78	0.97	2.02	0.355
2005	MAR	04	6.67	11.35	1.70	4.06	0.690
2005	MAR	17	1.67	12.19	7.31	13.72	3.528
2005	MAY	05	2.33	13.7	5.87	19.32	5.751
2005	MAY	20	1.67	11.67	7.00	20.32	5.391
2005	MAY	23	1.33	11.17	8.38	15.74	3.653
2005	MAY	27	1.83	17.02	9.28	22.86	8.785
2005	MAY	27	2.83	18.53	6.54	15.24	5.866
2005	JUN	19	0.83	31.25	37.50	56.40	47.288
2005	JUN	22	5.83	10.12	1.73	7.62	1.342
2005	JUN	26	4.00	10.63	2.66	5.08	0.888
2005	JUN	29	1.17	16.52	14.16	19.32	7.195
2005	JUL	04	1.33	16.75	12.56	26.40	10.447
2005	JUL	10	0.83	17.78	21.34	26.42	11.342
2005	JUL	11	0.67	23.36	35.04	44.70	27.071
2005	JUL	13	2.50	18.54	7.42	11.18	4.084
2005	JUL	19	2.50	26.41	10.56	32.52	19.710
2005	JUL	21	3.00	20.55	6.85	24.90	11.819
2005	JUL	25	4.50	46.22	10.27	36.06	36.973
2005	JUL	27	1.17	17.27	14.80	30.48	12.750
2005	AGO	16	3.67	21.59	5.89	9.14	3.734
2005	AGO	20	1.67	17.02	10.21	19.30	7.052
2005	AGO	20	3.67	16.25	4.43	6.60	1.960
2005	AGO	22	14.67	84.83	5.78	16.76	27.949
2005	SEP	03	2.00	17.28	8.64	17.80	6.485
2005	SEP	09	2.17	21.6	9.97	30.50	15.199
2005	OCT	01	2.17	15.74	7.26	15.74	5.594
2005	OCT	01	1.17	23.09	19.79	35.04	19.751
2005	OCT	02	0.50	15.5	31.00	29.98	11.436
2005	OCT	04	3.17	25.37	8.01	25.40	13.835
2005	OCT	04	6.33	25.38	4.01	11.18	5.348
2005	OCT	05	8.83	26.35	2.98	14.72	7.329
2005	OCT	16	1.50	10.39	6.93	17.26	4.035
2005	OCT	24	1.67	15.24	9.14	14.74	4.931

Tabla 4.33. (Continuación) Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2005	NOV	08	4.83	29.19	6.04	15.24	9.080
2005	NOV	11	4.50	12.93	2.87	7.62	1.731
2006	ABR	30	2.17	20.57	9.49	18.30	8.095
2006	MAY	01	5.00	13.44	2.69	9.66	2.413
2006	MAY	02	1.50	26.92	17.95	35.56	23.153
2006	MAY	11	1.50	27.42	18.28	40.64	27.852
2006	MAY	14	1.17	16.26	13.94	21.86	7.995
2006	MAY	19	1.83	16.25	8.86	17.78	6.372
2006	MAY	20	2.17	20.32	9.38	25.40	11.648
2006	MAY	28	3.67	22.84	6.23	21.86	10.672
2006	MAY	29	1.33	20.82	15.62	33.02	16.764
2006	MAY	30	0.50	11.17	22.34	21.32	5.652
2006	MAY	31	1.83	25.9	14.13	27.94	16.866
2006	JUN	03	8.00	44.88	5.61	34.54	32.963
2006	JUN	04	2.33	14.47	6.20	12.70	3.669
2006	JUN	06	2.17	13.69	6.32	14.74	4.098
2006	JUN	11	0.83	15.48	18.58	30.46	12.346
2006	JUN	22	3.17	29.46	9.30	18.80	12.227
2006	JUN	24	1.83	39.63	21.62	59.96	62.386
2006	JUN	29	2.83	25.14	8.87	17.78	9.461
2006	JUN	29	4.50	23.1	5.13	9.66	4.295
2006	JUN	30	1.67	26.16	15.70	45.72	30.546
2006	JUL	10	4.83	15.48	3.20	7.62	2.050
2006	JUL	16	1.17	13.44	11.52	21.32	6.531
2006	JUL	20	10.33	23.78	2.30	7.60	3.092
2006	JUL	21	7.17	30.69	4.28	16.26	9.641
2006	JUL	21	8.17	20.26	2.48	13.20	4.967
2006	JUL	24	3.83	13.71	3.58	6.62	1.575
2006	AGO	03	3.33	29.43	8.83	38.08	26.050
2006	AGO	06	3.00	19.3	6.43	16.76	6.638
2006	AGO	21	1.50	11.93	7.95	13.20	3.378
2006	AGO	24	3.00	10.14	3.38	7.12	1.317
2006	SEP	03	3.17	25.12	7.93	40.64	25.159
2006	SEP	06	3.67	34.77	9.48	36.58	30.158
2006	SEP	14	4.83	18.79	3.89	6.62	2.214
2006	SEP	19	1.00	16.26	16.26	26.42	10.513
2006	SEP	25	4.50	21.06	4.68	17.26	7.065

Tabla 4.33. (Continuación) Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2006	OCT	07	4.00	50.77	12.69	38.10	45.004
2006	OCT	27	0.17	10.16	60.96	20.32	5.231
2006	NOV	11	1.00	16.75	16.75	25.38	9.791
2006	NOV	12	4.50	10.62	2.36	5.60	0.935
2006	DIC	03	3.00	11.18	3.73	6.62	1.304
2007	FEB	04	12.67	30.38	2.40	5.08	2.518
2007	FEB	04	6.00	10.37	1.73	4.08	0.669
2007	FEB	10	2.00	17.75	8.88	25.90	10.519
2007	MAR	13	1.33	15.49	11.62	18.78	6.401
2007	ABR	04	1.00	12.94	12.94	22.34	6.675
2007	MAY	25	1.17	15.99	13.71	25.90	9.670
2007	MAY	30	0.50	10.93	21.86	20.84	5.506
2007	JUN	10	1.50	27.68	18.45	40.64	27.575
2007	JUN	12	2.33	11.92	5.11	11.18	2.770
2007	JUN	13	1.33	26.41	19.81	37.08	23.738
2007	JUN	14	0.83	12.18	14.62	20.32	5.628
2007	JUN	16	1.50	23.88	15.92	39.12	23.290
2007	JUN	29	1.17	19.3	16.54	31.50	15.236
2007	JUN	29	2.00	25.9	12.95	37.08	23.271
2007	JUN	30	0.67	12.69	19.04	24.38	7.694
2007	JUL	01	0.83	10.4	12.48	20.30	5.310
2007	JUL	18	0.50	18.53	37.06	36.56	18.211
2007	JUL	23	1.67	34.28	20.57	54.86	49.306
2007	JUL	24	1.50	17.01	11.34	27.42	11.084
2007	JUL	25	1.33	20.3	15.23	29.96	14.269
2007	AGO	15	2.83	17.76	6.27	25.40	10.341
2007	AGO	16	1.17	24.13	20.68	38.60	23.458
2007	AGO	22	12.33	45.67	3.70	10.14	8.450
2007	AGO	30	7.33	14.91	2.03	5.60	1.320
2007	SEP	01	3.83	10.64	2.78	6.10	1.148
2007	SEP	08	3.00	27.14	9.05	22.34	13.722
2007	SEP	10	1.17	19.05	16.33	28.94	13.401
2007	SEP	20	1.17	27.42	23.50	43.68	30.316
2007	SEP	27	9.33	40.39	4.33	8.64	6.426
2007	SEP	28	5.33	14.17	2.66	6.08	1.410
2007	SEP	29	1.33	10.4	7.80	12.18	2.562
2007	OCT	10	7.33	47.98	6.54	16.26	15.395

Tabla 4.33. (Continuación) Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2007	NOV	15	2.00	12.44	6.22	14.22	3.578
2007	NOV	22	0.33	10.91	32.73	21.82	5.919
2007	NOV	27	4.50	21.56	4.79	8.62	3.497
2007	NOV	28	5.00	13.17	2.63	6.60	1.467
2007	NOV	30	5.00	10.37	2.07	3.56	0.581
2008	ENE	13	0.67	16.26	24.39	29.46	11.845
2008	FEB	10	3.17	11.93	3.77	8.62	1.932
2008	FEB	11	2.00	12.19	6.10	13.72	3.406
2008	ABR	12	1.83	42.41	23.13	48.26	52.124
2008	MAY	16	2.00	21.07	10.54	32.00	16.313
2008	MAY	17	3.00	46.21	15.40	50.80	58.516
2008	MAY	18	2.17	17.77	8.20	16.76	6.273
2008	MAY	25	1.50	11.68	7.79	14.72	3.615
2008	MAY	29	1.00	18.28	18.28	34.04	15.966
2008	JUN	05	6.33	63.72	10.06	50.80	76.299
2008	JUN	07	4.17	17.78	4.27	10.16	3.312
2008	JUN	07	2.83	29.99	10.58	28.46	18.733
2008	JUN	08	3.50	39.35	11.24	25.40	22.151
2008	JUN	08	1.67	14.47	8.68	16.76	5.560
2008	JUN	10	0.50	15.5	31.00	27.44	10.372
2008	JUN	12	2.67	23.37	8.76	16.26	8.028
2008	JUN	20	2.00	19.04	9.52	27.94	12.421
2008	JUN	30	1.50	13.19	8.79	12.18	3.286
2008	JUL	06	8.67	38.07	4.39	12.70	9.264
2008	JUL	08	4.17	17.76	4.26	11.68	4.089
2008	JUL	10	4.50	49.53	11.01	24.90	27.719
2008	JUL	19	1.67	17.76	10.66	16.24	6.420
2008	JUL	20	4.00	17.77	4.44	14.72	5.094
2008	SEP	03	1.00	32.78	32.78	45.74	38.469
2008	SEP	04	0.50	28.19	56.38	55.88	44.206
2008	SEP	07	14.00	35.2	2.51	7.62	4.396
2008	SEP	07	2.33	29.23	12.53	20.34	12.914
2008	SEP	14	5.67	17.23	3.04	13.72	4.508
2008	SEP	25	3.83	11.64	3.04	11.68	2.633
2008	OCT	07	8.33	31.45	3.77	19.80	11.955
2008	OCT	08	1.33	32.26	24.20	44.20	37.335
2008	OCT	17	3.33	14.2	4.26	9.14	2.474

Tabla 4.33. (Continuación) Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2009	ABR	16	1.67	35.55	21.33	47.24	41.735
2009	ABR	19	0.83	37.09	44.51	63.52	64.211
2009	MAY	14	2.50	28.41	11.36	29.96	20.209
2009	MAY	15	1.33	26.67	20.00	33.52	21.626
2009	MAY	28	1.17	43.68	37.44	62.48	72.556
2009	JUN	01	2.33	35.54	15.23	48.76	43.218
2009	JUN	04	2.33	19.29	8.27	21.84	9.722
2009	JUN	05	1.00	14.48	14.48	24.40	8.188
2009	JUN	20	3.17	30.23	9.55	27.44	18.328
2009	JUN	23	1.50	12.18	8.12	16.76	4.454
2009	JUN	25	3.00	73.14	24.38	50.80	93.995
2009	JUN	26	1.67	15.49	9.29	22.36	7.756
2009	JUN	30	4.00	54.35	13.59	41.66	56.969
2009	JUL	04	2.83	12.69	4.48	13.20	3.268
2009	JUL	04	1.83	20.32	11.08	32.52	15.997
2009	JUL	10	2.83	10.39	3.67	6.60	1.235
2009	JUL	10	3.83	10.39	2.71	5.60	1.006
2009	JUL	12	3.33	45.2	13.56	28.94	30.138
2009	JUL	26	1.50	16.25	10.83	15.76	5.644
2009	AGO	05	3.17	25.63	8.09	24.38	13.600
2009	AGO	06	0.67	16.5	24.75	28.94	11.581
2009	AGO	10	2.00	17.26	8.63	21.84	8.120
2009	AGO	28	3.00	26.14	8.71	43.18	28.113
2009	SEP	05	2.83	23.11	8.16	12.70	6.080
2009	SEP	06	2.83	13.46	4.75	13.72	3.595
2009	SEP	09	7.83	63.94	8.16	61.48	92.230
2009	SEP	09	4.67	67.04	14.37	52.32	88.159
2009	SEP	10	0.50	12.19	24.38	23.88	7.005
2009	SEP	10	4.83	61.7	12.77	47.76	71.892
2009	SEP	11	1.33	17.52	13.14	33.54	15.137
2009	SEP	11	5.33	19.78	3.71	8.64	3.068
2009	SEP	12	0.83	14.21	17.05	24.38	8.157
2009	SEP	12	3.00	12.92	4.31	15.74	4.014
2009	SEP	13	1.17	29.96	25.68	46.22	35.439
2009	SEP	14	1.67	21.58	12.95	39.62	22.098
2009	SEP	15	1.50	14.73	9.82	19.80	6.401
2009	SEP	16	1.33	12.7	9.53	12.70	3.337

Tabla 4.33. (Continuación) Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa

AÑO	MES	DÍA	DURACIÓN (hr)	HP (mm)	I (mm/hr)	I_{30} (mm/hr)	R (N/h)
2009	SEP	17	4.67	39.85	8.54	37.58	34.446
2009	SEP	27	0.83	14.22	17.06	23.86	7.947
2009	OCT	17	9.67	33.99	3.52	13.72	8.907
2009	OCT	23	3.50	39.38	11.25	27.94	24.274
2009	OCT	24	1.50	36.06	24.04	35.04	31.348
2009	OCT	24	5.17	34.78	6.73	22.86	17.211
2009	OCT	25	4.50	33.77	7.50	24.90	17.850
2009	OCT	30	0.67	11.94	17.91	22.36	6.322

Tabla 4.33. (Continuación) Valores del potencial erosivo R para las tormentas erosivas de la EMA Jalapa.

Con los datos de la tabla 4.33 se obtuvieron los valores anuales del factor erosivo "R" que se presentan en la tabla 4.34, y asignando un periodo de retorno empírico a estos se obtuvo la tabla 4.35.

AÑO	LLUVIAS EROSIVAS	R ANUAL (N/h)
2000	43	821.7358403
2001	44	691.3097767
2002	32	504.1964421
2003	35	657.9697497
2004	25	430.1888999
2005	36	370.3770796
2006	40	512.0875737
2007	37	412.3320518
2008	32	541.6279794
2009	45	1096.586362

Tabla 4.34 Valores anuales del factor erosivo R para la Estación Meteorológica Automática Jalapa.

T	R (N/h)
2	525.3807563
5	785.8686728
10	1045.051889

Tabla 4.35 Valores del factor erosivo R, asociados a un periodo de retorno para la Estación Meteorológica Automática Jalapa.

4.5.1.2. Obtención del factor erosivo R a través de Información Pluviométrica y curvas i-d-Tr.

Para la obtención del factor erosivo de la lluvia R, se revisará la cantidad y calidad de la información para la EMA en estudio. Para este subcapítulo se ejemplificará el procedimiento para la EMA Jalapa.

Del análisis de la cantidad y calidad de la información se determinó que la serie es estacionaria e independiente.

Aplicando el análisis de frecuencias se determinó que la distribución de mejor ajuste es la Gumbel Doble con un error estándar de ajuste de 6.054 mm, empleando la técnica de estimación de parámetros de Momentos L. Los valores de precipitación para los diferentes periodos de retorno se muestran en la tabla 4.36.

TR (AÑOS)	HP (mm)
2	74.4626
5	110.0713
10	118.1592
20	124.8358
50	133.0337
100	139.0648
500	152.9505
1000	158.9251

Tabla 4.36. Eventos de diseño obtenidos del análisis de frecuencias de eventos máximos para diferentes periodos de retorno en (mm), para la EMA Jalapa.

Para la determinación del valor del factor erosivo de la lluvia R, primero se establecerá cual es la duración característica de la tormenta. De las curvas i-d-Tr se determinará el valor de la intensidad para duraciones de 1 hasta 7 horas, estos valores se introducirán en la ecuación 3.4, para la obtención del factor R.

Los valores de R calculados de las curvas i-d-Tr ($R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$) se comparan con el valor de R obtenido de la EMA (R_{EMA}). Con esta comparación se establecerá cual es la duración característica, para los diferentes periodos de retorno.

La menor diferencia entre R_{EMA} y $R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$, determinara el valor de la duración característica. Estos resultados se muestran en la tabla 4.37.

TR (AÑOS)	R_{EMA} (N/h)	DURACIÓN		
		5 HORAS	6 HORAS	7 HORAS
		R (N/h)	R (N/h)	R (N/h)
2	525.3807563	529.3952	471.331	611.497
5	785.8686728	833.4982	783.680	963.916
10	1045.051889	904.6763	857.635	1.05E+03

Tabla 4.37. Estimación del factor erosivo R con diferentes duraciones a través de las curvas i-d-Tr vs el valor medido en la EMA Jalapa.

Para la región centro la duración característica, fue de cinco horas. Con esta duración se obtendrá el valor de R para las estaciones que se encuentran en esta región. Los resultados se presentan en las tablas 4.38 y 4.39.

TR (AÑOS)	Estación 30021	Estación 30068	Estación 30087	Estación 30140	Estación 30141
	$R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$ (N/h)	$R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$ (N/h)	$R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$ (N/h)	$R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$ (N/h)	$R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$ (N/h)
2	521.309	549.242	516.331	556.905	470.584
5	789.257	798.119	759.716	885.894	716.563
10	981.476	1193.089	995.971	1310.260	952.684

4.38. Valores estimados del Factor R para las estaciones en estudio ubicadas en el centro del estado de Veracruz.

TR (AÑOS)	Estación 30195	Estación 30228	Estación 30266	Estación 30339
	$R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$ (N/h)	$R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$ (N/h)	$R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$ (N/h)	$R_{i\text{-}d\text{-}Tr}$ (N/h)
2	542.845	506.231	460.365	476.1707
5	822.078	746.740	714.443	772.725
10	1014.986	911.072	1045.726	1076.343

4.39. Valores estimados del Factor R para las estaciones en estudio ubicadas en el centro del estado de Veracruz.

4.5.1.3. Obtención del factor erosivo R a través de Información Pluviométrica con relaciones funcionales (Escalante, 2005).

Al analizar los registros de precipitación diaria se encontraron 369 eventos de tormentas erosivas; para cada hp se obtuvo el potencial erosivo R con la ecuación (3.1) (Tabla 4.33), con estos valores se encontró la relación funcional entre el factor R y la lluvia acumulada de 24 horas ajustándolos a una relación potencial considerando dos casos:

a) Trabajando con la media de los valores
b) Considerando la mediana

Ambos casos se muestran en las Figuras 4.31 y 4.32.

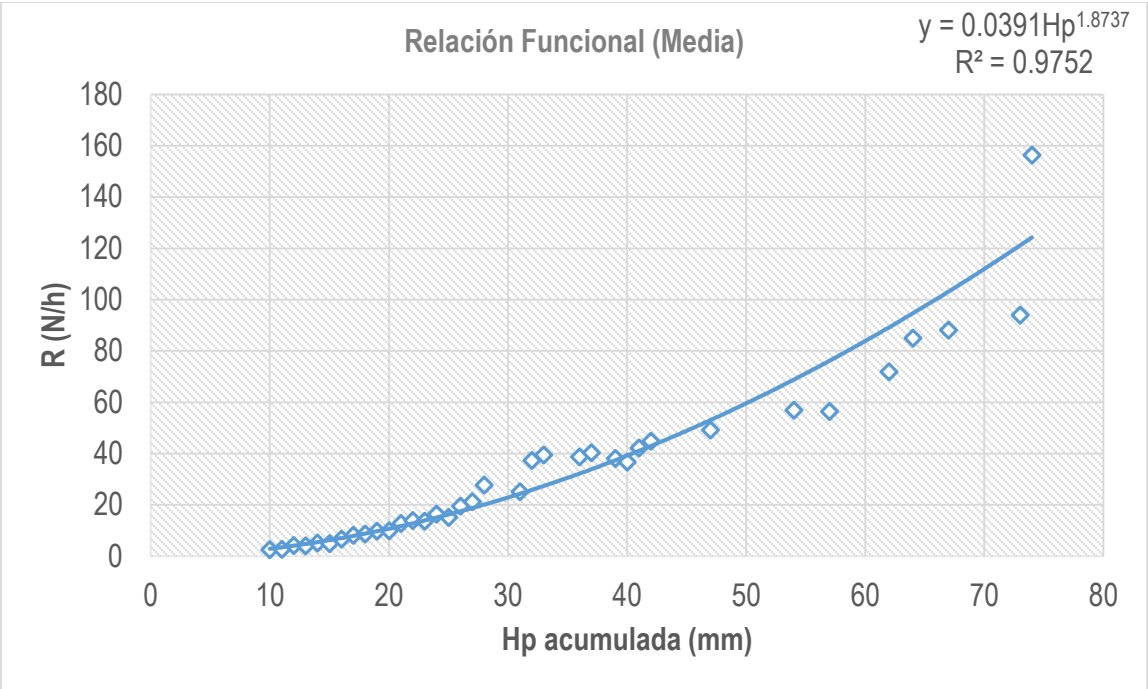


Figura 4.31 Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas utilizando la media de los valores de Hp acumulada.

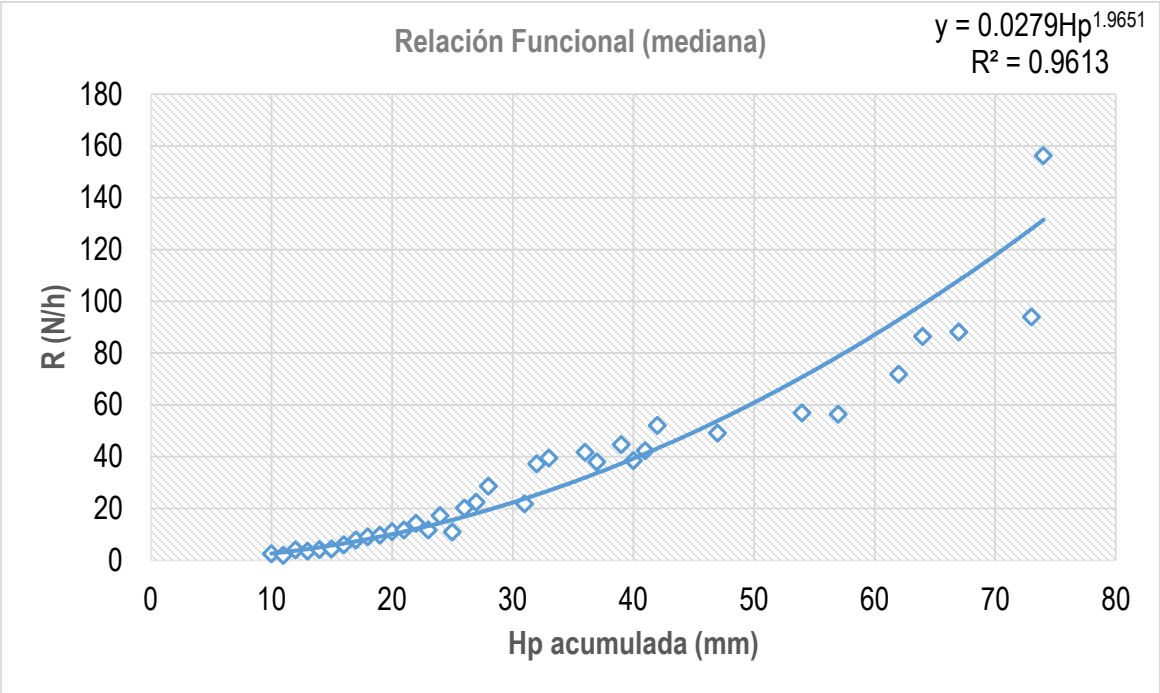


Figura 4.32. Relación funcional entre el potencial erosivo de la lluvia R y la lluvia acumulada en 24 horas utilizando la mediana de los valores de Hp acumulada.

Con las relaciones funcionales obtenidas anteriormente, se obtuvo el factor erosivo de la lluvia para cada año registrado de cada una de las estaciones climatológicas considerando solamente las precipitaciones erosivas. Los resultados se muestran en las tablas 4.40 y 4.41.

AÑO	ESTACIÓN								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
1964	698.860	634.555	631.915	140.137	452.794	156.797	536.940	272.541	727.654
1965	1506.545	748.900	739.488	1055.026	883.372	836.076	765.979	714.645	893.951
1966	789.790	875.383	978.603	680.621	619.870	568.967	771.511	524.999	766.092
1967	1086.021	669.517	758.706	554.450	777.133	512.090	689.987	581.629	854.397
1968	509.946	673.525	502.045	427.286	497.367	344.387	421.651	312.780	635.459
1969	1059.519	939.706	1154.523	599.238	855.435	1130.634	1024.795	755.408	978.944
1970	956.720	645.168	748.756	681.058	745.452	557.890	634.520	475.857	741.501
1971	504.283	1102.181	923.039	296.424	352.097	527.481	652.727	309.483	1151.561
1972	1335.269	975.357	1532.043	768.280	1004.329	1037.913	1272.241	828.278	1070.917
1973	648.947	888.423	1902.248	694.468	610.638	1044.161	1261.431	675.728	997.290
1974	2397.380	2065.936	2134.786	1508.884	1940.794	2619.417	2020.925	1827.780	1906.688
1975	805.631	915.954	570.742	683.633	997.115	699.401	615.923	601.565	1261.567
1976	1304.324	910.355	1012.153	1106.399	845.014	816.180	722.966	704.572	722.427
1977	466.654	799.150	444.462	279.822	304.791	534.513	559.918	245.021	634.155
1978	777.467	950.152	968.134	424.202	492.454	704.400	515.704	442.812	858.588
1979	612.149	1123.296	1204.065	711.058	842.487	1536.157	1106.734	951.483	1699.894
1980	687.632	942.512	747.416	846.211	823.925	1114.497	278.858	857.532	962.169
1981	970.264	1333.748	1325.931	1452.255	1356.395	1820.966	631.733	1254.784	1507.981
1982	326.085	806.204	475.026	189.636	259.112	898.949	417.697	334.616	719.809
1983	1023.654	1066.739	768.614	819.806	766.190	914.748	722.559	718.040	971.732
1984	1398.842	1176.694	1126.040	1141.004	862.128	1646.730	1074.722	1102.291	1140.928
1985	582.809	1088.128	703.395	417.658	434.983	594.978	516.758	522.103	995.907
1986	1101.958	904.508	1177.165	774.993	802.489	1248.283	1282.718	989.405	864.898
1987	430.684	411.141	493.476	334.180	368.190	379.615	351.408	198.874	351.437
1988	547.416	505.497	812.769	510.239	766.507	736.818	1279.250	364.616	457.102
1989	258.971	795.747	726.594	637.492	581.042	625.969	519.691	493.404	729.591
1990	271.463	811.119	838.104	856.325	640.686	1476.794	628.795	471.021	748.035
1991	631.688	1125.897	615.846	913.568	702.109	1082.864	819.031	855.582	1038.954
1992	1448.364	870.477	1173.352	1013.091	866.324	684.394	1309.970	817.642	830.303
1993	945.912	1396.954	926.438	1283.753	1225.783	1295.931	1132.555	634.026	1315.438
1994	438.814	708.210	329.535	600.656	754.189	439.548	425.015	701.022	637.788
1995	514.680	1317.783	620.144	722.651	728.695	1243.768	661.750	801.555	1228.664
1996	570.403	458.449	653.730	640.493	588.450	518.380	870.570	439.120	458.682
1997	286.378	371.358	470.786	537.568	404.286	553.189	558.595	344.677	370.652
1998	524.570	945.665	528.491	1263.134	977.165	1148.275	586.757	1238.960	943.808

Tabla 4.40. Valor del potencial erosivo de la lluvia R (N/h) para las estaciones con el ajuste de la media.

Año	Estación								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
1999	603.521	961.894	1388.649	947.202	1402.547	1324.897	736.205	1508.022	961.185
2000	997.945	729.639	607.893	924.302	971.758	898.062	735.190	1032.943	729.099
2001	244.270	547.687	640.299	544.230	966.346	861.377	597.599	977.093	547.034
2002	494.989	333.631	623.314	288.199	307.706	738.501	516.674	331.846	333.237
2003	730.796	598.563	797.486	705.337	776.487	820.232	465.461	778.321	600.395
2004	465.879	339.280	414.020	411.878	351.601	573.397	463.217	292.826	337.861
2005	1051.154	732.373	1025.369	907.289	901.050	798.588	1044.230	1046.947	732.664
2006	849.383	637.524	870.014	738.707	721.433	785.839	758.656	1019.951	637.246
2007	650.253	510.619	613.259	727.545	480.757	498.411	909.049	643.113	510.372
2008	1538.509	795.220	965.766	996.849	1157.014	1008.869	706.750	807.154	794.983
2009	702.729	779.025	794.139	874.920	518.061	956.437	654.371	854.421	730.050
2010	1099.833	275.053	1404.676	1058.794	1513.866	1362.177	1373.405	1983.621	279.981
2011	1024.390	402.604	839.673	550.421	609.847	713.121	542.123	543.163	397.729
2012	650.253	598.563	414.020		492.454	563.397	652.847		
2013	1051.154	1409.336	607.893		901.050	820.232	1172.261		

Tabla 4.40. (Continuación) Valor del potencial erosivo de la lluvia R (N/h) para las estaciones con el ajuste de la media.

Año	Estación								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
1964	702.990	643.712	633.597	130.569	444.962	145.957	532.537	260.815	750.933
1965	1595.402	743.164	742.126	1069.198	896.170	835.391	771.487	702.360	907.387
1966	814.554	881.767	1017.626	694.084	623.898	574.644	792.202	522.314	765.643
1967	1126.240	659.407	760.457	553.332	792.882	508.913	686.544	579.419	859.619
1968	494.224	672.098	489.651	409.583	482.287	326.630	405.325	292.324	629.886
1969	1095.365	931.023	1193.672	614.328	888.500	1152.582	1056.731	770.643	976.226
1970	1000.212	640.588	757.359	702.211	760.808	547.239	635.788	470.793	740.306
1971	496.532	1103.526	947.176	286.957	338.372	525.917	653.598	298.426	1152.606
1972	1423.959	968.337	1629.562	779.056	1052.167	1056.282	1344.764	850.377	1079.829
1973	654.078	888.870	2085.721	708.156	611.300	1059.603	1339.432	678.942	988.659
1974	2603.049	2248.615	2312.140	1633.457	2132.724	2881.869	2182.683	1980.557	2071.638
1975	824.448	927.845	576.293	690.165	1009.593	707.735	628.101	601.782	1307.372
1976	1369.403	914.188	1047.619	1174.311	872.901	829.927	744.369	718.068	714.381
1977	472.040	800.733	449.920	271.776	294.924	527.492	592.423	233.307	621.743
1978	778.348	971.781	995.231	412.525	479.781	705.569	517.832	433.881	871.052
1979	627.314	1170.910	1291.151	723.225	874.601	1644.148	1210.551	997.325	1770.185

Tabla 4.41. Valor del potencial erosivo de la lluvia R (N/h) para las estaciones con el ajuste de la mediana.

Año	ESTACIÓN								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
1980	686.086	949.372	743.160	876.704	840.747	1152.523	261.290	868.579	975.289
1981	1033.479	1345.477	1392.606	1525.431	1423.069	1903.788	637.797	1304.160	1546.763
1982	323.074	807.908	488.205	187.063	254.889	932.154	428.516	332.838	717.814
1983	1039.866	1075.635	770.090	814.818	772.956	914.672	721.513	711.994	972.939
1984	1480.245	1189.338	1146.796	1179.089	886.811	1735.411	1086.750	1129.339	1152.341
1985	587.933	1108.420	723.631	409.150	434.011	592.530	525.240	522.849	1010.886
1986	1132.996	888.944	1232.238	772.211	810.730	1270.358	1326.087	1000.378	848.623
1987	428.169	397.092	490.801	329.221	366.115	369.675	347.636	188.189	338.269
1988	550.160	490.196	830.078	502.438	775.943	758.520	1369.221	353.235	441.041
1989	260.456	788.118	761.127	642.290	599.979	623.059	535.837	487.763	721.019
1990	267.274	829.330	849.735	890.415	649.307	1572.172	622.456	468.166	758.796
1991	629.322	1127.846	611.181	939.685	710.780	1110.490	832.227	883.537	1034.617
1992	1522.404	867.687	1216.981	1066.676	896.680	672.208	1361.770	839.707	827.062
1993	966.118	1477.421	938.780	1391.899	1306.742	1346.647	1158.335	633.557	1386.618
1994	446.884	701.526	320.948	610.356	780.259	443.450	418.983	737.477	631.039
1995	520.398	1334.344	627.117	742.139	752.716	1291.202	670.522	821.788	1241.219
1996	578.566	449.558	660.333	642.017	591.255	508.001	909.014	431.740	449.823
1997	277.109	361.806	469.256	541.531	396.714	540.637	568.772	335.198	361.105
1998	524.095	953.863	529.525	1299.988	993.709	1175.314	586.984	1295.934	951.899
1999	616.349	1012.675	1483.701	980.046	1516.832	1436.581	754.933	1652.755	1011.900
2000	1023.681	735.026	605.232	958.684	999.094	904.046	745.858	1071.326	734.467
2001	241.021	537.312	640.626	540.169	1024.187	864.800	588.868	1006.293	536.627
2002	492.783	325.130	629.078	278.799	298.997	756.291	511.654	324.344	324.715
2003	741.775	594.113	810.051	704.050	790.255	825.790	455.801	788.155	596.001
2004	462.310	329.884	412.784	410.910	350.076	564.846	464.184	281.219	328.429
2005	1098.882	743.421	1057.836	921.742	922.829	810.491	1080.034	1108.613	743.734
2006	866.586	642.994	892.990	754.247	725.588	795.842	772.207	1069.502	642.678
2007	669.743	518.122	622.362	764.737	489.517	492.672	936.137	657.036	517.858
2008	1621.334	804.681	991.869	1022.334	1218.220	1039.439	708.842	825.121	804.420
2009	715.030	774.532	819.941	908.324	521.991	983.704	668.414	891.572	721.543
2010	1157.629	255.665	1503.730	1116.722	1653.804	1450.396	1457.984	2208.094	260.239
2011	1063.094	386.057	854.436	549.678	618.846	724.113	544.481	547.110	381.295
2012	485.879	829.687	1127.726		740.280	568.050	605.355		
2013	1290.154	1075.675	760.407		996.860	1382.112	1037.767		

Tabla 4.41. (Continuación) Valor del potencial erosivo de la lluvia R (N/h) para las estaciones con el ajuste de la mediana.

Asignando un periodo de retorno a los datos de las tablas 4.37 y 4.38 se obtuvieron los valores del factor erosivo "R" que se presentan en las tablas 4.42 y 4.43 para periodos de retorno de 2, 5 y 10 años para cada estación en estudio.

TR (AÑOS)	ESTACIÓN / R (N/h)								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
2	700.56	802.68	781.38	708.20	760.19	818.21	675.87	702.80	757.06
5	1088.44	1070.48	1157.82	999.69	972.70	1244.56	1080.32	994.75	1044.55
10	1402.80	1187.98	1389.93	1150.77	1236.23	1481.54	1279.53	1240.23	1265.88

Tabla 4.42. Valores del factor erosivo R para las estaciones y diferentes periodos de retorno considerando la media en las relaciones funcionales.

TR (AÑOS)	ESTACIÓN / R (N/h)								
	30141	30087	30068	30195	30021	30140	30266	30339	30228
2	709.010	806.295	790.070	715.690	774.449	827.859	678.533	707.177	762.219
5	1127.591	1081.213	1198.334	1031.203	1001.194	1274.527	1101.067	1018.934	1043.659
10	1483.759	1201.422	1485.370	1189.164	1316.436	1578.170	1346.181	1296.619	1313.976

Tabla 4.43. Valores del factor erosivo R para las estaciones y diferentes periodos de retorno considerando la mediana de los valores en las relaciones funcionales.

4.5.2. Estimación del aporte de sedimentos.

Para la estimación del aporte de sedimentos se utilizó la ecuación (3.2).

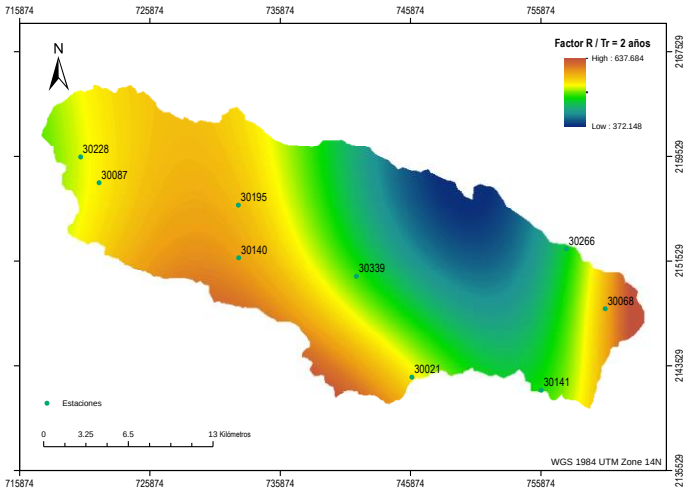


Figura 4.33. Distribución del factor erosivo R obtenido a través de las curvas i-d-Tr para un periodo de retorno de 2 años dentro de la cuenca del río Ídolos

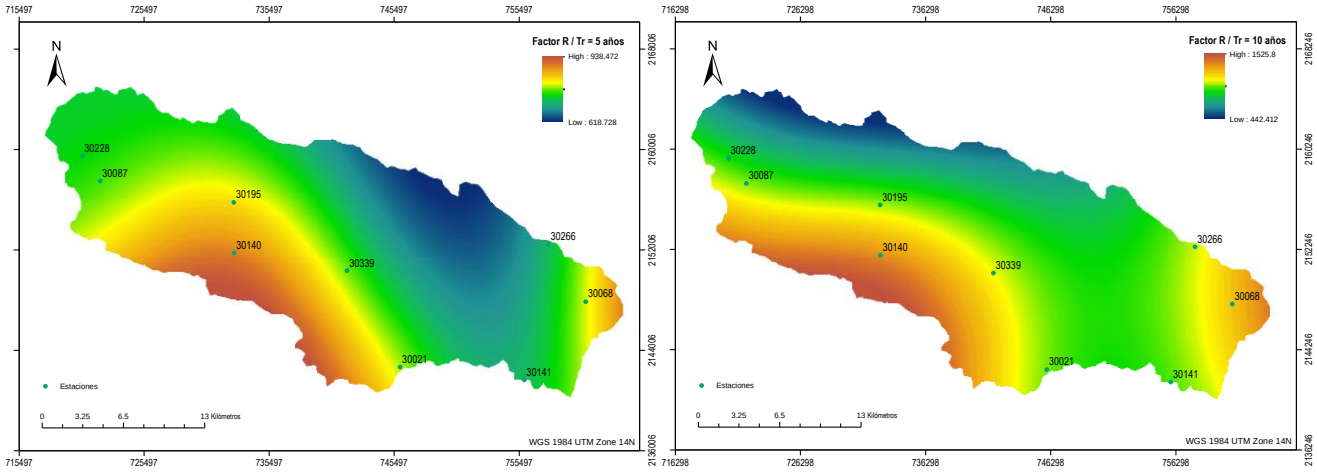


Figura 4.35 y 4.36. Distribución del factor erosivo R obtenido a través de las curvas i-d-Tr para un periodo de retorno de 2 y 5 años dentro de la cuenca del río Ídolos.

El factor de erodabilidad del suelo K se obtuvo de las ecuaciones 3.5 a la 3.9. Para la determinación de este factor fue empleada la información edafológica más reciente del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI): Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250,000, Serie II (INEGI, 2013b), también se emplea la clasificación de suelos del WRB (World Reference Base for Soil Resources), publicado por la Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (SICS) y de la FAO, adaptado por el INEGI, para las condiciones ambientales de México.

La información obtenida se muestra en la tabla 4.44; en la figura 4.37 se muestra los grupos de suelo de referencia dentro de la subcuenca en estudio.

EDAFOLOGÍA SII	TEXTURA	ARENA % (m_s)	LIMOS % (m_{silt})	ARCILLA % (m_c)	CARBONO ORGANICO % (orgC)
AN (Andosol)	2	42.1	38.1	19.8	5.23
LP (Leptosol)	2	65	15	20	1
LP (Leptosol)	3	55	15	30	2.3
LV (Luvisol)	3	23.8	28	48.4	2.55
PH (Phaeozem)	2	37.3	25.7	37	1.57
PH (Phaeozem)	2	43.5	31.2	25.5	1.23
RG (Regosol)	2	38.7	36.9	24.6	0.82
VR (Vertisol)	3	24.4	11.5	64.2	0.67
VR (Vertisol)	2	53.2	15.9	31.1	0.76

Tabla 4.44. Características de la edafología en la cuenca del río Ídolos, valores para la unidad de suelo dominante.

Los valores del factor K se muestran en la tabla 4.45, y su distribución espacial dentro de la subcuenca en la figura 4.38.

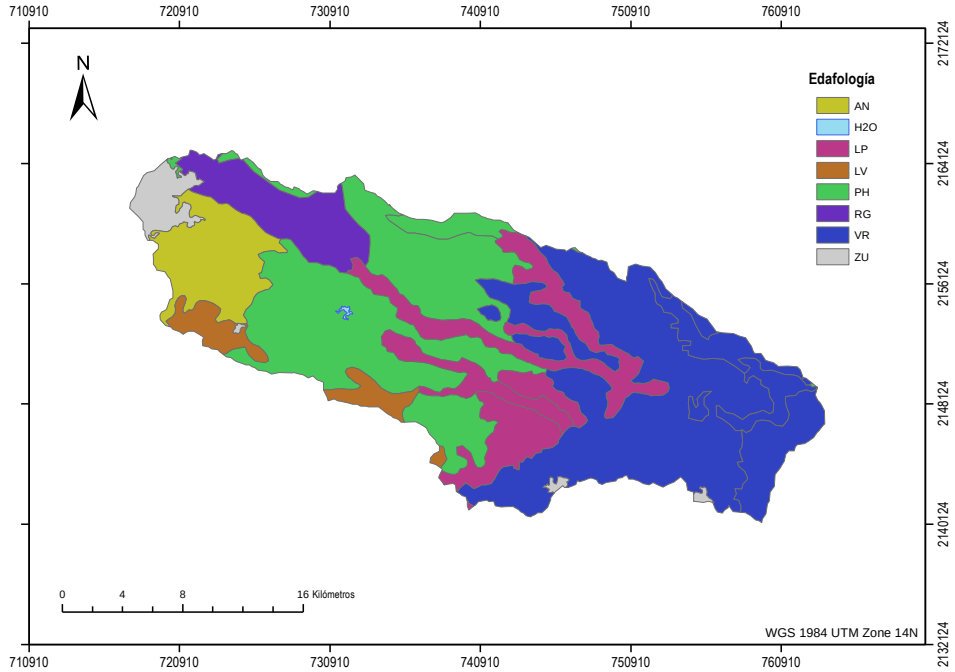


Figura 4.37. Grupos de suelo de referencia dentro de la subcuenca del río Ídolos de acuerdo con el Conjunto de Datos Vectorial Edafológico escala 1:250 000 Serie II elaborado por el INEGI. (INEGI, 2013b).

Edafología SII	TEXTURA	f_{csand}	$f_{cl\text{-}si}$	f_{orgC}	f_{hisand}	K (ton-h/N-ha)
AN (Andosol)	2	0.20038	0.8820108	0.7500004	0.9998253	0.17454191
LP (Leptosol)	2	0.2000002	0.7755449	0.9208802	0.9805456	0.18445658
LP (Leptosol)	3	0.2000019	0.7192231	0.7549703	0.9974043	0.14265421
LV (Luvisol)	3	0.2037321	0.739979	0.7521688	0.9999965	0.14934077
PH (Phaeozem)	2	0.2002488	0.7652435	0.8009555	0.999937	0.16163539
PH (Phaeozem)	2	0.2001412	0.835933	0.8677884	0.9997651	0.19116372
RG (Regosol)	2	0.2005783	0.8579172	0.9543731	0.9999151	0.21627007
VR (Vertisol)	3	0.2011921	0.568173	0.9737762	0.999996	0.14660025
VR (Vertisol)	2	0.2000032	0.72242	0.963065	0.9982103	0.18293218

Tabla 4.45 Valores del factor K calculados para la subcuenca del río Ídolos por unidad edafológica.

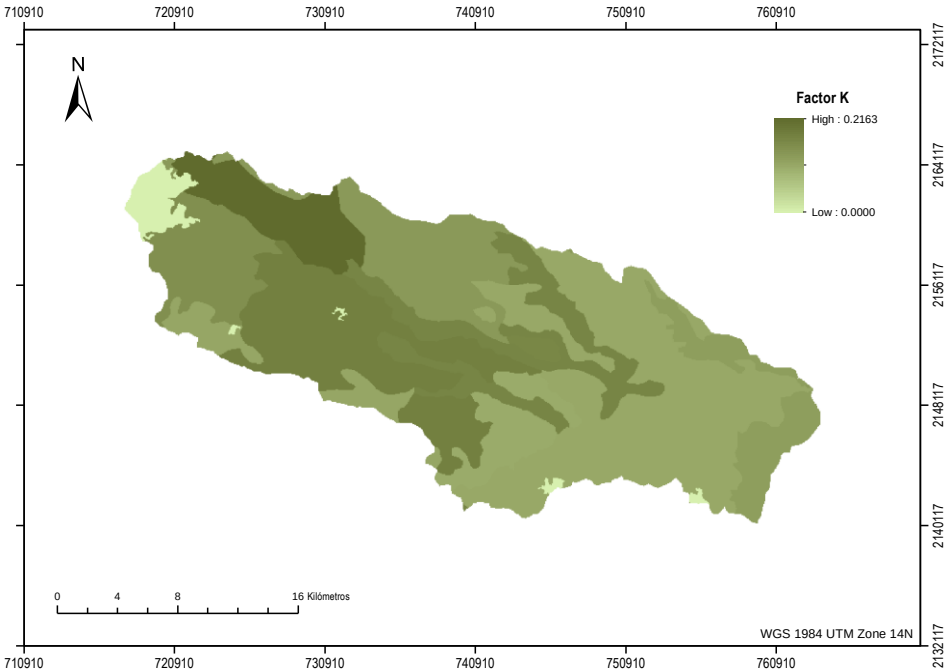


Figura 4.38. Distribución del factor K en la subcuenca del río Ídolos.

El factor de longitud y pendiente SL se obtuvo usando la ecuación 3.10 y la tabla 3.4, a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) con una resolución de celda de 60 m. Los resultados se muestran en la figura 4.39.

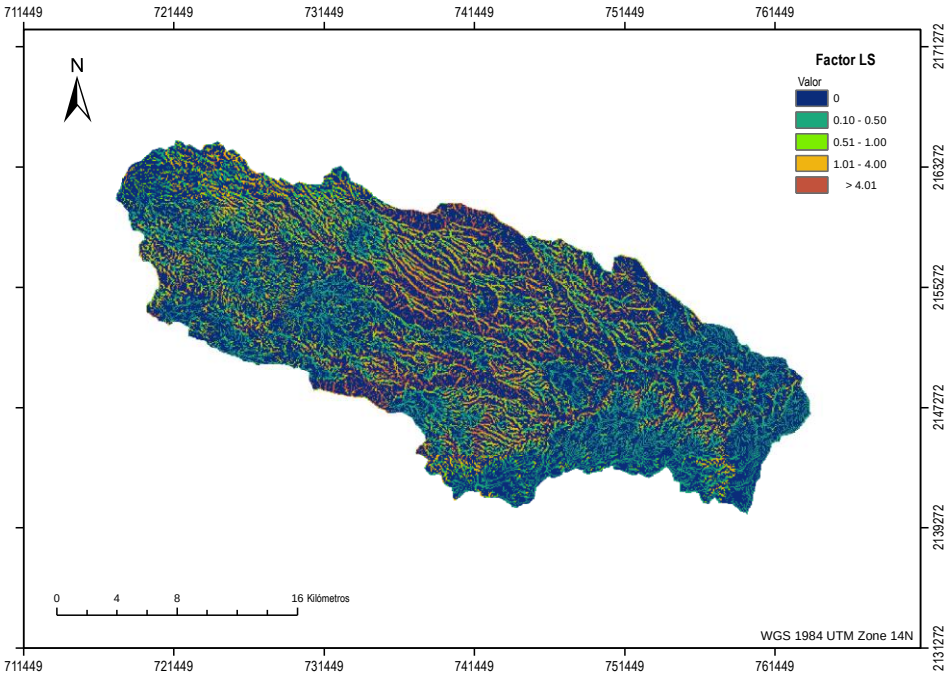


Figura 4.39 Distribución del Factor LS para la subcuenca del río Ídolos.

Para el factor de cobertura vegetal C, los valores se obtuvieron asociando la información más reciente de uso de suelo y vegetación, Serie V del INEGI (Figura 4.40), con los valores de la tabla 3.5, la figura 4.41 muestra la distribución del factor C en la subcuenca en estudio.

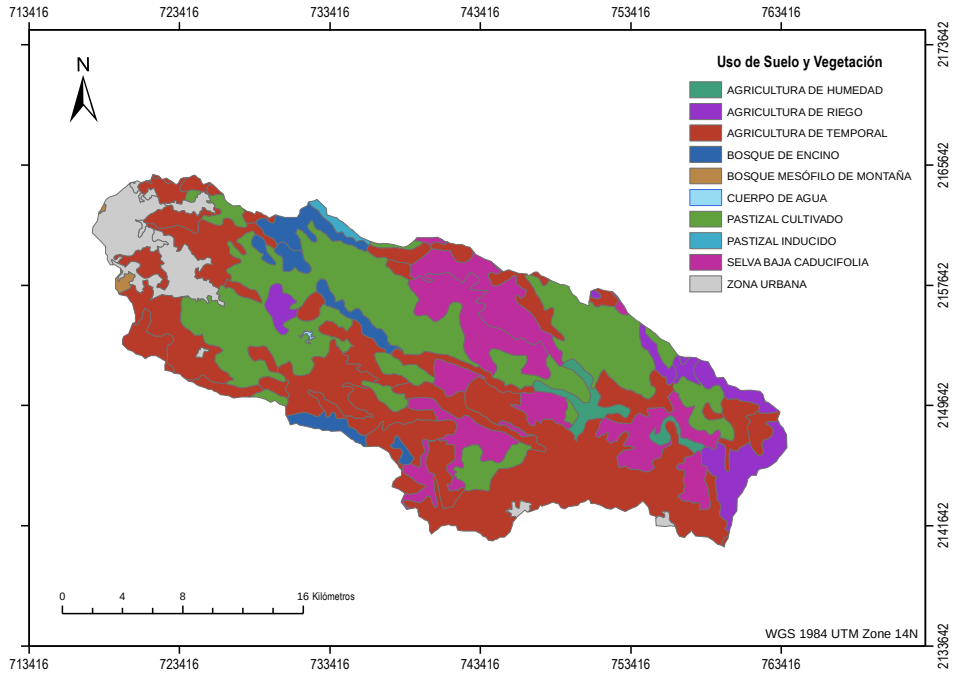


Figura 5.39. Uso de suelo y vegetación dentro de la subcuenca del río Ídolos de acuerdo con el Conjunto de Datos Vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación escala 1:250 000 Serie V. (INEGI, 2013a).

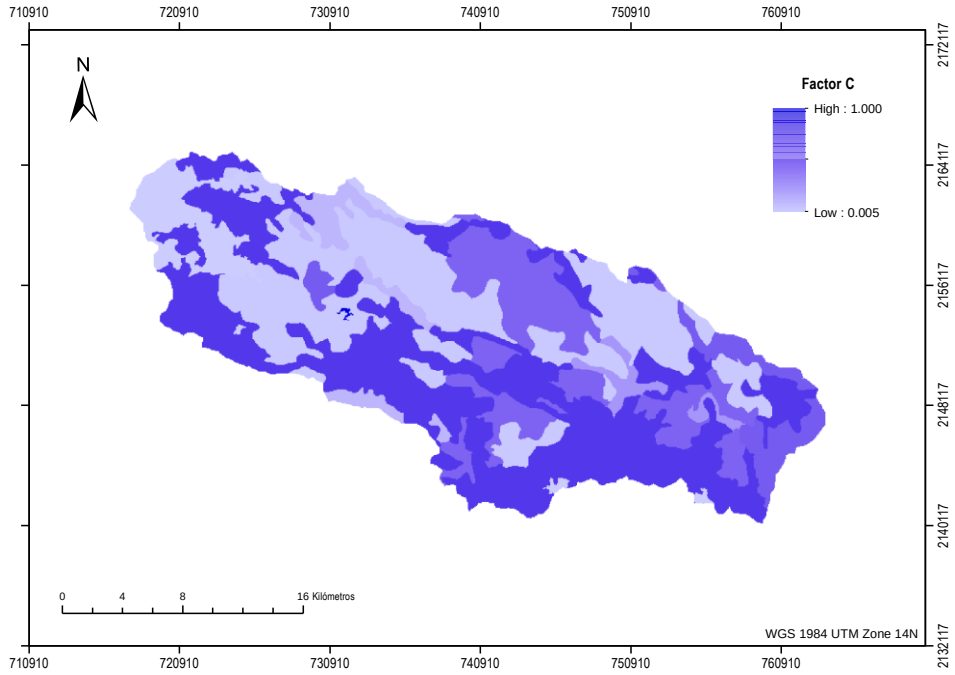


Figura. 5.40. Distribución del factor C en la subcuenca del río Ídolos.

El factor de prácticas de cultivo y conservación de suelo P, se consideró con el escenario más desfavorable, con $P = 1$, valor obtenido de la tabla 3.6.

Para las estaciones en estudio los valores ponderados de los factores K, SL, C y P se muestran en la tabla 4.46. La ubicación de las estaciones se esquematiza en la figura 5.41.

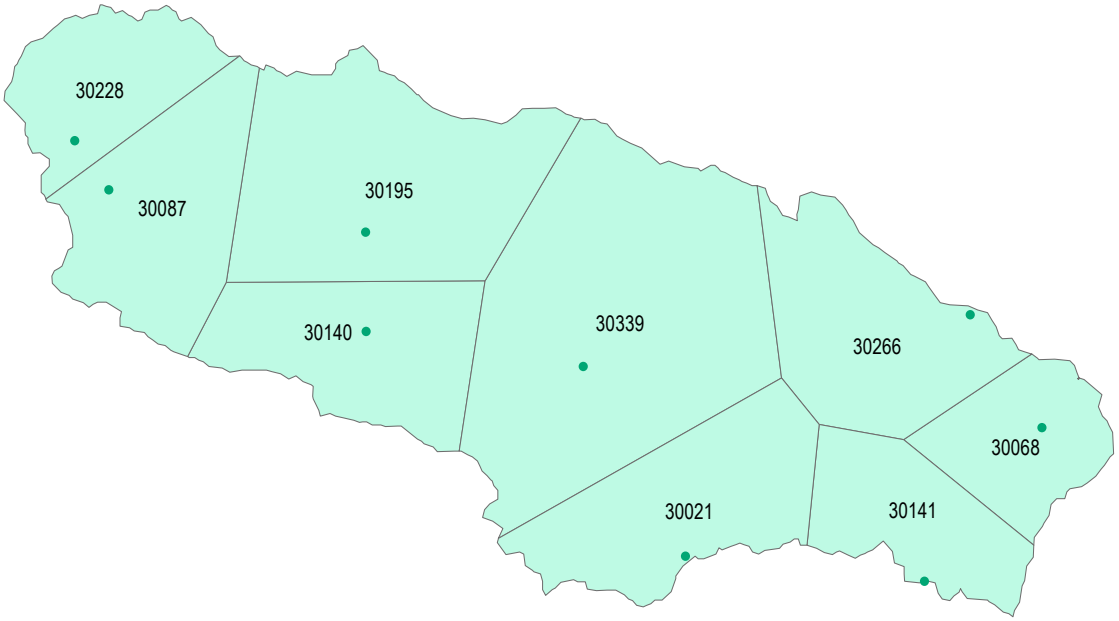


Figura 5.41. Polígonos de Thiessen para cada estación climatológica dentro de la subcuenca del río Ídolos.

Estación	Área de influencia (km^2)	K [ton-h/N-ha]	SL [adimensional]	C [adimensional]	P [adimensional]
30141	40.643	0.146	1.024	0.666	1.0
30087	60.379	0.176	1.112	0.440	1.0
30068	36.539	0.152	1.031	0.543	1.0
30195	95.661	0.183	3.591	0.187	1.0
30021	62.352	0.147	1.441	0.620	1.0
30140	56.513	0.184	3.223	0.478	1.0
30266	63.403	0.152	1.759	0.285	1.0
30339	143.952	0.169	3.704	0.465	1.0
30228	39.957	0.126	0.894	0.294	1.0

Tabla 4.46. Valores de los factores utilizados en la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo para las estaciones climatológicas en estudio.

En las tablas 4.47 a 4.49 se presentan los valores del potencial erosivo de la lluvia R y la pérdida de suelo anual A obtenidos para los diferentes periodos de retorno con las diferentes técnicas de obtención del factor R. No se consideran cambios en los demás factores.

Estación	R (N/h) Tr = 2 años	R (N/h) Tr = 5 años	R (N/h) Tr = 10 años	A (ton/ha/año) Tr = 2 años	A (ton/ha/año) Tr = 5 años	A (ton/ha/año) Tr = 10 años
30141	470.584	716.563	952.684	46.769	71.216	94.683
30087	516.331	759.716	995.971	44.513	65.496	85.863
30068	549.242	798.119	1193.089	46.602	67.719	101.232
30195	542.845	822.078	1014.986	66.602	100.861	124.529
30021	521.309	789.257	981.476	68.375	103.519	128.731
30140	556.905	885.894	1310.260	157.546	250.615	370.666
30266	460.356	714.443	1045.726	34.943	54.229	79.374
30339	476.171	722.725	1076.343	138.884	210.796	313.935
30228	506.231	746.740	911.072	16.763	24.727	30.168

Tabla 4.47. Valores del potencial erosivo de la lluvia R obtenidos a través de las curvas i-d-Tr y la pérdida de suelo anual A para las estaciones climatológicas en estudio para diferentes periodos de retorno.

Estación	R (N/h) Tr = 2 años	R (N/h) Tr = 5 años	R (N/h) Tr = 10 años	A (ton/ha/año) Tr = 2 años	A (ton/ha/año) Tr = 5 años	A (ton/ha/año) Tr = 10 años
30141	700.560	1088.440	1402.800	69.626	108.175	139.418
30087	802.680	1070.480	1187.980	69.200	92.287	102.417
30068	781.380	1157.820	1389.930	66.299	98.239	117.933
30195	708.200	999.690	1150.770	86.889	122.653	141.189
30021	760.190	972.700	1236.230	99.707	127.580	162.145
30140	818.210	1244.560	1481.540	231.468	352.080	419.121
30266	675.870	1080.320	1279.530	51.301	82.000	97.121
30339	702.800	994.750	1240.230	204.984	290.136	361.735
30228	754.060	1044.550	1265.880	24.969	34.588	41.917

Tabla 4.48. Valores del potencial erosivo de la lluvia R obtenidos a través de relaciones funcionales utilizando la media de los valores de la lluvia de 24 h y la pérdida de suelo anual A, para las estaciones climatológicas en estudio para diferentes periodos de retorno.

Estación	R (N/h) Tr = 2 años	R (N/h) Tr = 5 años	R (N/h) Tr = 10 años	A (ton/ha/año) Tr = 2 años	A (ton/ha/año) Tr = 5 años	A (ton/ha/año) Tr = 10 años
30141	709.010	1127.591	1483.759	70.465	112.066	147.464
30087	806.295	1081.213	1201.422	69.511	93.212	103.575
30068	790.070	1198.334	1485.370	67.036	101.677	126.031
30195	715.690	1031.203	1189.164	87.808	126.519	145.899
30021	774.449	1001.194	1316.436	101.577	131.317	172.664
30140	827.859	1274.527	1578.170	234.197	360.558	446.457
30266	678.533	1101.067	1346.181	51.503	83.575	102.180
30339	707.177	1018.934	1296.619	206.261	297.190	378.182
30228	762.219	1043.659	1313.976	25.239	34.559	43.510

Tabla 4.49. Valores del potencial erosivo de la lluvia R obtenidos a través de relaciones funcionales utilizando la mediana de los valores de la lluvia de 24 h y la pérdida de suelo anual A para las estaciones climatológicas en estudio para diferentes periodos de retorno.

Para los valores de R obtenidos a través de las curvas i-d-Tr, se elaboraron las figuras 4.42 a 4.44 con la distribución del valor de la perdida de suelos A (ton/ha/año) con una resolución de 60 m.

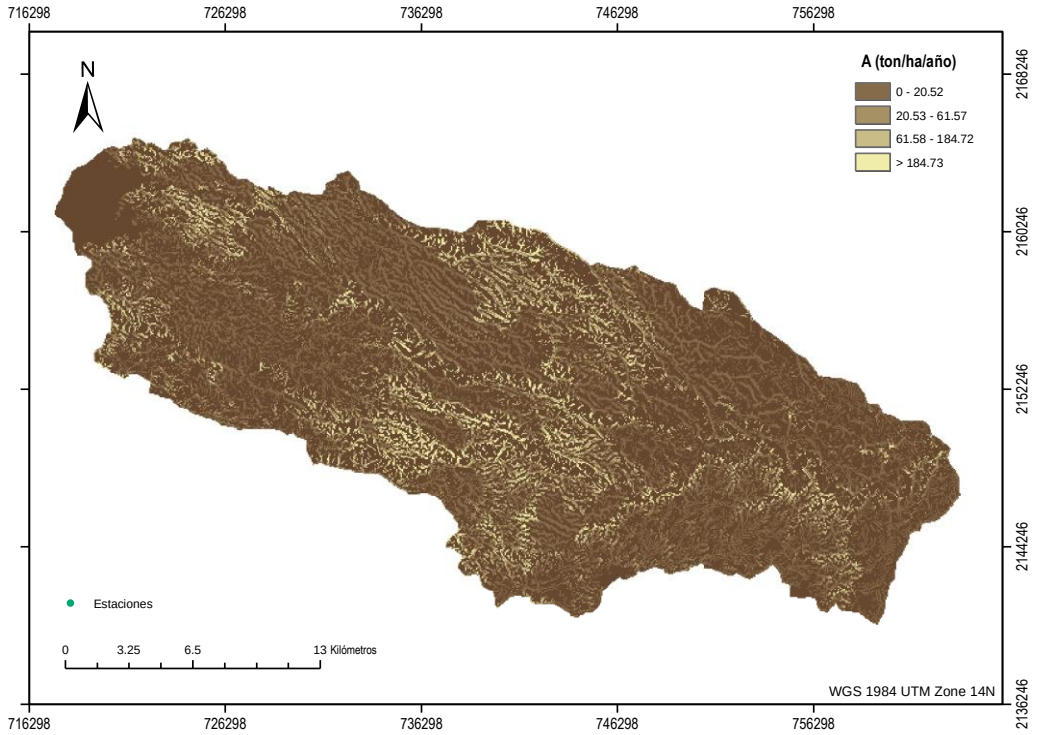


Figura 4.42. Perdida de suelo A para la subcuenca del río Ídolos utilizando los valores del factor R para un periodo de retorno de 2 años.

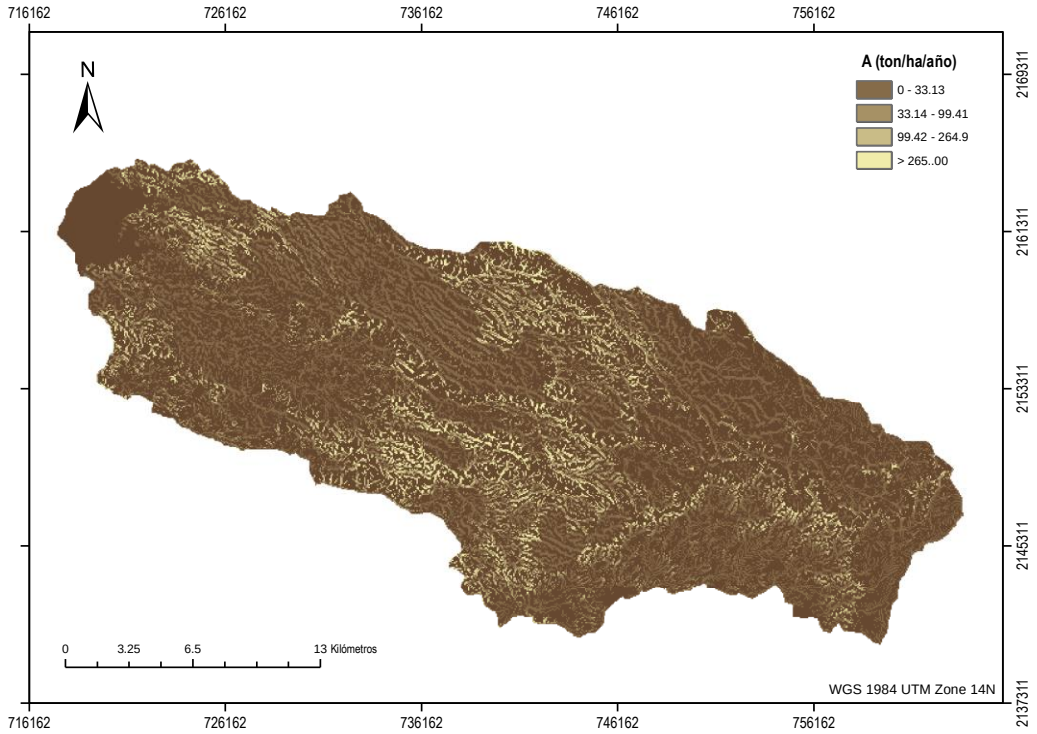


Figura 4.43. Perdida de suelo A para la subcuenca del río Ídolos utilizando los valores del factor R para un periodo de retorno de 5 años.

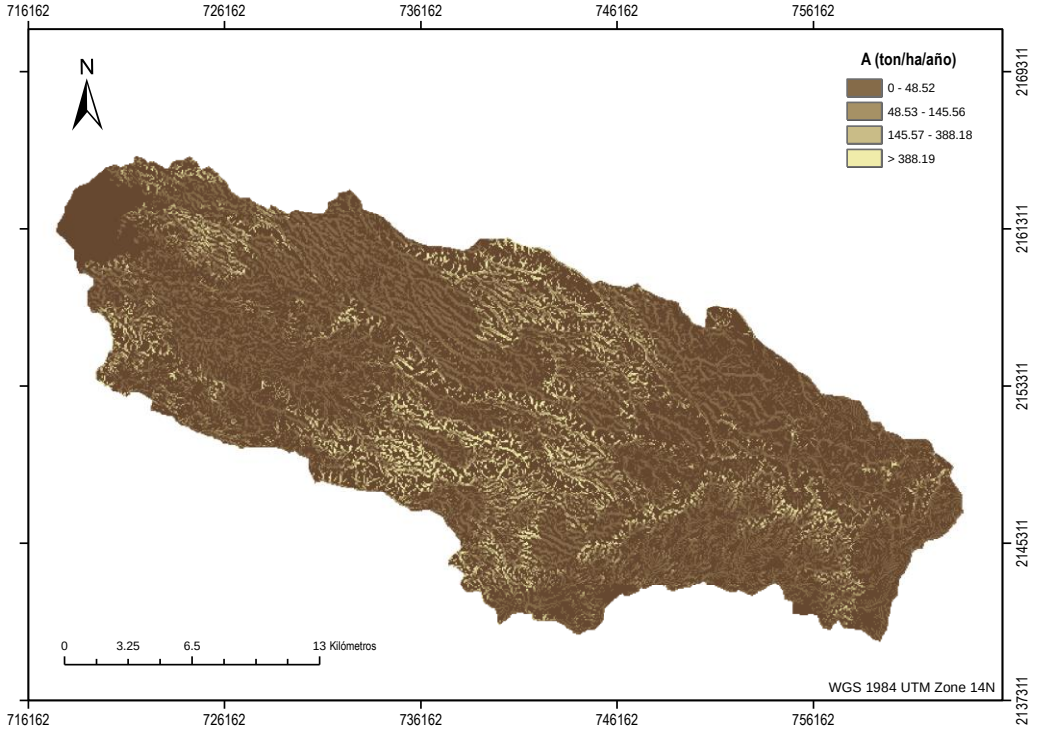


Figura 4.44. Perdida de suelo A para la subcuenca del río Ídolos utilizando los valores del factor R para un periodo de retorno de 10 años.

En las tablas 4.50 a 4.52 se muestran los valores del aporte de sedimentos AS, empleando para la obtención del factor R:

a) las curvas i-d-Tr
b) el ajuste de la media
c) el ajuste de la mediana

Estación	DR	AS (ton/ha/año) Tr = 2 años	AS (ton/ha/año) Tr = 5 años	AS (ton/ha/año) Tr = 10 años
30141	0.161	7.527	11.462	15.239
30087	0.146	6.497	9.560	12.533
30068	0.165	7.695	11.181	16.715
30195	0.130	8.626	13.064	16.129
30021	0.145	9.899	14.988	18.638
30140	0.148	23.382	37.194	55.011
30266	0.144	5.038	7.818	11.443
30339	0.116	16.076	24.400	36.338
30228	0.162	2.709	3.996	4.875

Tabla 4.50. Aporte de sedimentos AS, considerando los valores del factor R para diferentes periodos de retorno, a partir de las curvas i-d-Tr.

Estación	DR	AS (ton/ha/año) Tr = 2 años	AS (ton/ha/año) Tr = 5 años	AS (ton/ha/año) Tr = 10 años
30141	0.161	11.206	17.410	22.439
30087	0.146	10.101	13.470	14.949
30068	0.165	10.947	16.221	19.472
30195	0.130	11.254	15.886	18.287
30021	0.145	14.436	18.471	23.475
30140	0.148	34.353	52.253	62.203
30266	0.144	7.396	11.822	14.002
30339	0.116	23.727	33.583	41.871
30228	0.162	4.035	5.590	6.774

Tabla 4.51. Aporte de sedimentos AS, considerando los valores del factor R para diferentes periodos de retorno, a partir de la relación funcional utilizando la media de los valores de la lluvia de 24 h.

Estación	DR	AS (ton/ha/año) Tr = 2 años	AS (ton/ha/año) Tr = 5 años	AS (ton/ha/año) Tr = 10 años
30141	0.161	11.341	18.037	23.734
30087	0.146	10.146	13.605	15.118
30068	0.165	11.069	16.788	20.809
30195	0.130	11.373	16.387	18.897
30021	0.145	14.706	19.012	24.998
30140	0.148	34.758	53.511	66.260
30266	0.144	7.425	12.049	14.731
30339	0.116	23.875	34.400	43.775
30228	0.162	4.079	5.585	7.031

Tabla 4.52. Aporte de sedimentos AS, considerando los valores del factor R para diferentes periodos de retorno, a partir de la relación funcional utilizando la mediana de los valores de la lluvia de 24 h.

De los resultados anteriores las estaciones 30140, 30339 y 30021 presentan el mayor aporte de sedimentos para los diferentes periodos de retorno, este va de un nivel ligero a moderado; en el caso de estas estaciones la mayoría de su superficie se destina a actividades agropecuarias.

Se observa que las estaciones 30021, 30195, 30068, 30141, 30087 y 30266, su nivel de aporte de sedimentos está en un nivel entre ligero y moderado. Los suelos en el área de influencia de estas estaciones son susceptibles a la erosión, ya que son principalmente Andosoles y Vertisoles.

El valor del aporte de sedimentos para la estación 30228 es menor a las 3 toneladas por hectárea por año equivalente a un nivel nulo, esto se debe en gran parte a que el factor SL es bajo en la zona por una pendiente no pronunciada.

En las figuras 4.42 a 4.44 se observa que la perdida de suelo se incrementa donde el uso, tipo de suelo y la vegetación propician una resistencia baja al impacto de la lluvia, encontrando zonas con niveles de erosión alta y muy alta dentro de la zona de estudio.

La degradación del suelo en varias ocasiones, es la consecuencia directa de la mala gestión de este recurso. La reducción de la vegetación y sus productos tiene un efecto negativo en la productividad del mismo. Es conocido que, la vegetación densa y sana, protege a los suelos de los agentes erosivos y puede mejorar su productividad.

Para generar planes de manejo que involucren medidas preventivas o correctivas sobre la pérdida de suelo resulta importante contar con metodologías que permitan obtener de manera adecuada las variables necesarias para la cuantificación de la erosión hídrica.

El contar con un estudio de erosión hídrica ayudará a identificar las zonas en donde es necesaria y urgente la implementación de un plan de manejo y conservación del recurso.

Para el sitio de estudio y ante el análisis de frecuencias, se determinó que las muestras históricas presentaron un mejor ajuste para distribuciones mezcladas en particular con la función Gumbel doble, esto resulta comprensible ya que el estado de Veracruz se ve afectado frecuentemente por la presencia de eventos meteorológicos ciclónicos.

El rango de valores que se presentó para el Error Estándar de Ajuste en las 41 estaciones en estudio fue de 3.331 mm a 5.76 mm. Siendo el de la Gumbel Doble de 3.33 mm.

Como se observó, en el estado de Veracruz la mayoría de las estaciones Climatológicas cuentan con pluviómetros dificultándose con esto la obtención de la variable intensidad para 30 min, resultado imperativo el manejo de metodologías que involucren la obtención de las curvas intensidad-duración-periodo de retorno a partir de información pluviométrica para que, se pueda calcular el valor del factor erosivo R ($R_{\text{i-d-TR}}$) requerido en la fórmula universal de pérdida de Suelo.

Para validar la metodología empleada, en este trabajo se calculó de manera paralela el factor R para los sitios que contaban con información de EMA´s (R_{EMA}) para la posterior comparación de ambos valores y ver las diferencias existentes

De los estudios anteriores se concluyó que la duración característica para las estaciones en el norte y el centro del estado fue de 5 horas. Este resultado fue comprobado al hacer la comparación de los valores estimados del R_{EMA} y el estimado a través de las curvas i-d-Tr $R_{\text{i-d-Tr}}$, valores mostrados en las tablas 4.37 a 4.46. En estas tablas se observó que los valores calculados del factor erosivo de la lluvia a través de las curvas i-d-Tr para los distintos periodos de retorno fueron, en la mayoría de los casos, muy cercanos a los calculados con la información proporcionada de la EMA, existiendo una diferencia en promedio del 5.79 % para el periodo de retorno de 2 años, de 5.95 % para el periodo de retorno de 5 años y un 8.65 % para el periodo de retorno de 10 años.

Adicionalmente, se exploró la obtención de relaciones funcionales (lineal, potencial, polinomial y exponencial) entre el factor erosivo y la precipitación acumulada en 24 horas con los datos extraídos de la EMA y considerando dos casos:

a) Obtención de la relación potencial considerando la media
b) Obtención del ajuste potencial considerando la mediana

Para el sitio en estudio, el ajuste potencial resultó como el que mejor correlacionaba las variables seleccionadas.

Con las relaciones anteriores se volvieron a calcular los valores de R (Tablas 4.49 y 4.50) mismos que fueron comparados con los valores de R_{EMA}. De esta comparación se estableció que en promedio la Diferencia entre el valor de R obtenido a través de la media comparando con la R calculada de la EMA fue del 33.98% mientras que para el caso de la relación potencial utilizando la mediana fue del 37.562%. En las dos estimaciones y contrario a la comparación del R empleando las curvas i-d-Tr, las mayores diferencias se dieron en los periodos de retorno de 2 y 5 años.

Debido al incremento de la magnitud de la lluvia se recomienda dejar de diseñar con valores medios del factor y utilizar en su lugar los valores del factor R para periodos de retorno de 5 ó 10 años, según las características del suelo.

Si las tendencias del factor R siguen aumentando estos provocarán mayor degradación, teniendo como consecuencia la disminución de la calidad del agua y la capacidad útil de algunos aprovechamientos hidráulicos, la alteración del hábitat de especies silvestres de la flora y fauna, la afectación de los ciclos hidrológicos generando una disminución de la recarga de los mantos acuíferos y deslizamientos de laderas entre otros, por lo anterior es recomendable realizar obras para el control de la erosión hídrica considerando las necesidades de cada zona y así contribuir en la conservación de los suelos en México.

Otro de los factores en el cálculo de la erosión es el factor de erodabilidad del suelo K, que fue determinado con la información más reciente de INEGI. Dicho factor presenta una variación que va desde 0.1466 hasta 0.2162 ton-h/N-ha (figura 4.52). Cabe mencionar que en los cuerpos de agua y zonas urbanas no se consideró valor alguno.

En lo referente al factor topográfico longitud-pendiente SL, un factor alto está asociado con los niveles donde se presentan las pendientes más pronunciadas y un valor bajo en las zonas de planicie. En este caso, el rango de valores obtenidos fue de 0.894 a 3.704 para las partes bajas y altas, respectivamente. En general el aporte de sedimentos se incrementa conforme los valores del factor SL aumentan, verificando que este factor es uno de los de mayor impacto en la ecuación de pérdida de suelos.

El factor de vegetación y cultivo C se obtuvo con la información de INEGI. De acuerdo con la cobertura presentada en la subcuenca en estudio, este factor puede variar desde 0.005 hasta 0.75, considerando un valor de 1.00 para los cuerpos de agua permanentes (Figura 5.40).

En lo que respecta al factor P, de prácticas de conservación, se considera igual a la unidad, interpretándose que no se llevan a cabo prácticas de conservación en las zonas agrícolas.

De acuerdo con la clasificación de SEMARNAT (2013b) las estaciones 30140, 30339 y 30021 se encuentran en un nivel de pérdida de suelo alto a muy alto mientras que el resto de estaciones tienen una aportación ligera a moderada, es importante considerar que existen estaciones que presenten una tendencia creciente en la precipitación la aportación de sedimentos puede llegar a ser muy alta si no se realizan acciones preventivas para reducir los efectos de la erosión.

De estos resultados es interesante ver que la superficie de influencia de las estaciones 30140, 30339 y 30021 generan en promedio el 57.52 % del volumen total de sedimentos y representan el 43.84 % del área total de la cuenca.

Al identificar qué áreas son las de mayor aporte, las medidas de conservación se deben enfocar a estos sitios, tratando de garantizar que la pérdida de suelo sea mínima, es decir, una tasa máxima de erosión que permita la sustentabilidad económica a largo plazo del nivel de productividad del suelo.

Veracruz al ser un estado con un desarrollo agrícola debe fomentar que los métodos de producción sean compatibles con las exigencias de la protección del medio ambiente y la conservación del espacio natural. En particular, es necesario una explotación de las tierras agrícolas que se integre en el desarrollo sostenible y sea compatible con la gestión de los recursos naturales, la protección del paisaje y la conservación de la diversidad.

El establecimiento de vegetación es la forma más efectiva de controlar la erosión y la sedimentación, pues una vez ocurrido esto, las tasas de pérdida de suelo disminuyen significativamente.

Sobre el modelo empleado en el estudio de la erosión se concluye que, a pesar de su relativa robustez predictiva, la USLE es muchas veces mal utilizada, generando predicciones incorrectas. Los principales problemas al utilizar la ecuación son: la aplicación en situaciones donde los factores no pueden ser determinados con precisión, la Incertidumbre en el cálculo del factor R al no existir una cantidad suficiente de datos para su obtención y la aplicación de la ecuación utilizando los promedios de los factores LS, K y C.

Se recomienda continuar con este tipo de estudios para toda la República Mexicana, caracterizando cada región. De esta manera se tendrá un nivel de estimación más confiable, precisa y puntual.

Alonso, J. A., Bermúdez, F. L., y Rafaelli, S. (2008). *La degradación de los suelos por erosión hídrica. métodos de estimación*: Editum. Ediciones de la Universidad de Murcia.

Beasley, D. B., y Huggins, L. F. (1981). ANSWERS, areal nonpoint source watershed environment response simulation: user's manual.

Bridges, E. M. (1971). *World Soils*: Cambridge University Press.

CONAFOR. (2004). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales: manual de obras y prácticas*: Comisión Nacional Forestal Mexico. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

CONAFOR y UACh (2013). Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe Final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo. Jalisco, México. 2013.

Escalante, C. A. S. (2005). Efecto en la Estimación del Factor Erosivo de la Lluvia en el Aporte de Sedimentos. En: Rivera-Trejo F., Gutiérrez-López. A, Val-Segura R., Mejía-Zermeño R., Sánchez-Ruiz P., Aparicio-Mijares F.J., Díaz-Flores L.L. (Editores). <<La Medición de sedimentos en Mexico>> Ediciones IMTA-UJAT, Jiutepec, Morelos/Villahermosa, Tabasco, México., 318.

FAO. (1997). Medición sobre el Terreno de la Erosión del Suelo y de la Escorrentía. (Boletín de Suelos de la FAO - 68), N.W. Hudson.

FAO. (2006). *Guidelines for Soil Description*: FAO.

FAO. (2015a). *IUSS Working Group WRB. Word reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports No. 106. FAO*: Fao Inter-Departmental Working Group.

FAO. (2015b). Soil and biodiversity. Soils Host a Quarter of Our Planet´s Biodiversity. International Year of Soil 2015., 04.

FAO. (2016a). Base Referencial Mundial, Disponible en:. http://www.fao.org/soils-portal/levantamiento-de-suelos/clasificacion-de-suelos/base-referencial-mundial/es/.

FAO. (2016b). Portal de Suelos de la FAO. http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/.

Garcia-Chevesich, P. A. (2009). Erosion Processes and Control: The University of Arizona.

INEGI. (1991). Datos básicos de la geografia de México. 142.

INEGI. (2005). Marco Geoestadístico Nacional.

INEGI. Erosión de suelos en México, escala 1: 250 000. Boletín de prensa Núm. 295/14 2014. Aguascalientes, México. 2014.

INEGI. (2015). Anuario estadístico y geográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave 2015 / Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. 1054.

Knisel, W. G. (1980). CREAMS: a field scale model for Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems [USA]. *United States. Dept. of Agriculture. Conservation research report (USA)*.

Maass Moreno, J. M., y García Oliva, F. (1990). *La investigación sobre la erosión de suelos en México. Un análisis de la literatura existente*: 1990.

Mendoza Pérez, S. H., y Reyes Chávez, L. (2014). *Cálculo del factor erosivo y aporte de sedimentos considerando alturas de precipitación puntuales y trenes de lluvia en la cuenca del Río Apatlaco en el Estado de Morelos*.

Miller, G. T., Rodríguez, I. d. L., Rodríguez, I. d. t. L., Velázquez, V. G., y Bocanegra, F. P. (1994). *Ecología y medio ambiente: introducción a la ciencia ambiental, el desarrollo sustentable y la conciencia de conservación del planeta tierra*: Grupo Editorial Iberoamérica.

Montes-León, M. A. L., Uribe-Alcántara, E. M., y García-Celis, E. (2011). Mapa Nacional de Erosión Potencial. *Tecnología y ciencias del agua, 2*, 05-17.

Morgan, R., Quinton, J., Smith, R., Govers, G., Poesen, J., Auerswald, K., . . . Styczen, M. (1998). The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth surface processes and landforms, 23*(6), 527-544.

Morgan, R. P. C. (2009). *Soil Erosion and Conservation*: Wiley.

Munsell. (1975). *Standard Soil Color Charts*: Munsell Color.

Nearing, M., Foster, G., Lane, L., y Finkner, S. (1989). A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the ASAE, 32*(5), 1587-1593.

Oldeman, L.R. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. Working paper 88/4. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC). Wageningen. 1998.

Renard, K. G. (1997). *Predicting soil erosion by water : a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)*: Washington, D.C. : Department of Agriculture, 1997.

Reyes, C. L., y Escalante, S. C. A. (2014). *Hidrología básica*: México : Instituto Mexicano de Tecnología del Agua ; UNAM, 2014.

Reyes, C. L., Escalante, S. C. A., y Mendoza, P. S. (2014). Determinación del potencial erosivo de la lluvia (R) mediante información pluviométrica. *XXIII Congreso Nacional de Hidráulica 2014. México*.

Rzedowski, J. (2006). Vegetación de México. *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad*, 504.

Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., y Benham, E. C. (2012). *Field book for describing and sampling soils*: U.S. Government Printing Office.

SEMARNAT. (2010). Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales [En línea]. Disponible en:. http://infoteca.semarnat.gob.mx/infotecav0/atlas.html.

SEMARNAT. (2013). Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de Desempeño Ambiental. Edición 2012. [En línea]. http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/00_intros/pdf.html.

SEMARNAT. (2014). El medio ambiente en México 2013 - 2014 [En Linea] Disponible en:. http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/00_mensajes/00_intro.html.

Sepúlveda, T. V., Trejo, J. A. V., y de la Rosa Pérez, D. A. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.

SSSA. (2016). Glossary of Soil Science Terms. https://www.soils.org/.

Tayupanta J, J. R. (1993). *La Erosion Hidrica: Proceso, Factores Y Formas*: INIAP Archivo Historico, Ecuador.

Toy, T. J., Foster, G. R., y Renard, K. G. (2002). *Soil erosion : processes, predicition, measurement, and control*: New York : J. Wiley, c2002.

UNESCO. (2010). Procesos de Erosión - Sedimentación en Cauces y Cuencas. Daniel Brea, Francisco Balocchi. *Documentos Técnicos del PHI-LAC, N° 22, 1*, 144.

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. *Transportation Research Board Special Report*(176).

Williams, J. R. (1990). The Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) Model: A Case History. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 329*(1255), 421-428. doi:10.1098/rstb.1990.0184

Wischmeier, W. H., y Smith, D. D. (1978). Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning. *Predicting rainfall erosion losses-A guide to conservation planning*.

Woolhiser, D. A., Smith, R., y Goodrich, D. C. (1990). *KINEROS: a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual*: US Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

Young, R. A., Onstad, C., Bosch, D., y Anderson, W. (1989). AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. *Journal of soil and water conservation, 44*(2), 168-173.