



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa Hidrológico Internacional



Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile

Autores:

Roberto Pizarro
Carolina Morales
Leonardo Vega
Claudio Olivares
Rodrigo Valdés
Francisco Balocchi

phi-LAC

Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO
Para América Latina y el Caribe

PHI-VII / Documento Técnico N° 18



InnovaChile
CORFO





Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa Hidrológico Internacional

Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile

PHI-VII / Documento Técnico N° 18

Autores:

Roberto Pizarro
Carolina Morales
Leonardo Vega
Claudio Olivares
Rodrigo Valdés
Francisco Balocchi



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE AGRICULTURA



Publicado en el 2009 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) y la Universidad de Talca.

ISBN 978-92-9089-137-6 Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile.

Documento Técnico del PHI-LAC, N° 18

© UNESCO 2009

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figura no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, no en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO.

Se autoriza la reproducción, a condición de que la fuente se mencione en forma apropiada, y se envíe copia a la dirección abajo citada. Este documento debe citarse como:

UNESCO, 2009. Propuesta de un modelo de estimación de erosión hídrica para la región de Coquimbo, Chile. Roberto Pizarro, Carolina Morales, Leonardo Vega, Claudio Olivares, Rodrigo Valdés, Francisco Balocchi Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°18.

Dentro del límite de la disponibilidad, copias gratuitas de esta publicación pueden ser solicitadas a:

Programa Hidrológico Internacional para
América Latina y el Caribe (PHI-LAC)
Oficina Regional de Ciencia para América
Latina y el Caribe
UNESCO
Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: + 598 2 413 2075
Fax: + 598 2 413 2094
E-mail: phi@unesco.org.uy
<http://www.unesco.org/phi>

Facultad de Ciencias Forestales
Universidad de Talca
Avenida Lircay S/N
Talca, Chile
Tel.: 56 71 200 442 / 200 440
Fax: 56 71 200 455 / 428
<http://www.cienciasforestales.cl>

Revisión general del texto:

Cecilia Tapia

Agradecimientos:

NASA y a Cristoph Lehmann por las fotos aportadas.

Dirección de Comunicaciones Universidad de Talca, 2010.

Extracto del poema
Oda a la erosión en la provincia de Malleco
Pablo Neruda 1956 (nuevas Odas elementales)

Volví a mi tierra verde
y ya no estaba,
ya no estaba la tierra,
se había ido.
Con el agua hacia el mar
se había marchado.

Tierra,
qué darás a tus hijos,
madre mía,
mañana,
así destruida,
así arrasada tu naturaleza,
así deshecha tu matriz materna,
qué pan repartirás entre los hombres?

Vamos a contener la muerte!
a renovar la selva prometida,
el pan futuro de la patria angosta!
Ahora a establecer raíces,
a plantar la esperanza,
a sujetar la rama al territorio!

Es ésa tu conducta de soldado,
son éstos tus deberes rumorosos de poeta,
tu plenitud profunda de ingeniero.

ÍNDICE

	Páginas
PRÓLOGO	7
1. INTRODUCCIÓN	9
2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	10
2.1. EROSIÓN DE SUELOS EN CHILE	10
2.2. FENÓMENOS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN	11
2.3. AGENTES, TIPOS DE EROSIÓN Y FACTORES QUE LA AFECTAN	12
2.4. EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL	14
2.4.1. Erosión por salpicadura y erosión laminar	14
2.4.2. Erosión por surcos o en regueros	14
2.4.3. Erosión en barrancos o cárcavas	16
2.4.4. Erosión en bancos aluviales	16
2.5. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL	17
2.5.1. Modelos Cualitativos	18
2.5.2. Modelos Cuantitativos	19
2.5.2.1. Modelos de Evaluación Indirecta	19
i) Modelos con base física	19
ii) Modelos conceptuales	19
iii) Modelos paramétricos	20
2.5.2.2. Modelos de Evaluación Directa	26
i) Parcelas de Escorrentía	26
ii) Parcelas Experimentales de Clavos de Erosión	27
• Erosión media y sedimentación media	28
• Erosión neta	28
• Suelo movilizado	29
3. METODOLOGÍA DE TRABAJO	30
3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	30
3.2. OBTENCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA INFORMACIÓN BASE	32
• Mediciones en clavos de erosión y variables físicas del suelo	32
• Información pluviométrica	33
3.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	34
3.3.1. Traspaso digital de la información	34
3.3.2. Cuantificación de la erosión hídrica, sedimentación, erosión neta y suelo movilizado	35
3.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS	35
3.4.1. Análisis de los valores cuantitativos y estimación de las variables físicas del suelo	35

3.4.2. Análisis y selección de la información pluviométrica y pluviográfica	36
3.5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
3.5.1. Presentación y Análisis de las variables edáficas y pluviométricas	37
3.5.2. Presentación y Análisis de los Modelos Matemáticos para la estimación del proceso erosivo en las provincias de Elqui, Limarí y Choapa	38
4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	38
4.1 VARIABLES FÍSICAS DEL SUELO	38
4.2 RESULTADOS PLUVIOMÉTRICOS	39
4.2.1 Determinación de las áreas de influencia de cada pluviógrafo	39
4.2.2. Resultados pluviométricos para las provincias de Elqui, Limarí y Choapa	41
4.3. RESULTADOS DE LOS PROCESOS EROSIVOS	46
4.4. RELACION ENTRE LAS VARIABLES PLUVIOMÉTRICAS Y LAS VARIABLES DE LOS PROCESOS EROSIVOS	49
4.4.1 Provincia de Elqui	49
4.4.2 Provincia de Limarí	52
4.4.3 Provincia de Choapa	55
4.5. RESULTADOS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL PROCESO EROSIVO EN LAS PROVINCIAS DE ELQUI, LIMARÍ Y CHOAPA	58
4.5.1. Provincia de Elqui	59
4.5.2. Provincia de Limarí	61
4.5.3. Provincia de Choapa	63
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	75

PRÓLOGO

El Programa Hidrológico Internacional de UNESCO, fue establecido para apoyar a la comunidad mundial, en el objetivo de poner de relevancia, sobre una base global, la problemática del agua. Y bajo este programa, se estableció la iniciativa ISI, cuya sigla en inglés responde a la International Sediment Initiative, y cuyo norte es fortalecer la cooperación internacional en la gestión regional acerca de los problemas que generan los sedimentos y en encontrar soluciones locales a esta problemática. Asimismo, sus principales objetivos son fortalecer en un nivel global, la conciencia acerca de la importancia de los procesos de erosión y los sedimentos, y sus impactos sobre el ambiente físico y humano. Un segundo objetivo es promover el intercambio de información acerca de datos relevantes, el monitoreo y los métodos de gestión y aproximación a la problemática real. Finalmente, se plantea establecer cooperaciones en erosión y sedimentación, en el ámbito específico de la investigación y de la educación.

En este marco y cuando se percibe a la erosión como un problema ambiental, en la mayoría de los países se entiende que es éste un fenómeno que corresponde a especialistas ligados a la ingeniería forestal, la agronomía o la ingeniería ambiental o de recursos naturales, y por tanto son ellos, quienes deben producir las soluciones adecuadas y pertinentes desde un punto de vista económico, ambiental, social, político y técnico. Sin embargo, esta visión es reducida, porque no da cuenta de que el fenómeno erosivo lleva aparejado un segundo fenómeno, que es la sedimentación aguas abajo de las partículas de suelo arrancadas, las que son depositadas en zonas de interés económico, turístico, ambiental y productivo. Es decir, no es sólo el fenómeno de la erosión el que está presente con sus implicancias de menor fertilidad de los suelos y de reducción de la capacidad productiva, sino que, se relaciona directamente con otro como la sedimentación, que reduce la capacidad de conducción de agua de los canales de regadío; afecta la calidad de las aguas por la mayor turbidez; involucra un cambio de las características de los ecosistemas acuáticos; modifica el cauce de los ríos generando una menor capacidad de conducción de las crecidas, aumentando con ello la posibilidad de inundaciones con un mayor riesgo de pérdida de vidas humanas; incrementa la posibilidad de descalce de las cepas de puentes y de los cimientos de obras civiles de alto costo; etc. Por tanto, es un problema mayor que desde una perspectiva país y con fines de resolución integral de un problema que pertenece a muchas personas y a muchos sectores productivos.

En el contexto descrito, me es grato prologar este libro, que aborda por primera vez en Chile y a partir de datos extraídos de parcelas experimentales, la posibilidad de contar con modelos predictores de la erosión hídrica, aplicables a la Región de Coquimbo, ubicada en las zonas áridas y semiáridas de Chile central. Asimismo, estos modelos están basados en variables pluviométricas, lo cual les otorga un importante nivel de practicidad, dado que no requieren de variables adicionales, lo cual es altamente relevante, cuando se aprecia un bajísimo nivel del error estándar de la estimación, el cual no excede las 2 toneladas/ha/año en promedio. Asimismo, es particularmente destacable el hecho que sea avalado por la Iniciativa Internacional de Sedimentos, ISI, lo cual significa que este programa de UNESCO está tomando relevancia en la Región de América Latina y el Caribe y, por tanto, abre interesantes posibilidades de sinergias técnicas relativas a la resolución de problemas y a la capacitación de profesionales y técnicos.

Es importante señalar que este libro fue desarrollado en el marco del proyecto, “Restauración hidrológico forestal y Oasificación: Herramientas claves para el aumento de la productividad de suelos degradados de la Región de Coquimbo”, proyecto que fue financiado por la Agencia

Estatal Corfo/Innova de Chile, y el cual ha tomado lugar los años 2007, 2008 y 2009, y ha involucrado la aplicación de la metodología de parcelas con clavos de erosión, para estimar la erosión hídrica superficial en suelos desnudos pertenecientes a las provincias de Elqui, Limarí y Choapa. Una vez capturada esta información se planteó la obtención de modelos matemáticos que fuesen capaces de predecir el volumen a erosionar de un suelo. Este proyecto ha sido desarrollado por el Instituto Forestal de Chile y la Universidad de Talca, a quienes felicito por la iniciativa y los insto a continuar llevando a cabo estos trabajos que son tan importantes para las zonas áridas y semiáridas.

En función de lo anterior, doy la bienvenida a este libro y espero que el mismo sea el augurio de una gran producción de investigación científica y de trabajos de campo, que ayuden a mitigar la problemática de la erosión hídrica en América Latina y el Caribe.

Guido Soto Álvarez
Director Ejecutivo
Centro de Agua para
Zonas Áridas y Semiáridas de
América Latina y
el Caribe

1. Introducción

El suelo se encuentra sometido a una creciente presión medioambiental en todo el planeta Tierra, provocada principalmente por la actividad humana ligada a usos agrícolas, forestales o mineros, los que no siempre aplican las adecuadas medidas de conservación. Asimismo, las actividades industriales, relacionadas con el movimiento de suelos o la ocupación de espacios naturales con un impacto importante de contaminantes, representan otra dimensión negativa del problema, a lo cual se suma el turismo, que define impactos ambientales por una mayor producción de residuos, entre otros aspectos. De igual forma, la urbanización creciente involucra cambios notables de uso del suelo y, en general, todas estas actividades están dañando la capacidad del suelo para continuar prestando plenamente la amplia gama de funciones vitales que realiza.

Por otra parte, la erosión es un fenómeno natural o antrópico de permanente transformación de la superficie del suelo, principalmente ligado a la interacción entre dicho elemento, con el agua o el viento, como principales factores degradantes. Este fenómeno involucra daños de alta relevancia a los recursos edáficos de un país y de un territorio en general, por lo cual debe ser abordado con las herramientas de conocimiento apropiadas, a fin de evitar la ejecución inadecuada de medidas, que no logran controlar el proceso erosivo, y por el contrario, acentúan aún más el problema y las consecuencias que de él se derivan, las cuales están relacionadas principalmente con la economía, la sociedad y el medio ambiente del territorio nacional.



Figura 1: Paisaje erosivo de la Región del Maule, Chile. Fotografía tomada por Roberto Pizarro.

En el contexto descrito, es importante mencionar que la falta de información cuantitativa sobre el tema de la erosión en Chile es un problema evidente y ello es más explícito en zonas áridas y semiáridas. Debido a esto, resulta de suma importancia contar con herramientas matemáticas y/o computacionales que permitan estimar las tasas de erosión, con el fin de facilitar la toma de decisiones técnicas y lograr un manejo sustentable del recurso suelo.

En el marco del proyecto, “Restauración hidrológico forestal y Oasificación: Herramientas claves para el aumento de la productividad de suelos degradados de la Región de Coquimbo”, proyecto que fue financiado por la Agencia Estatal Corfo/Innova de Chile, y el cual ha tomado lugar los años 2007, 2008 y 2009, se instalaron en la Región de Coquimbo de Chile, parcelas de investigación con clavos de erosión, en un número de 30, las cuales fueron medidas durante los años mencionados y cuya información conseguida permitió la elaboración de modelos matemáticos que fuesen capaz de predecir el volumen a erosionar de un suelo.

Los resultados obtenidos con dicha metodología, permitieron el diseño y la validación de un modelo de predicción de la erosión hídrica, en la Cuarta Región de Coquimbo, a través de la relación matemática de variables climáticas que contribuyen a la generación de procesos erosivos.

2. Revisión Bibliográfica

2.1. EROSIÓN DE SUELOS EN CHILE

De acuerdo a Pizarro et al. (2003a) la erosión de los suelos en Chile, “es considerado uno de los problemas ambientales más significativos del sector silvoagropecuario. Asimismo, dicha problemática está asociada a una disminución de la productividad y eficiencia de los suelos, provocada por una baja retención tanto del agua como del suelo, cuya tendencia a escurrir se manifiesta en mayor medida en terrenos con pendientes pronunciadas.”

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA) en 1994, concordaron en señalar que la distribución de los terrenos erosionados en Chile no sigue un patrón regular, y es posible encontrar tanto áreas escasamente erosionadas, como sectores en los cuales la pérdida y el deterioro hacen irre recuperable el recurso, ya sea en términos físicos como productivos.

En dicho contexto, FAO (1994) agrega que una gran proporción de terrenos severamente erosionados se encuentra en las regiones áridas y semiáridas de la zona norte del país. Años atrás, estudios del Instituto de Recursos Naturales (IREN, 1979) empleados por FAO (1994), estimaron que la Región de Coquimbo se encontraba altamente deteriorada, principalmente en la provincia de Elqui.

En la actualidad Benedetti y Pizarro (2006) afirman que es precisamente la Región de Coquimbo la que presenta la situación más crítica del país, en donde las precipitaciones torrenciales, a pesar de ser escasas, arrastran consigo significativas porciones de suelo con las mejores condiciones de fertilidad.

Otras importantes unidades fisiográficas afectadas por la erosión hídrica, acorde a los estudios realizados por Peña (1994), son la Precordillera Andina y la Cordillera de los Andes, aparte de otros extensos sectores de lomajes incluidos a lo largo de la Depresión intermedia.

En el contexto descrito, Benedetti y Pizarro (2006) señalan que los estudios de erosión en el país son antiguos y se enmarcan en análisis descriptivos y no analíticos, o bien corresponden a estimaciones cuantitativas de indudable valor, pero que son aisladas en tiempo y espacio,

por lo que no se condicen con la necesidad de contar con análisis globales cuantitativos que entreguen orientaciones técnicas a las actuaciones de las políticas ambientales.

2.2 DEFINICIÓN DE LOS FENÓMENOS DE EROSIÓN Y SEDIMENTACIÓN

Según García-Chevesich (2008), el término “erosión” proviene del latín “erodere”, que significa roer; además se refiere a dicho fenómeno como el desgaste de la superficie terrestre, bajo la acción de los agentes erosivos, siendo los principales el agua y el viento. En el mismo contexto, Pidwirny (2006) define la erosión como la degradación de los suelos, los sedimentos, el regolito, los fragmentos de roca y el paisaje, a través de distintos medios externos como el viento, el hielo y el agua.

Por su parte, la Comisión de las Comunidades Europeas (2002), define a la erosión como un fenómeno geológico natural causado por el desprendimiento de partículas del suelo a causa de la acción del agua o el viento, las cuales son depositadas en otro lugar, en donde este último proceso es conocido como sedimentación (figura 2).



Figura 2: Cauce característico de la zona central de Chile, con presencia de sedimentos de diverso tamaño. Fotografía tomada por Roberto Pizarro.

Para Añó y Peris (2003) la erosión no se define como un proceso en sí mismo, sino como la manifestación fenomenológica de una multitud de procesos que dan lugar a la pérdida del recurso suelo. Pidwirny (2006) agrega que dichos procesos llegan a su fin cuando las partículas transportadas caen y se depositan en la superficie, generando procesos de sedimentación.

2.3. AGENTES, TIPOS DE EROSIÓN Y FACTORES QUE LA AFECTAN

Diversos autores han manifestado que el proceso de erosión se presenta de distintas formas. Así por ejemplo, si es clasificada por su origen, se puede hablar de erosión natural y erosión antrópica. Respecto al primer caso, García-Chevesich (2008) señala que las cuencas, los valles y las playas en donde vive el hombre han sido creados bajo distintos procesos erosivos, los cuales se caracterizan por poseer lentas tasas de erosión, en las cuales el hombre no es capaz de distinguir o darse cuenta de los cambios topográficos que ocurren. Este tipo de erosión natural se denomina erosión geológica. Ahora si se habla de erosión antrópica, existen numerosos ejemplos erosivos, que han sido inducidos por un repentino e inadecuado uso de la tierra, relativos a la tala de un bosque, un incendio forestal, un subsolado, un sitio en construcción o una excesiva cantidad de animales, los que provocan una alteración en el ciclo hidrológico, afectando las capas protectoras del suelo y la capacidad de infiltración de éste. Al respecto, la Asociación Española Agricultura de Conservación / Suelos Vivos (2005), señala que las actividades humanas pueden acelerar en gran medida las tasas de erosión, particularmente en el mundo agrario, donde la agricultura convencional ha provocado un aumento de dichas tasas de manera considerable. Este indebido uso de la tierra se puede traducir en un desmesurado incremento en las tasas de pérdida de suelo superficial, proceso denominado erosión acelerada (García-Chevesich, 2008).

En el mismo sentido, es importante mencionar que la erosión puede ser provocada por distintos agentes, los cuales generan una energía capaz de erosionar el suelo, en donde éstos pueden actuar solos, o en conjunto (Tabla 1). Al respecto, se identifican fundamentalmente cuatro, a saber, el agua (erosión hídrica), el viento (erosión eólica), el hielo (erosión glacial) y la gravedad (erosión por gravedad). Al referirse al orden de importancia de los agentes en Chile, la erosión hídrica se sitúa como uno de los principales problemas silvoagropecuarios; la erosión por gravedad también es frecuente, aunque por lo general no representa un problema. Por último, la erosión glacial y la erosión eólica son insignificantes a nivel nacional (sin considerar excepciones), pues estos fenómenos ocurren en terrenos desérticos no productivos (García-Chevesich, 2008).

Agente	Tipo de Erosión	Tipo de Proceso Erosivo
Agua	Erosión hídrica	Erosión en cursos de agua Erosión de Impacto Erosión laminar Erosión en riles Erosión en cárcavas Erosión costera
Viento	Erosión eólica	Abrasión Deflación
Hielo	Erosión glacial	Movimiento de glaciares
Gravedad	Erosión por gravedad	Derrumbes Movimiento en masas Suelos repantes

Tabla 1: Agentes, tipos de erosión y procesos erosivos. Fuente: Field, 1997, citado por García-Chevesich 2008.

Por otra parte, el proceso erosivo puede deberse a la combinación de variados factores; en este sentido, la Comisión de las Comunidades Europeas (2002) señala que la erosión está originada por la combinación de factores tales como las pendientes pronunciadas, el clima (por ejemplo, prolongados periodos de sequía seguidos de fuertes precipitaciones), la inadecuada utilización del suelo, el tipo de cubierta vegetal (por ejemplo, vegetación escasa) y los desastres ecológicos (por ejemplo, incendios forestales). Además, ciertas características intrínsecas del suelo pueden hacerlo más propenso a la erosión (por ejemplo, un escaso desarrollo de los horizontes superiores, una textura limosa o un bajo contenido en materia orgánica). En el mismo contexto, Tristán (2003), en su estudio Evaluación de los procesos de erosión en las playas interiores de Cuba, demostró que los procesos de erosión que afectan esos territorios, corresponden principalmente a la combinación de actuaciones inapropiadas del hombre que se relacionan estrechamente con los fenómenos físicos referentes a la elevación del nivel del mar y a la intensidad de las tormentas. Asimismo, Oñate-Valdivieso (2004), indica que la presencia de cantidades significativas de arena y la baja presencia de materia orgánica en los suelos, producen aumentos relevantes en su erodabilidad.

Por lo tanto, al referirse a los factores que afectan a la erosión, Morgan (2005) ha señalado que dichos factores están en función del tipo de erosión en cuestión. Sin embargo, como regla general, se puede decir que la erosión que ocurrirá en un suelo va a depender, en forma directa, de ciertas variables o factores como el clima, la vegetación, la hojarasca, el tipo de suelo, la topografía, la velocidad del flujo y el uso de la tierra, los cuales se encuentran muy relacionados entre sí (Figura 3).

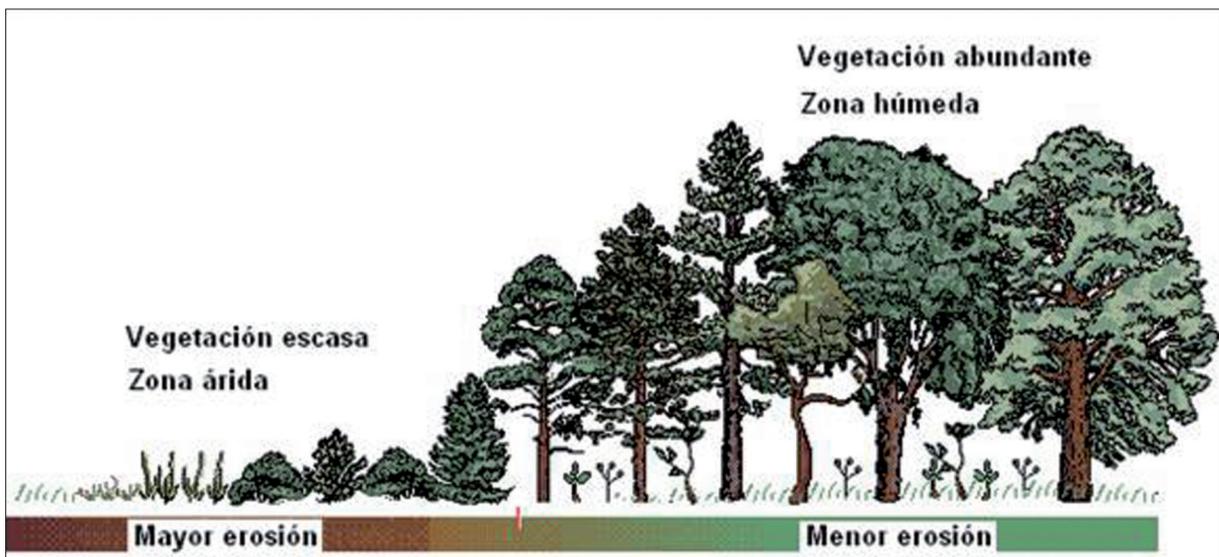


Figura 3: Relación entre la erosión y algunos factores incidentes. Adoptado de MSN Encarta 2009 (Disponible en www.educa.madrid.org)

Cabe mencionar que el objetivo principal de esta publicación es ejemplificar la evaluación cuantitativa de la erosión hídrica superficial, en zonas áridas y semiáridas de la Región de Coquimbo, mediante el uso de parcelas con clavos de erosión. Es por esta razón, que a continuación se define detalladamente dicho proceso de erosión hídrica superficial.

2.4. EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL

La erosión hídrica constituye uno de los principales procesos de pérdida de suelo y representa una de las formas más completas de degradación, englobando tanto la degradación física del suelo como la química y la biológica (De Regoyos, 2003 citando a Colomer, 2001). Al respecto, tal como lo han planteado diversos autores, la erosión hídrica superficial corresponde al principal problema del sector silvoagropecuario en Chile (Ellies, 2000).

Por su parte, Mintegui y López (1990) definen este tipo de erosión como el proceso de disgregación de las partículas del suelo por la acción del agua, el cual culmina con el depósito de los materiales transportados por la corriente en áreas de sedimentación, cuando la capacidad de arrastre de las aguas se reduce hasta el punto de no permitir la continuación en el flujo de las partículas terrosas previamente incorporadas al mismo.

La erosión hídrica puede ocurrir de variadas formas. La Statewide Urban Designs and Specifications (SUDAS, 2006) señala, entre las principales, a la erosión por salpicadura, la erosión laminar, la erosión por surcos o en regueros, la erosión por cárcavas y la erosión en bancos aluviales, las cuales son definidas en los siguientes puntos.

2.4.1. Erosión por salpicadura y erosión laminar

El primer paso en el proceso de erosión hídrica comienza cuando las gotas de lluvia impactan la superficie con una energía suficiente para desplazar partículas de material sin consolidar, dando lugar al proceso denominado erosión por salpicadura (SUDAS, 2006)

La duración, intensidad y frecuencia de las precipitaciones, logran la remoción de capas delgadas y uniformes de suelo sobre toda el área, produciendo lo que se denomina como erosión laminar (Favis-Mortlock, 2007). Al respecto, Mintegui y López (1990) señalan que este proceso es el más perjudicial debido a que en la mayoría de las ocasiones no se le reconoce y por ende, pocas veces se le trata. Para García (2006), la erosión laminar se puede identificar mediante los siguientes síntomas:

- Presencia de montículos en el suelo
- Plantas con su sistema radicular al descubierto
- Invasión de especies vegetales específicas de suelos degradados

Junto a lo anterior, otra manera de identificar el accionar de la erosión laminar es la presencia de pavimentos de erosión, que corresponde al proceso que deja al descubierto áreas con presencia de piedras de diferentes tamaños, las cuales originalmente estaban cubiertas por el suelo.

2.4.2. Erosión por surcos o en regueros

Ocurre cuando, producto de pequeñas irregularidades en la pendiente del terreno, la escorrentía se concentra en algunos sitios hasta adquirir volumen y velocidad suficientes para hacer cortes y formar surcos (Suárez 1980, citado por Farfán, 2002).

Según Cairns et al (2001) los surcos corresponden a canales miniatura, que son el resultado de la remoción de aproximadamente 10 a 50 cm. de suelo por acción de la escorrentía, la que transporta material erosionado hacia canales o riberas. Estos autores señalan además, que el accionar constante del agua a través de estos canales, podría producir barrancos o cárcavas (figuras 4 y 5).



Figura 4: Generación de cárcavas en laderas. Fotografía tomada por Roberto Pizarro.



Figura 5: La presencia de cárcavas y desprendimientos, obliga al uso de obras civiles para la defensa de la infraestructura. Fotografía tomada por Roberto Pizarro.

2.4.3. Erosión en barrancos o cárcavas

Se define como el proceso de remoción de suelo o de pequeñas piedras, por acción del agua, que forma depresiones mucho más grandes que los surcos, los que usualmente transportan material durante o inmediatamente después de ocurrida la tormenta (Cairns et al., 2001 citando a Bates y Jackson, 1980).

Al respecto, Morgan (1997) señala que al comparar estas depresiones con los cauces permanentes, relativamente llanos y cóncavos en su perfil, las cárcavas se caracterizan por tener cabeceras y saltos a lo largo de su curso. Además, poseen una mayor profundidad, menor anchura que los cauces estables y transportan más cantidad de sedimentos (figura 6).



Figura 6: Paisaje de cárcavas de zonas semiáridas. Fotografía tomada por Roberto Pizarro.

2.4.4. Erosión en bancos aluviales

De acuerdo a SUDAS (2006) la erosión en bancos aluviales se produce a partir de los procesos erosivos que se generan en el lecho de los barrancos o cárcavas, haciéndolos más profundos, favoreciendo con esto que el material de las riberas se vuelva inestable y se comience a desprender material desde las zonas altas. El mismo autor señala que este tipo de erosión provoca que las vías fluviales ondulen, debido a la acumulación de suelo erosionado en el lecho.

En función de la clasificación anteriormente expuesta, se presenta un esquema empleado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 2002), para representar el proceso de erosión hídrica (Figura 7).

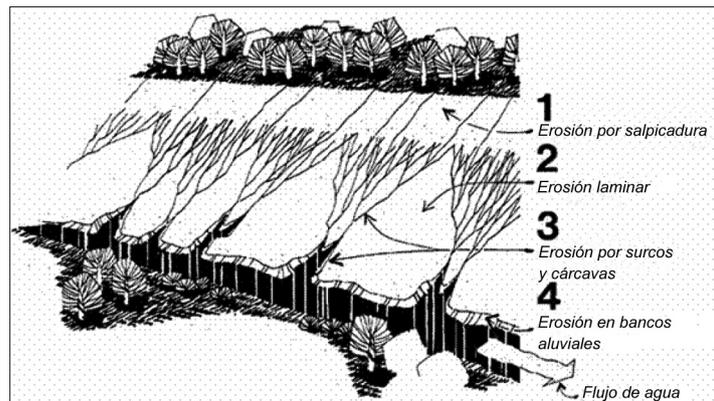


Figura 7: Tipos de erosión hídrica. Adoptado de USDA (2002).

Finalmente, estudios realizados en 1990 por la Dirección de Conservación de Suelos y Lucha contra la Desertificación (DSCyLcD), en Argentina, concluyen que, en términos generales, la erosión hídrica es directamente proporcional a la cuantía de precipitación y a la longitud de la vertiente y la ladera, pero inversamente proporcional a la capacidad de infiltración del suelo y a la resistencia que opone la superficie. Indiscutiblemente, cuanto mayor es la pendiente del terreno, mayor es la velocidad de flujo y más intensa es la erosión.

2.5. ESTIMACIÓN DE LA EROSIÓN HÍDRICA SUPERFICIAL

Según Morgan (1997), “cuando se predice la erosión, se debe decidir si la predicción es para un año, un día, una tormenta o para períodos cortos de tiempo, y si dicha predicción se refiere a una parcela, una ladera o una cuenca. Estas perspectivas en el tiempo y en el espacio influirán en los procesos que deben incluirse en el modelo, en la forma que deben describirse y en el tipo de datos necesarios para validar el modelo y su funcionamiento.”

Según García (2006), la modelización trata de dar respuesta a todos aquellos aspectos técnicos que facilitan el conocimiento de los diferentes parámetros e interrelaciones implicados, para posteriormente tratar de reproducir el sistema en el cual se desarrollan los procesos y explicar el comportamiento global en una cuenca hidrográfica. Continúa expresando que la modelización de los procesos erosivos se basa en la obtención de algoritmos matemáticos que describen la disgregación, el transporte y la deposición de los materiales.

Para Lal (1994), existen tres razones por las cuales se hace necesario modelar el proceso erosivo:

- Los modelos pueden ser utilizados como herramientas de predicción de la pérdida de suelos; para planes de conservación, proyectos e inventarios de erosión; y para la ordenación del recurso.
- Los modelos matemáticos con base física pueden predecir dónde y cuándo ocurrirán procesos erosivos, ayudando al planificador en la tarea de reducir su impacto.
- Además, pueden ser utilizados como herramienta para lograr entender los procesos erosivos y sus interacciones, priorizando así futuras investigaciones.

En cuanto al tipo de modelos, García (2006) propone la siguiente clasificación, cuyo esquema se presenta en la Figura 8.

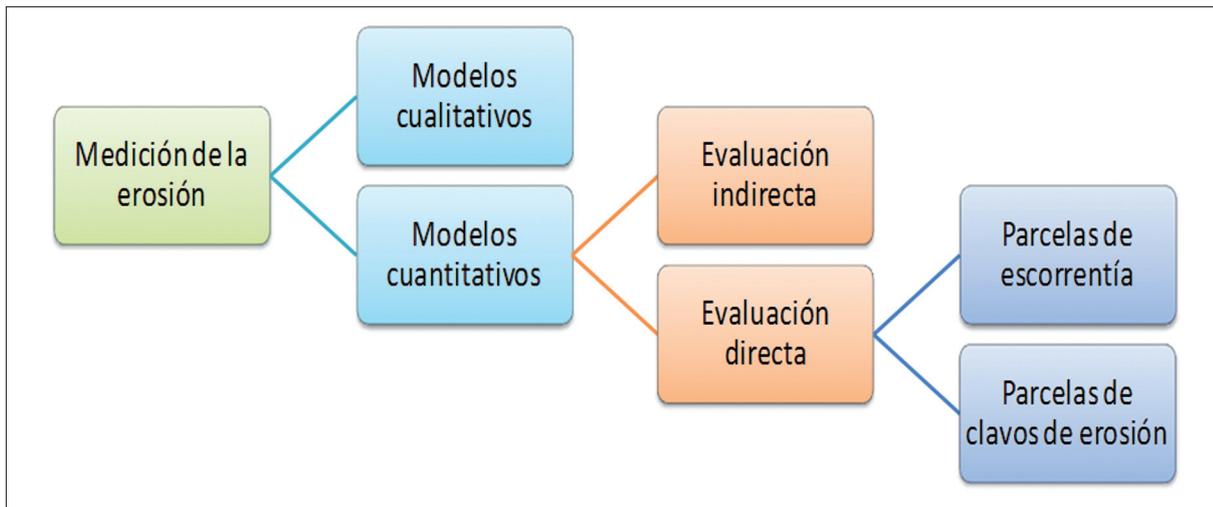


Figura 8: Tipos de modelos en la evaluación de la erosión hídrica. Adoptado de García (2006).

2.5.1. Modelos Cualitativos

Este tipo de modelos suele ser común en estudios a nivel de reconocimiento o diagnóstico, constituyendo una opción bastante ágil para una futura toma de decisiones respecto al problema de la erosión (Moreira, 1991).

El mismo autor agrega que estos métodos suelen estar orientados a la expresión cartográfica, estableciéndose en ellos niveles de jerarquización para los distintos parámetros en estudio, usualmente el suelo, la vegetación y la topografía (Honorato et al., 2001).

García (2006) es determinante en señalar que los sistemas de información geográfica (SIG) resultan una herramienta idónea en la evaluación cualitativa de la erosión, siendo de gran utilidad en la captura y análisis de toda la información espacio-temporal necesaria en la posterior aplicación de los modelos (Gómez et al., 2007). En la Figura 9 se ejemplifica lo anteriormente señalado.

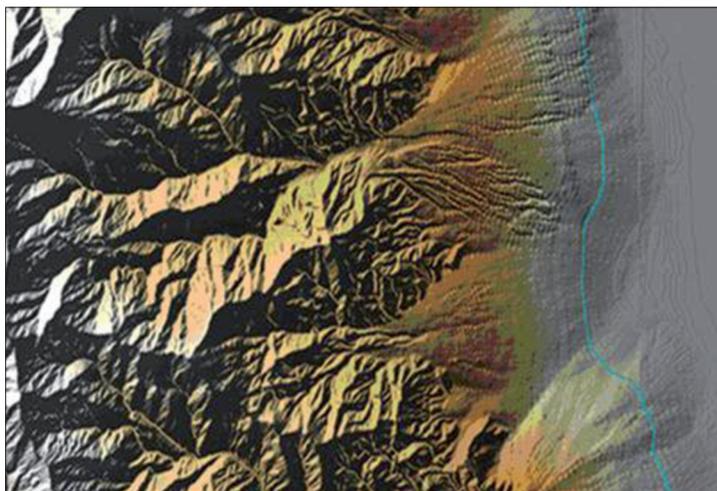


Figura 9: Evaluación de la erosión hídrica a través de SIG. (Disponible en <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10w.html>)

En Chile, experiencias en esta línea incluyen el proyecto impulsado por el Centro de Información sobre Recursos Naturales (CIREN, 2006) "Zonificación de Erosión y Fragilidad de los Suelos del Secano Costero de las Regiones VI y VII", en el cual mediante análisis visual de imágenes satelitales, se obtuvo la cartografía de erosión actual para las áreas de estudio, clasificándola en nula o baja, moderada, severa y muy severa, de acuerdo a las definiciones dictadas por el Decreto Ley 701 que fomenta, a través de subsidios, las plantaciones forestales en Chile.

2.5.2. Modelos Cuantitativos

Para Pizarro (1988), el poder definir cuantitativamente el monto de la pérdida de suelos en función de la erosión hídrica, se plantea como un elemento importante cuyo objetivo es poder estimar en un marco referencial, la magnitud del daño sobre las cuencas hidrográficas.

Los modelos cuantitativos permiten la estimación numérica de la erosión y, como se señaló en la Figura 8, pueden tener una evaluación indirecta o directa (Honorato et al., 2001; García 2006).

2.5.2.1. Modelos de Evaluación Indirecta

i) Modelos con base física

Este tipo de modelos incorpora en su análisis leyes de conservación de masa y energía, utilizando la ecuación de continuidad para representar un estado de la conservación de la materia y su transformación en el espacio y tiempo (De Regoyos, 2003). La mayoría de los modelos con base física deben su origen al esquema, relativamente simple, desarrollado por Meyer y Wischmeyer (1969) y citados por los mismos autores, cuyo fin es comprobar si es factible una aproximación matemática que simule a la erosión.

Respecto a los modelos, es posible citar el Water Erosion Prediction Project (WEPP), desarrollado por USDA (1995), para la predicción cuantitativa de la erosión en laderas y en cuencas pequeñas a medianas, proporcionando además un método rápido para evaluar varias opciones de conservación de suelos (De Regoyos, 2003).

El modelo describe los procesos de la disgregación, transporte y deposición de las partículas del suelo debido a fuerzas mecánicas e hidrológicas, actuando en una ladera o en una cuenca y se presenta como un conjunto de programas para computadores personales PC (Romero y Stroosnijder, 2002).

ii) Modelos conceptuales

Acorde a TRAGSA (1998), estos modelos se basan en los mismos principios que los modelos con base física, pero permiten una mayor adaptación a la realidad integrando modelos hidrológicos, modelos de erosión y modelos de transporte de sedimentos. Así, el modelo denominado KINEROS, desarrollado por USDA en el año 2000, realiza una representación cinemática del flujo de escorrentía y erosión, basándose en la descripción de los procesos de interceptación, infiltración, escorrentía superficial y erosión en pequeñas explotaciones agrícolas y cuencas urbanas.

iii) Modelos paramétricos

Son modelos basados en la lógica inductiva y por lo general se aplican en aquellas condiciones en las que han sido calibrados (García 2006).

Los modelos paramétricos destacan por su amplia utilización y su uso; en este aspecto particular, la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, por su sigla en inglés) de Wischmeier y Smith (1978), constituye un método de uso generalizado para la estimación de la erosión hídrica. Sin embargo, autores como Hudson (1997) critican su denominación de “universal”, puesto que sólo es aplicable a la mitad oriental de los Estados Unidos.

El modelo USLE, a partir de información referida a seis variables de control, estima el valor en toneladas métricas por hectárea y año de la cantidad de suelo removida por la erosión hídrica (Pérez y López, 2000). La expresión matemática de este modelo tiene la siguiente forma:

$$A = R * K * LS * C * P$$

Donde:

A = Pérdida de suelo promedio anual en (t/ha/año).

R = Factor de erosividad de las lluvias en (MJ/ha*mm/hr).

K = Factor de erodabilidad del suelo en (t/ha MJ*ha/mm*hr).

LS = Factor topográfico (función de longitud – inclinación – forma de la pendiente), adimensional.

C = Factor ordenación de los cultivos (cubierta vegetal), adimensional.

P = Factor de prácticas de conservación (conservación de la estructura del suelo), adimensional.

Honorato et al (2001) señalan que el modelo USLE, presenta una alta fidelidad y que éste posee una relativa aplicabilidad universal, basándose en la gran cantidad de trabajos realizados en todo el mundo con fines científicos.

En Chile, Honorato et al (2001) realizaron una evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y la IX Regiones. Sus resultados demostraron un buen comportamiento predictivo del modelo en localidades con prácticas de manejo que favorecieron el proceso erosivo. Por otra parte, en localidades donde existieron prácticas de manejo protectoras del suelo, como una mínima labranza, el modelo no proporcionó buenas estimaciones de erosión, debido principalmente al factor R estimado mediante la aproximación de Arnoldus, cuyos valores no proporcionaron la exactitud suficiente para estimar la erosividad de la lluvia.

Acorde a esto, Farfán (2002) desarrolló el cálculo del índice de erosividad pluvial R de la USLE para dos estaciones pluviográficas de la Región del Maule en Chile, a partir de la modificación del Índice de Fournier, consiguiendo resultados muy satisfactorios. Para ello correlacionó los valores del factor R a nivel mensual, con el valor mensual del índice de Fournier, demostrando con ello la validez que posee estimar la capacidad erosiva de las lluvias (R), en función del índice de agresividad climática de Fournier.

En 1977, Williams y Berndt, dan origen a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Modificada (MUSLE), incrementando la precisión predictiva y posibilitando su aplicación en eventos individuales (Artigas et al. 2006). La diferencia con el modelo USLE, radica en el reemplazo del factor de erosividad de la lluvia R por un factor de escorrentía, lo que permite estimar directamente la producción de sedimentos, eliminando la necesidad de usar un factor de entrega y teniendo la ventaja de poder ser aplicada a eventos de lluvia por separado (Olmos et al 2003). La ecuación está dada por:

$$Y = 11,8 * (V + q_p^{0,56}) * K * C * PE * LS$$

Donde:

Y = Producción de sedimentos desde la cuenca en toneladas.

V = Volumen de escorrentía superficial para la cuenca en m³.

q_p = Caudal pico para la cuenca en m³/s.

K, C, Pe y LS = Factores de la USLE, pero calculados como promedios ponderados para el área de la cuenca.

Por otra parte, en la década de los ochenta, es realizada una revisión del modelo USLE, dando origen a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada (RUSLE), la cual permite predecir las pérdidas de suelo a largo plazo para un sistema específico de manejo. Además, posibilita determinar sectores críticos, en los que la pérdida de suelo puede sobrepasar los rangos tolerables, permitiendo además elegir la práctica de control de la erosión hasta un nivel de pérdida de suelo tolerable (Oñate – Valdivieso, 2004).

En 1991 se publica la versión revisada del modelo RUSLE, que incluye un nuevo procedimiento para estimar el factor C, a partir de cinco variables, de fácil determinación y estimación (Cléricki et al 2001):

- Cobertura del Suelo por residuos de la vegetación previa.
- Cobertura del suelo por la parte aérea de la vegetación.
- Rugosidad de la superficie del suelo.
- Contenido de biomasa en descomposición en los primeros 10 cm. del suelo.
- Contenido de agua del suelo.

Fournier (1960), estableció un Índice de Agresividad Climática o Índice de Fournier (IF), como alternativa a los índices propuestos por otros autores, cuya obtención y cálculo son de mucha complejidad. Este índice muestra una alta correlación con la cantidad de sedimentos arrastrados por la escorrentía. El cálculo se hace en base a estaciones que posean datos representativos de la zona de estudio, utilizando la siguiente expresión:

$$IF = \frac{Pp^2 \max}{\bar{P}}$$

Donde:

IF = Índice de Fournier.

$Pp^2 \max$ = Precipitación correspondiente al mes más lluvioso del año (mm).

\bar{P} = Precipitación media anual (mm).

En el extremo opuesto, en cuanto al tamaño y características de las superficies a evaluar (pequeñas cuencas de carácter torrencial), se encuentra el modelo de Djorovic. Este evalúa la degradación específica en cuencas, considerando como parámetros definitorios, la precipitación, la temperatura, el suelo, el relieve, la vegetación y el grado y tipo de intensidad de los procesos erosivos existentes en la cuenca (Junta de Andalucía, 2009). Considera además, un parámetro para estimar la influencia del grado de intensidad que han alcanzado los procesos erosivos presentes en la cuenca y el tipo de erosión predominante (Benítez, 2007). El modelo viene definido por la ecuación:

$$W = \pi * T * h * F * \sqrt{Z^3}$$

Donde:

W = Caudal sólido en m3/año, como medida de la degradación específica de la cuenca.
 $T = \sqrt{\frac{t_0}{10}}$ = Factor de temperatura; donde t0 es la temperatura media anual de la cuenca en °C.

h = Precipitación media anual en mm.

F = Superficie de la cuenca en proyección horizontal en km2;

Z = Coeficiente de erosión que refleja la intensidad y extensión del fenómeno erosivo de una cuenca. Además, valora la influencia de los factores de suelo, vegetación y relieve mediante la siguiente expresión:

$$Z = X * Y * (\alpha + \pi)^{\sqrt{\quad}}$$

Donde:

X = Coeficiente adimensional que cuantifica el estado de la cubierta vegetal y las prácticas de conservación de suelos, variando de 0.05 para bosques y vegetación arbustiva bien cubierta a 1.0 para suelos desnudos sin labrar.

Y = Coeficiente adimensional de erosionabilidad del suelo que varía de 0.05 para los suelos con estructura menos erosionable a 2.0 para arenas, gravas y suelos sueltos.

α = Coeficiente adimensional que cuantifica el estado erosivo de la cuenca, desde 0.2 para cuencas sin otro tipo de erosión manifiesta, que pequeños deslizamientos de márgenes en la red de drenaje, a 0.1 en cuencas que muestran en su totalidad procesos erosivos profundos.

π = Pendiente media de la cuenca como parámetro representativo del factor de relieve, expresado en %.

El valor Z, representativo de la cuenca, se calcula como media ponderada de los distintos valores de este coeficiente, obtenidos para cada una de las superficies parciales que integran los diferentes valores de los coeficientes representativos de los factores:

$$Z = \sum \frac{Z_i * \alpha_i}{F}$$

Siendo Z_i y a_i los valores parciales de la variable Z_i y de la superficie que incluye cada situación i , y en donde F corresponde a la superficie total.

Otra formulación difundida, de modo especial en Europa, fundamentalmente por su efectividad cuando se ha aplicado a ambientes de cuencas montañosas, es la de Gavrilovic. Esta metodología estima la cantidad de material producido por la erosión superficial en una cuenca, y que es transportado a la sección del río que la define (Olmos et al 2003). Es un método empírico que se compone de dos partes:

- El cálculo de la erosión media anual de sedimento por lluvia y escorrentía superficial (W).
- La determinación del coeficiente de redepositación o de retención de sedimentos (R).

De ambos se obtiene el volumen de sedimento producido por erosión y que es transportado a la sección final de la cuenca ($m^3/año$).

$$G = W * R$$

En cuanto a la concepción del fenómeno de estudio por parte de esta metodología, es semejante a la USLE en un alto porcentaje, ya que tiene en cuenta la interacción de los siguientes factores: precipitación, clima, topografía, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas y geomorfología. Por ello las formulaciones intentan incluir estas variables con un adecuado peso relativo. La expresión para determinar el volumen promedio anual erosionado de sedimento es:

$$W = T * h * p * \sqrt{Z^3} * F$$

Donde:

W = Volumen promedio anual erosionado de sedimento ($m^3/año$).

T = Coeficiente de temperatura, que se obtiene de:

$$T = \sqrt{(t / 10) + 0,1}$$

Donde:

t = Temperatura promedio anual.

h = Precipitación media anual ($mm/año$).

F = Superficie de la cuenca (km^2).

Z = Coeficiente de erosión, cuya expresión es:

$$Z = X * Y (\phi + \sqrt{l})$$

Donde:

X = Coeficiente de uso del suelo.

Y = Coeficiente de resistencia del suelo a la erosión.

j = Coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados.

l = Gradiente de la pendiente superficial (en %).

Existen otros modelos que tratan de medir la cantidad de sedimentos arrastrados. Uno de ellos es el Soil Loss Estimator for Southern Africa (SLEMSA), el cual fue desarrollado a partir de datos de Zimbabwe para evaluar la erosión resultante en diferentes sistemas agrícolas y para recomendar las medidas adecuadas de conservación. La técnica ha sido adoptada por todos los países del sur de África (De Regoyos, 2003). La Ecuación es:

$$Z = K * X * C$$

Donde:

Z = Pérdida media anual de suelo (ton/ha).

K = Pérdida media anual de suelo (ton/ha) en una parcela tipo de 30 m de longitud por 10 m de anchura y 2,5° de pendiente, de un suelo de erosionabilidad conocida (F) con el terreno en barbecho blanco.

X = Factor adimensional que combina la longitud y grado de la pendiente.

C = Factor adimensional que depende del manejo del cultivo.

2.5.2.2. Modelos de Evaluación Directa

Corresponden a parcelas experimentales, en las cuales se instala instrumental con el objetivo de estimar las pérdidas de suelo

i) Parcelas de Escorrentía

Estas parcelas (figura 10) se utilizan para recolectar los sedimentos removidos, involucrando la captación del caudal líquido y sólido (Morgan, 1997; Yataco, 2007).



Figura 10: Parcela de escorrentía. Gentileza de Estándares de ingenierías para aguas y suelos (EIAS, 2005).

Mutchler et al (1994) destacan a las parcelas de escorrentía como una de las metodologías más conocidas para la evaluación directa de la erosión del suelo. Este método de investigación permite controlar muchas de las condiciones en que ocurren los procesos erosivos, como el sellamiento derivado del impacto de las gotas de lluvia.

Para Hudson (1997), son tres las razones donde se justifica el empleo de parcelas de escorrentía:

- Con fines demostrativos, cuando la finalidad es demostrar hechos conocidos.
- Para estudios comparativos, teniendo una indicación aproximada del efecto en la escorrentía o en la erosión de, por ejemplo, la existencia o no de una cubierta del suelo o la cuantía de la escorrentía en la cima y en la base de una ladera.
- En la obtención de datos que se van a emplear para construir o para validar un modelo o ecuación destinado a predecir la escorrentía o la pérdida de suelo.

Vega y Febles (2005) señalan que el empleo de parcelas de escorrentía se ha generalizado. Sin embargo, la utilidad de la información obtenida, y de las investigaciones realizadas en ellas está limitada por la falta de continuidad en el tiempo, para la obtención de dicha información.

ii) Parcelas Experimentales de Clavos de Erosión

Es un método que consiste en parcelas rectangulares a las cuales se les instalan “clavos” que marcan la línea inicial del suelo, cuya medición se efectúa luego de ocurrida la tormenta con el objetivo de evaluar la erosión o sedimentación producida. Lo anterior permite establecer un balance entre pérdidas y entradas de suelo para realizar estimaciones más reales. En el mismo sentido es importante señalar que este método es aplicable solo en suelos desnudos (tal como los que se encuentran en la Región de Coquimbo), dado que la presencia de vegetación entorpece la medición (Pizarro y Cuitiño, 2002).

Estas parcelas de clavos de erosión, son conocidas por diversos nombres, como varillas o estacas y presentan también algunas modificaciones (generalmente acompañados de argollas para marcar los cortes en el terreno, como se aprecia en la Figura 11); los clavos pueden ser de madera, hierro o cualquier otro material. Cuitiño (1999) utilizó rayos de bicicleta en la elaboración de los clavos, resultando ser un material bastante adecuado para este tipo de trabajo, a lo descrito por Hudson (1997) y Mendoza (2005), respecto de las características que debe presentar el material a utilizar, ya que no se deteriora, es fácil de obtener y presenta bajo costo.

Para Hudson (1997), la extensión del clavo debe ser tal que se pueda enterrar en el suelo, siendo usual que alcance una longitud de penetración de unos 30 cm. En cuanto al espesor, es preferible que los clavos tengan un diámetro de hasta unos 5 mm, puesto que un espesor mayor puede interferir con la corriente de superficie y provocar su desgaste.

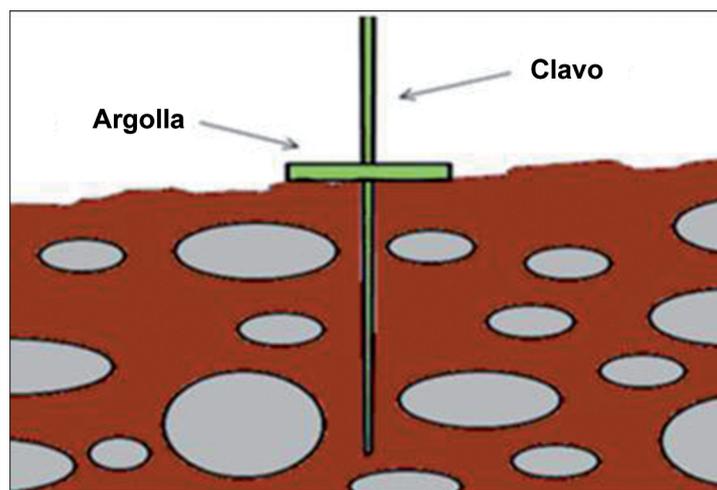


Figura 11. Clavo con argolla, para marcar los cortes en el terreno. Adaptado de Hudson (1997).

En la cuantificación de las pérdidas o entradas de material, Cuitiño (1999) asoció al establecimiento y aplicación de este método algunos conceptos que permiten explicar los procesos que ocurren. Así, se habla de erosión y sedimentación media, erosión neta y suelo movilizado.

• Erosión media y Sedimentación media

La erosión media se estima al sumar los incrementos en altura, medidos entre el tiempo i y el tiempo $i+1$, de todos los clavos de la parcela que denotaron la presencia de procesos erosivos, dividida esta sumatoria por el total de clavos presentes en la parcela. Esto define una altura de erosión promedio que normalmente se expresa en milímetros. Si este valor se transforma a metros y se multiplica por los 10000 m² que posee una hectárea, se tendrá una estimación de la erosión en m³/ha. Asimismo, si este valor se multiplica por la densidad aparente del suelo, se tiene la expresión de la erosión en toneladas por hectárea de superficie.

Del mismo modo, es posible calcular la sedimentación producida en la parcela, pero considerando como sumatoria el valor decremental de la altura del clavo, lo que significa que se han verificado procesos de sedimentación. Así también, la sumatoria de los milímetros de los clavos que mostraron sedimentación, es dividida por el total de clavos de la parcela. Para llevar la expresión a m³/ha o ton/ha, se procede de igual forma a como se hizo con la erosión.

La expresión matemática que determina estos procesos, planteada por Cuitiño (1999) y posteriormente redefinida por Pizarro y Cuitiño (2002), se presenta a continuación:

$$X = Y * D *_{\alpha} 10$$

Donde:

X = Suelo erosionado o sedimentado (ton/ha).

Y = Altura media de suelo erosionado o sedimentado (mm).

D_α = Densidad aparente del suelo (ton/m³).

• Erosión neta

Se denomina como erosión neta (En) a la diferencia entre la erosión y la sedimentación ocurrida en una ladera, expresada en metros cúbicos por hectárea o toneladas por hectárea (Cuitiño, 1999). Se expresa como:

$$En = E - S$$

Donde:

En = Erosión neta (ton/ha).

E = Erosión media de la parcela (ton/ha).

S = Sedimentación media de la parcela (ton/ha).

- **Suelo movilizado**

Se habla de suelo movilizado al cuantificar tanto la erosión media como la sedimentación ocurrida. La expresión matemática permite describir la totalidad de suelo que se movilizó en el terreno, en toneladas por hectárea (Cuitiño, 1999). Su expresión matemática es:

$$S_m = E + S$$

Donde:

S_m = Suelo movilizado (ton/ha).

E = Erosión media (ton/ha).

S = Sedimentación media (ton/ha).

En la figura 12, se muestra una parcela de clavos de erosión en terreno.

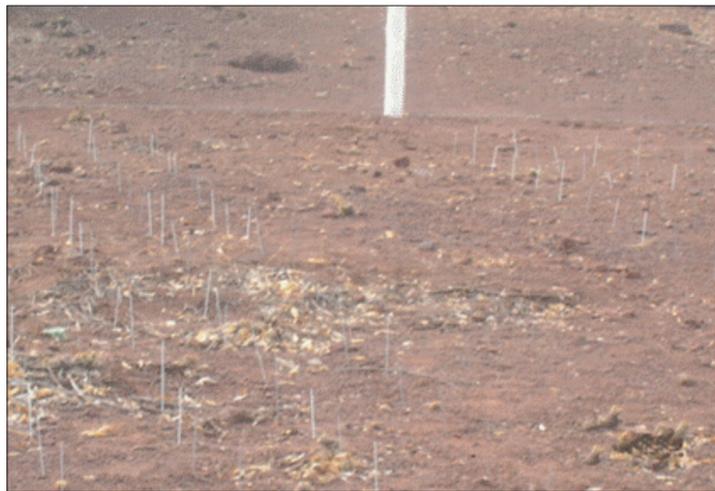


Figura 12. Parcela experimental con clavos de erosión. Gentileza de Estándares de ingenierías para aguas y suelos (EIAS, 2007).

Basándose en el principio de medición de las parcelas con clavos de erosión, Hudson (1997) sugiere otros métodos factibles de aplicar como el pintar líneas por encima del nivel del suelo alrededor de rocas, de raíces de árboles o de cualquier otro elemento firme y estable. La erosión revelará una banda no pintada por debajo de la línea marcada, indicando pérdida de suelo. Asimismo, la instalación de cuellos de botella o evidenciar montículos de material en torno a árboles o a sus raíces, luego del paso de escorrentías, son otras iniciativas que permiten identificar impactos ambientales, pero no son tan precisas en las estimaciones.

3. Metodología de Trabajo

3.1. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se inserta en la IV Región de Coquimbo, Chile, la cual se extiende entre los 29° 20' - 32° 10' Latitud Sur y 69° 49' - 71° 43' Longitud Oeste, abarcando una superficie aproximada de 40.579,9 km². La región se divide administrativamente en tres provincias: Elqui, Limarí y Choapa, tal y como se aprecia en la figura 13.

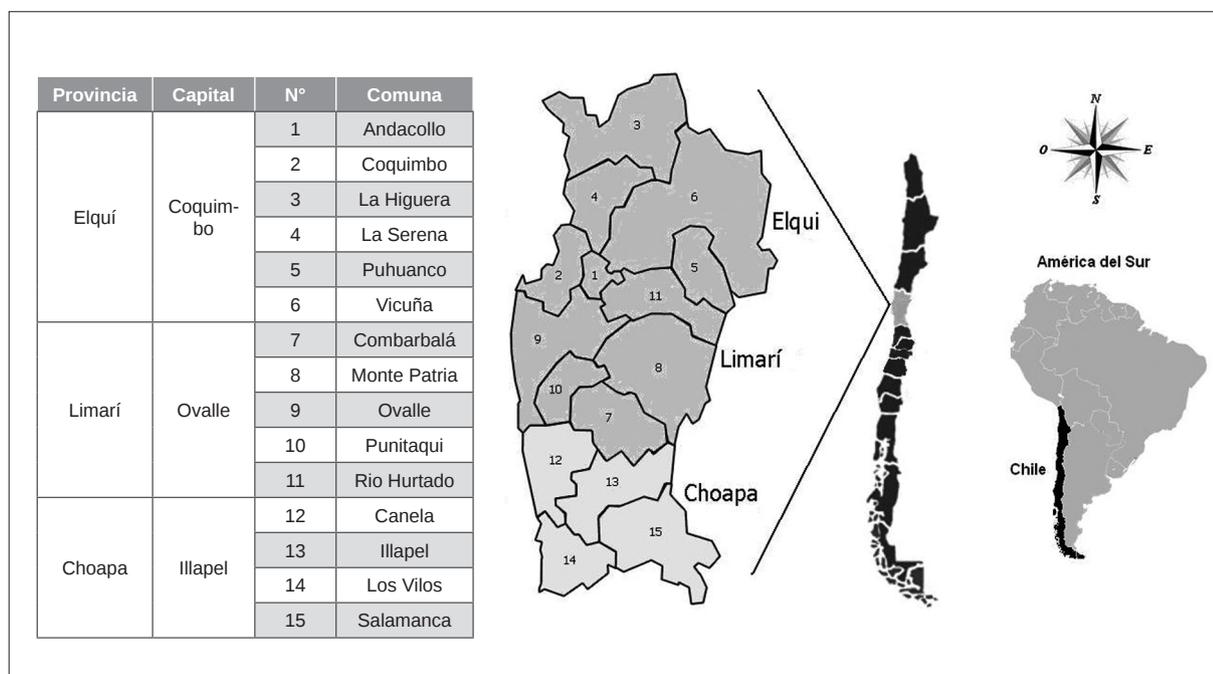


Figura 13: Región de Coquimbo con sus provincias y comunas. Chile.

Los sectores en evaluación, se encuentran divididos en las provincias antes mencionadas, y se presentan a continuación en la Tabla 2:

Provincia	Sector de estudio	Ubicacione	
		S	NE
Elquí	El Tambo	30°01,600´	70°46,825´
	Gualiguaica	29°59,751´	70°48,565´
	Quebrada Talca	30°00,565´	71°02,457´
	Quebrada Honda	29°35,137´	71°12,507´
	Caldera y Damas	30°17,702´	71°09,190´
	Las Cardas	30°17,389´	71°16,362´
	El Chacay	29°40,583´	71°11,869´
	Quitallaco	30°08,584´	71°14,450´
	Tangue N°1	30°21,013´	71°33,204´
	Tangue N°2	30°27,534´	71°31,199´
Limarí	Alcones	30°44,136´	71°37,808´
	Fray Jorge	30°40,281´	71°07,715´
	El Sauce	31°04,036´	70°57,211´
	Cogotí 18	31°06,222´	70°52,768´
	Pichasca	30°23,618´	71°04,839´
	La Coipa	30°29,513´	71°09,215´
	Romeralsillo	30°27,990´	71°28,044´
	Barraza	30°41,245´	71°24,701´
	El Espinal	30°44,237´	71°21,571´
	La Rinconada	30°50,976´	71°27,774´
Choapa	Huanque	31°44,343´	70°55,211´
	Las Chinchillas	31°30,802´	71°05,565´
	Tunga Norte	31°38,023´	71°19,060´
	Atelcura	31°33,394´	71°21,770´
	Agua Fría	31°29,293´	71°22,221´
	Carquindaño	31°28,173´	71°24,756´
	El Chilcal	31°21,893´	71°26,097´
	Yerba Loca	31°33,394´	71°21,770´
	Cañas de Choapa	31°44,883´	71°18,650´
	Caracas los Vilos	31°53,762´	71°27,771´

Tabla 2: Sectores estudiados en la Región de Coquimbo.

El mapa con la ubicación de cada uno de los sectores estudiados en la Región de Coquimbo, es presentado a continuación en la figura 14.

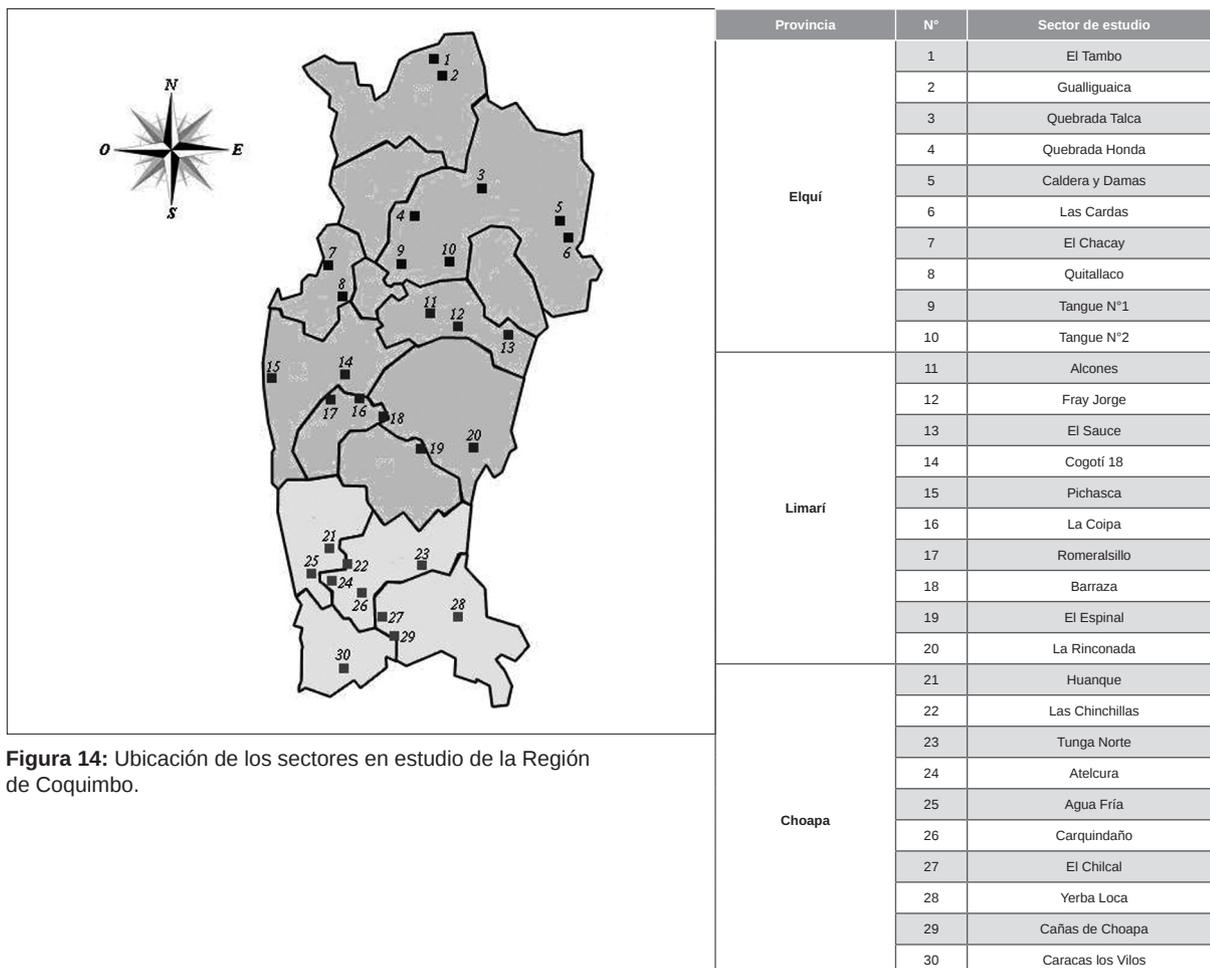


Figura 14: Ubicación de los sectores en estudio de la Región de Coquimbo.

3.2. OBTENCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LA INFORMACIÓN BASE

• Mediciones en clavos de erosión y variables físicas del suelo

La información se obtuvo a partir de mediciones efectuadas en parcelas experimentales con clavos de erosión, en el marco del proyecto: “Restauración hidrológico forestal y Oasificación: Herramientas claves para el aumento de la productividad de suelos degradados de la Región de Coquimbo”, desarrollado por el Instituto Forestal y la Universidad de Talca, con financiamiento de la agencia estatal CORFO, de Chile.

Dicha información contiene las mediciones de 130 a 135 clavos por parcela, con 3 parcelas en cada sector y para un total de 30 sectores, divididos en las tres provincias de la Región de Coquimbo. Esto implica que cada medición involucra la medida de aproximadamente 11.970 clavos, para el total del estudio. La instalación de las parcelas se realizó entre los meses de Enero y Agosto de 2007 por personal involucrado en el proyecto. Asimismo, las mediciones son hechas por un contratista especialmente capacitado para cumplir con estas funciones.

Las mediciones se efectúan con una huincha métrica al costado de cada clavo, expresadas en milímetros, (figura 15). El volumen de datos fue recibido de manera periódica tras cada tormenta, resultando en un total de 4 envíos de información como promedio por año, aunque

ciertos lugares en estudio presentan una mayor frecuencia de eventos de lluvia, que otras zonas de la región.

La medición de los clavos se realiza al menos una semana después de ocurrida la tormenta; esto para evitar errores por efecto de la humedad presente en el suelo.



Figura 15: Medición de los clavos de erosión. Gentileza de Estándares de ingenierías para aguas y suelos (EIAS, 2007).

Junto a lo anterior, se enviaron muestras de suelo de cada uno de los sectores en estudio al Centro Tecnológico de Suelos y Cultivos de la Universidad de Talca (CTSyC), las cuales fueron previamente colectadas por personal capacitado. La finalidad fue determinar los valores cuantitativos de densidad aparente, los cuales se expresaron en gramos por centímetro cúbico, gr/cc³ (equivalente a toneladas por metro cúbico, ton/m³). Junto con esto, el análisis contempló, además, la caracterización de cada suelo en función de su clase textural.

• Información pluviométrica

Además de los datos descritos, se obtuvo la información pluviométrica y pluviográfica de los sectores mediante las lecturas de dieciocho pluviógrafos instalados en las provincias de la región, en el marco del proyecto antes señalado. La lista de sectores para los cuales se dispuso de este instrumental, los cuales totalizan seis por provincia, se expone en la Tabla 3.

	Provincia		
	Elquí	Limarí	Choapa
Sectores	El Tambo	Fray Jorge	Huanque
	Gualiguaica	El Sauce	Las Chinchillas
	Quebrada Honda	Pichasca	Atelcura
	Caldera y Damas	Romeralsillo	El Chilcal
	Las Cardas	Barraza	Cañas de Choapa
	Tangue N°1	La Rinconada	Caracas los Vilos

Tabla 3: Sectores con instrumental pluviográfico en la Región de Coquimbo.

Cabe destacar que los pluviógrafos instalados alimentan, generalmente, a más de un sector en estudio, con lo cual fue posible generalizar la información pluviométrica obtenida para el total de sectores por provincia, a través de la determinación de las áreas de influencia de cada pluviógrafo, mediante la aplicación del método de los polígonos de Thiessen, incluido en el *software* de libre distribución GeoDa™.

Los polígonos de Thiessen, también conocidos como Polígonos de Voronoi o Teselación de Dirichlet, constituyen una importante técnica en el análisis de superficies. Al respecto, Backhoff (2005) señala su propiedad más importante, y es que mediante el método de Thiessen se forman límites de polígonos equidistantes entre “centroides” adyacentes. De esta forma, continúa el mismo autor, los polígonos generan un sistema de territorios delineados con áreas de influencia entre puntos contiguos. Para la aplicación de esta metodología a través del *software* señalado, fue necesario precisar de información de carácter primario, es decir, la georreferenciación de cada pluviógrafo, con cada uno de los datos expresados en coordenadas UTM.

Cada pluviógrafo instalado midió y presentó la información registrada en rangos de 0,2 milímetros (mm), especificando la fecha y hora exacta en la cual se produjeron los eventos de precipitación. En la figura 16 se muestra el procedimiento de instalación y el tipo de pluviógrafos utilizados en las mediciones.



Figura 16. Procedimiento de instalación de los pluviógrafos. Gentileza de Estándares de ingenierías para aguas y suelos (EIAS, 2007).

3.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

3.3.1. Traspaso digital de la información

En esta etapa se procedió a la digitalización de las mediciones de clavos de erosión, tarea que resultó indispensable en la posterior cuantificación y análisis de las distintas variables y procesos ocurridos. La información fue tabulada como se muestra en la figura 17, en un formulario, el cual ordena los datos en 15 columnas (5 columnas por parcela) y 26 a 27 filas, según el sector en estudio.

Provincia _____

Sector _____

Fecha _____

Observación _____

Parcela 1						Parcela 2						Parcela 3					
Clavo						Clavo						Clavo					
Nº	1	2	3	4	5	Nº	1	2	3	4	5	Nº	1	2	3	4	5
1						1						1					
2						2						2					
3						3						3					
...										
n						n						n					

Figura 17: Formulario para el registro de los datos.

3.3.2. Cuantificación de la erosión hídrica, sedimentación, erosión neta y suelo movilizado

Una vez tabulada la información, se determinaron los valores cuantitativos de erosión hídrica, sedimentación, erosión neta y suelo movilizado, todos ellos expresados en milímetros (mm) y toneladas por hectárea (ton/ha).

Estos cálculos se efectuaron para el total de información con la cual se contó, obteniendo valores tras cada tormenta y para cada sector, mediante la aplicación de un promedio aritmético entre las parcelas consideradas. En los cálculos y posteriores análisis se utilizó una planilla de cálculo Microsoft Excel 2007.

Además, es preciso señalar que la información recibida fue depurada, para evitar en lo posible estimar los procesos erosivos a partir de mediciones que pudieran presentar algún tipo de error, principalmente humano. Para esto, se procedió a eliminar todas aquellas mediciones que arrojaban resultados erróneos, considerando como tales, todas las diferencias entre clavos que se encontraban fuera del rango comprendido entre -0,49 y 0,49 cm. Como consecuencia de esto, algunas mediciones iniciales no fueron consideradas en el estudio.

Lo anterior dice relación con un proceso que es muy laborioso y que demanda un alto grado de precisión en terreno, toda vez que se mide al tercio de milímetro. Esto significa que las personas que realizan el trabajo, que en este caso fueron dos, adquieren una capacidad que los hace indispensables en el proceso de medición, y eso se visualiza que ha sido alcanzado cuando las fluctuaciones de los valores, empiezan a presentar valores bajos, lo que en este caso se consiguió cuando se había alcanzado la tercera medición aproximadamente. De ahí la relevancia de contar con equipos experimentados en este tipo de labores.

3.4. ANÁLISIS DE LOS DATOS

3.4.1. Análisis de los valores cuantitativos y estimación de las variables físicas del suelo

En este apartado se analizaron los datos obtenidos en el punto anterior, caracterizando los procesos erosivos por sector y provincia. Junto a esto, en el análisis se incorporó la textura del suelo y la densidad aparente de los lugares estudiados.

3.4.2. Análisis y selección de la información pluviométrica y pluviográfica

En esta etapa se procedió a aplicar el método de los polígonos de Thiessen a través del *software* GeoDa™. Para esto, fue necesario ordenar la información obtenida tras la georreferenciación de cada pluviógrafo en una planilla de texto con formato ASCII; esto como parte de los requerimientos del *software* para iniciar el módulo señalado (Anselin, 2005). La información se ordenó como se muestra en la figura 18, y consistió de tres variables: un identificador (un número entero que identificó a cada pluviógrafo), la coordenada X (longitud) y la coordenada Y (latitud) de cada pluviógrafo en estudio.



Figura 18: Formato de la entrada de datos del *software* GeoDa™. Obtenido del *software* GeoDa™

Una vez realizado esto, fue posible entregar los datos al *software* para obtener los polígonos de Thiessen. Posteriormente, se ingresaron, a través del mismo método, las coordenadas UTM de cada parcela en estudio, obteniendo finalmente las áreas de influencia de cada polígono creado.

Por otra parte, en este punto se identificaron las tormentas o eventos de lluvia ocurridos, considerando como tales aquellas en donde la generación de lluvia se produjo en lapsos que no contaron con una separación horaria mayor a veinticuatro horas. Si se verificaba una separación en el tiempo mayor a veinticuatro horas, entonces ese evento era considerado otra tormenta.

Posteriormente, la información pluviométrica recibida fue sometida a dos etapas de selección, basándose principalmente en la cantidad de precipitación y la duración de las tormentas identificadas. Se usaron los siguientes criterios, que finalmente determinaron las variables a utilizar en los análisis posteriores:

- Períodos en los cuales se efectuaron las mediciones: Se seleccionaron las tormentas, considerando plazos variables de 1 a 4 semanas, entre la fecha de ocurrida la tormenta y la medición de los clavos.
- Selección de tormentas con un aporte mínimo de 0,4 mm: Considerando las características del lugar donde se sitúa este estudio, es decir, escasas precipitaciones y la frecuencia de

eventos torrenciales, se decidió seleccionar todas las tormentas donde precipitó un monto igual o superior a 0,4 mm.

Como resultado, se trabajó con un promedio de 4 tormentas por sector, para el total de sectores que contaban con esta información.

3.5. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.5.1. Presentación y Análisis de las variables edáficas y pluviométricas

Una vez caracterizadas las tormentas, se obtuvieron tres variables básicas para el proceso de modelación matemática de los procesos erosivos, las cuales fueron el monto total de precipitación por cada tormenta, MT_{pp}; y la intensidad promedio por tormenta, IT. Además, considerando la naturaleza de los datos proporcionados, se obtuvieron las intensidades máximas de precipitación para rangos de aproximadamente 1 hora por cada tormenta, Imáx1h

Con los resultados anteriores, se procedió a analizar las características de los suelos en estudio, el comportamiento de los registros pluviométricos y pluviográficos y el comportamiento del proceso erosivo a lo largo del tiempo, determinando el grado de variación del fenómeno, dado un cierto número de períodos y para cada sector en estudio.

3.5.2. Presentación y Análisis de los Modelos Matemáticos para la estimación del proceso erosivo en las provincias de Elqui, Limarí y Choapa

Con la toda información obtenida en el punto anterior se efectuaron análisis Figuras para determinar si las variables pluviométricas por sí solas explicaban de manera lógica los procesos erosivos desencadenados. Muchas de éstas relaciones entregaron situaciones poco lógicas (es decir, muestran una tendencia negativa, lo cual resulta físicamente imposible). Como resultado de este análisis, se excluyeron las variables pluviométricas que presentaron esta inconsistencia, dejando sólo "las relaciones positivas" para la confección del modelo.

Una vez determinado lo anterior, se desarrollaron transformaciones de las variables independientes MT_{pp}, IT e Imáx1h, las cuales posteriormente fueron correlacionadas con las variables dependientes, erosión, sedimentación, erosión neta, sedimentación neta y suelo movilizado.

Finalmente, se realizaron variados test de regresiones "step-wise" entre las variables confeccionadas, lo cual permitió obtener los modelos por provincia.

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados de cada una de las variables obtenidas para las provincias analizadas en la Región de Coquimbo.

4.1 VARIABLES FÍSICAS DEL SUELO

Como se especificó, el análisis de los suelos fue encargado al CTSyC, Centro Tecnológico de Suelos y Cultivos de la Universidad de Talca, con lo cual se pudieron obtener los valores de la densidad aparente y también se logró describir la textura del suelo de los sectores estudiados en cada provincia de la región y ensayo realizado. A continuación, en la tabla 4 son presentados los resultados promedios provinciales que se obtuvieron de la densidad aparente, además de la textura del suelo que predominó en cada provincia.

Provincia	Clase Textural predominante	Densidad promedio (gr/cm ³)
Elqui	Franco arcilloso arenoso	1.276
Limarí	Franco arenoso	1.370
Choapa	Franco arenoso	1.293

Tabla 4. Clases texturales predominantes y densidades aparentes promedio por provincia

Los resultados permitieron determinar que la mayor parte de los suelos en los sectores analizados, poseen textura franco arenoso, con lo cual, presentan entre un 50-70% de arena y aproximadamente un 20% de arcilla. En la situación por provincia, en general no se evidencia un comportamiento latitudinal que influya en el tipo de textura. Asimismo, cabe señalar que la mayor variedad de texturas se encontraron en el sector Sur; en la Provincia de Choapa, con 6 clases texturales. Además, dicho sector fue el que denotó la mayor presencia de lluvias, lo cual es consecuente con la mayor presencia de vegetación en esta parte de la región.

En la figura 19 se presentan los sectores de cada provincia establecidos de forma latitudinal (de norte a sur), en donde se observa que los valores extremos de la densidad aparente de los suelos de la Región de Coquimbo fueron encontrados en los sectores de Cogotí 18 con un valor de 1,81 gr/cc y El Espinal con un valor de 1,13 gr/cc, ambos ubicados en la provincia de Limarí.

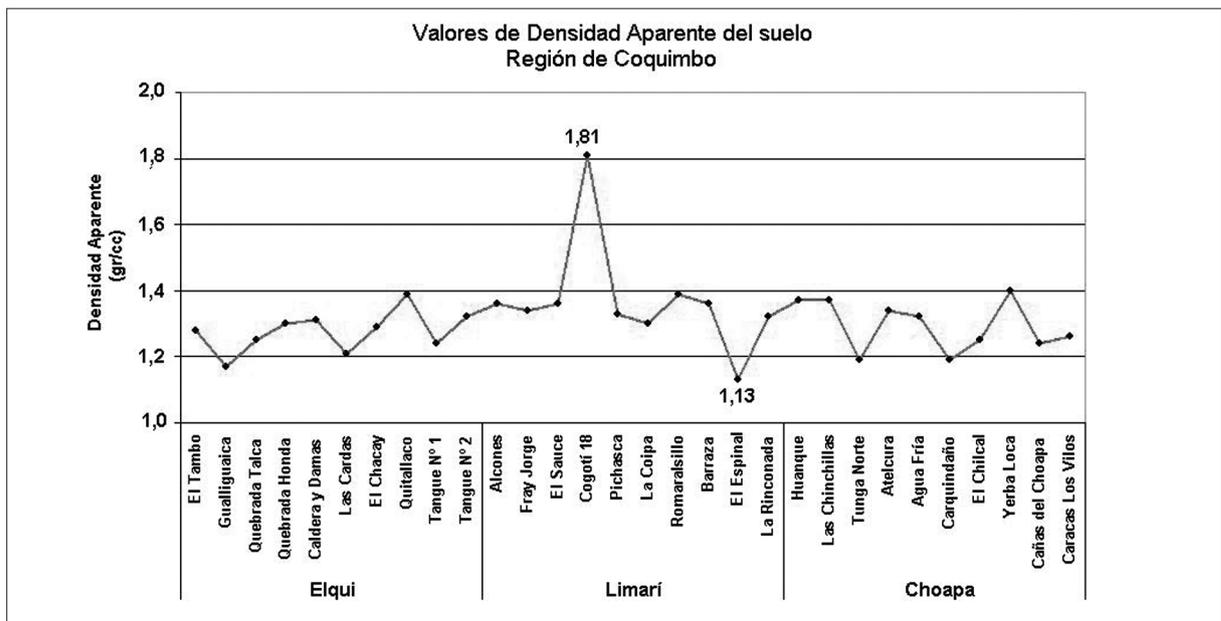


Figura 19. Valores de la densidad aparente del suelo en los sectores estudiados

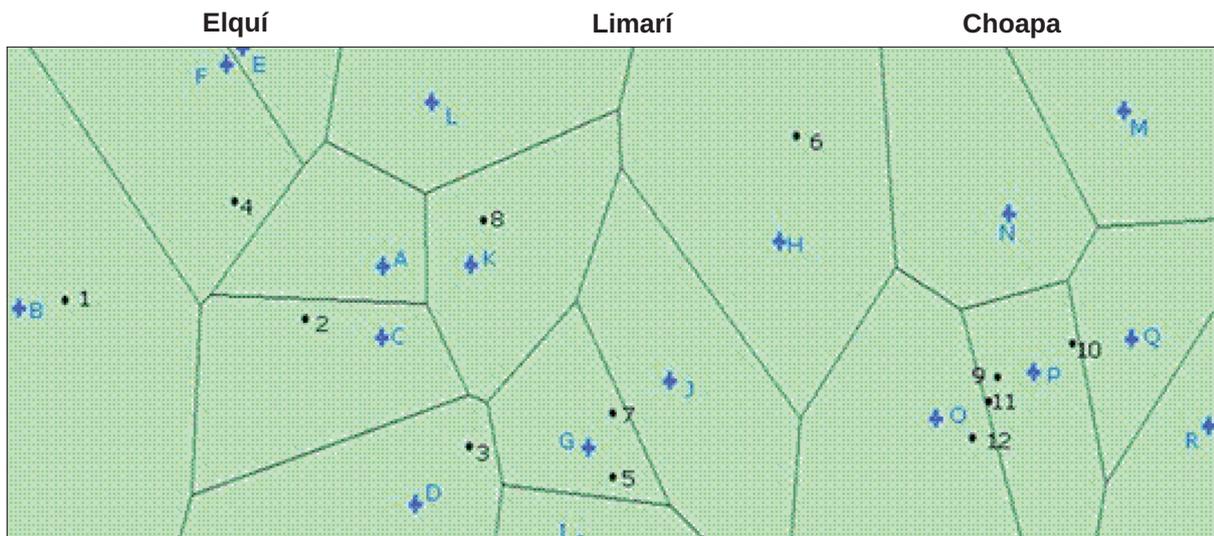
Finalmente, se puede señalar que el valor promedio alcanzado por la densidad aparente en los suelos de la Región de Coquimbo, fue de 1,31 gr/cm³.

4.2 RESULTADOS PLUVIOMÉTRICOS

Como se mencionó anteriormente, por lo general los pluviógrafos instalados alimentan a más de un sector en estudio, con lo cual fue posible generalizar la información pluviométrica obtenida para el total de sectores por provincia, a través de la determinación de las áreas de influencia de cada pluviógrafo, cuyos resultados son presentados en el siguiente punto.

4.2.1 Determinación de las áreas de influencia de cada pluviógrafo

La aplicación del método de los polígonos de Thiessen, se encuentra incluida en el software de libre distribución GeoDa™. En la figura 20, se presenta la salida que entregó el software de los polígonos o áreas de influencia para cada pluviógrafo instalado en la región (expresada en coordenadas UTM). De esta manera, los sectores marcados con el signo “+” y ordenados por letras (desde A hasta R), representan los pluviógrafos instalados y a su vez, los sectores marcados con el signo “●” y ordenados con números (desde 1 a 12), representan los sectores que no poseen pluviógrafo, completando de esta forma los 30 sectores en estudio.



Sectores sin información pluviométrica					
	Sector		Sector		Sector
1	El Chacay	5	Alcones	9	Agua Fría
2	Quitallaco	6	Cogotí	10	Tumba Norte
3	Tangue N°2	7	El Espinal	11	Carquindaño
4	Qda. Talca	8	La Coipa	12	Yerba Loca
Sectores con pluviógrafos					
	Pluviógrafo		Pluviógrafo		Pluviógrafo
A	Caldera y Damas	G	Barraza	M	Huanque
B	Qda. Honda	H	El Sauce	N	Las Chinchillas
C	Las Cardas	I	Fray Jorge	O	El Chilcal
D	Tangue N°1	J	La Rinconada	P	Atelcura
E	El Tambo	K	Romeralsillo	Q	Cañas de Choapa
F	Gualliguaica	L	Pichasca	R	Caracas Los Vilos

Figura 20. Polígonos de Thiessen para los pluviógrafos en estudio

En el mismo contexto anterior, la tabla 5 presenta los pluviógrafos, los sectores que éstos alimentan y la codificación que asocia a ambas ubicaciones en el plano

Provincia	Sector de estudio	Sectores que alimenta	Código asociado
Elquí	Caldera y Damas	Caldera y Damas	A
	Qda. Honda	Qda. Honda	B
		El Chacay	B1
	Las Cardas	Las Cardas	C
		Quitallaco	C2
	Tangue N° 1	Tangue N° 1	D
		Tangue N° 2	D3
	El Tambo	El Tambo	E
	Gualiguaica	Gualiguaica	F
		Quebrada Talca	F4
Limarí	Barraza	Barraza	G
		Alcones	G5
		El Espinal	G7
	El Sauce	El Sauce	H
		Cogotí 18	H6
	Fray Jorge	Fray Jorge	I
	La Rinconada	La Rinconada	J
	Romeralsillo	Romeralsillo	K
		La Coipa	K8
	Pichasca	Pichasca	L
Choapa	Huanque	Huanque	M
	Las Chinchillas	Las Chinchillas	N
	El Chilcal	El Chilcal	O
		Yerba Loca	O12
	Atelcura	Atelcura	P
		Agua Fría	P9
		Tunga Norte	P10
		Carquindaño	P11
	Cañas del Choapa	Cañas del Choapa	Q
Caracas Los Vilos	Caracas Los Vilos	R	

Tabla 5. Resultados de la aplicación de los polígonos de Thiessen, para determinar las áreas de influencia de cada pluviógrafo

Por otra parte es importante mencionar que la determinación de áreas de influencia, implicó que dos o más sectores fueran representados por el mismo valor de alguna de las variables pluviométricas calculadas. Dicho de otra forma, un valor pluviométrico puede representar a más de un sector, no obstante, con las variables

4.2.2. Resultados pluviométricos para las provincias de Elqui, Limarí y Choapa

El análisis pluviométrico fue desarrollado en base al total de tormentas producidas en cada uno de los sectores analizados en las provincias de Elqui, Limarí y Choapa. En la tabla 6 se presenta el número de tormentas ocurridas por año y provincia, en donde se observa que durante el período 2007-2009 se analizaron un total de 115 tormentas para la Región de

Coquimbo. En el mismo sentido, el mayor número de tormentas para dicha región ocurrió durante el año 2008, en donde se analizaron un total de 53 eventos de precipitación.

A nivel provincial se observó que Limarí presentó el menor número de tormentas durante el período 2007-2009, con un total de 35 eventos. Por su parte, las provincias de Elqui y Choapa presentaron el mismo número de tormentas analizadas, con un total de 40 eventos de precipitación.

Año	Número de tormentas analizadas por Provincia			Total
	Elqui	Limarí	Choapa	Regional
2007	12	7	11	30
2008	17	19	17	53
2009	11	9	12	32
Total Provincial	40	35	40	115

Tabla 6. Número de Tormentas analizadas durante el período 2007-2009

Por otra parte, es importante señalar que el análisis de las variables pluviométricas fue abordado preliminarmente mediante la información de promedios, tanto regionales como provinciales, (años 2007, 2008 y 2009). También se realizó un análisis de los valores máximos por tormenta, en términos de monto e intensidad de precipitación durante los años 2007, 2008 y 2009 en las provincias de Elqui, Limarí y Choapa.

En la tabla 7, se presentan los resultados promedio de las variables pluviométricas consideradas, a saber MTpp (monto total de precipitación de la tormenta en mm); IT (intensidad promedio de la tormenta en mm/h); e lmax1h (intensidad máxima de la tormenta en una hora en mm/h), tanto para la Región de Coquimbo como para las provincias de Elqui, Limarí y Choapa. Como se mencionó anteriormente, dichas variables fueron obtenidas luego de la selección y caracterización de tormentas registradas por los pluviógrafos.

Año	Variables Pluviométricas	Provincia			Promedio Regional
		Elqui	Limarí	Choapa	
2007	MTpp (mm)	8,05	11,97	20,80	13,61
	IT (mm/h)	4,41	0,81	1,15	2,12
	lmax1h (mm/h)	19,46	3,28	6,50	9,74
2008	MTpp (mm)	34,37	21,97	42,05	32,80
	IT (mm/h)	2,39	2,67	1,39	2,15
	lmax1h (mm/h)	8,81	16,34	21,33	15,49
2009	MTpp (mm)	19,04	15,20	37,01	23,75
	IT (mm/h)	6,63	3,58	0,89	3,70
	lmax1h (mm/h)	32,54	17,54	11,45	20,51
Promedio Provincial	MTpp (mm)	20,49	16,38	33,29	23,39
	IT (mm/h)	4,48	2,35	1,14	2,66
	lmax1h (mm/h)	20,27	12,39	13,09	15,25

Tabla 7. Síntesis de los resultados de las variables pluviométricas por provincia. MTpp (monto total de precipitación de la tormenta); IT (intensidad promedio de la tormenta); lmax1h (intensidad máxima de la tormenta en una hora)

A contar de la información presentada en la tabla 7, se puede señalar que **el monto total de precipitación por tormenta (MTpp)** para la Región de Coquimbo, fue mayor durante el año 2008, registrándose en promedio 32,8 mm por tormenta. En sentido contrario, el año 2007 fue el que presentó los valores de MTpp promedio más bajos para la región, registrándose 13,61 mm por tormenta.

En el contexto anterior se puede señalar que la provincia que tuvo un mayor monto total de lluvia por tormenta o evento de precipitación, en el total del periodo estudiado (2007-2009), fue Choapa, con un promedio para la provincia de 33,29 mm por tormenta. Por su parte, Limarí fue la que presentó el menor valor del monto de precipitaciones por tormenta para el mismo período, con un promedio provincial de 16,38 mm por tormenta, en tanto que la provincia de Elqui presentó un valor promedio por tormenta de 20,49 mm. También es importante señalar que en el año 2007, fue la provincia de Elqui la que presentó el menor valor del monto de precipitaciones por tormenta; sin embargo, durante el año 2008 el MTpp de dicha provincia superó ampliamente al de Limarí y en el año 2009 ocurrió lo mismo pero en menor medida, lo cual denota la variabilidad pluviométrica en zonas áridas y semiáridas. De esta forma, el año 2008 sube el promedio para la provincia de Elqui, situación que deja a Limarí con un menor MTpp durante el período 2007-2009 (Tabla 7).

Al realizar un análisis considerando la tormenta con mayor monto total de precipitación para cada provincia, durante el período 2007-2009, se observa que el MTpp por tormenta tiene un comportamiento similar entre las provincias de Elqui y Limarí, pero la provincia de Choapa se diferencia de las anteriores por presentar un monto de precipitación mucho más alto, que incluso durante el período 2007-2009 duplica e inclusive llega a superar hasta en cinco veces los valores encontrados en las provincias restantes (Figura 21).

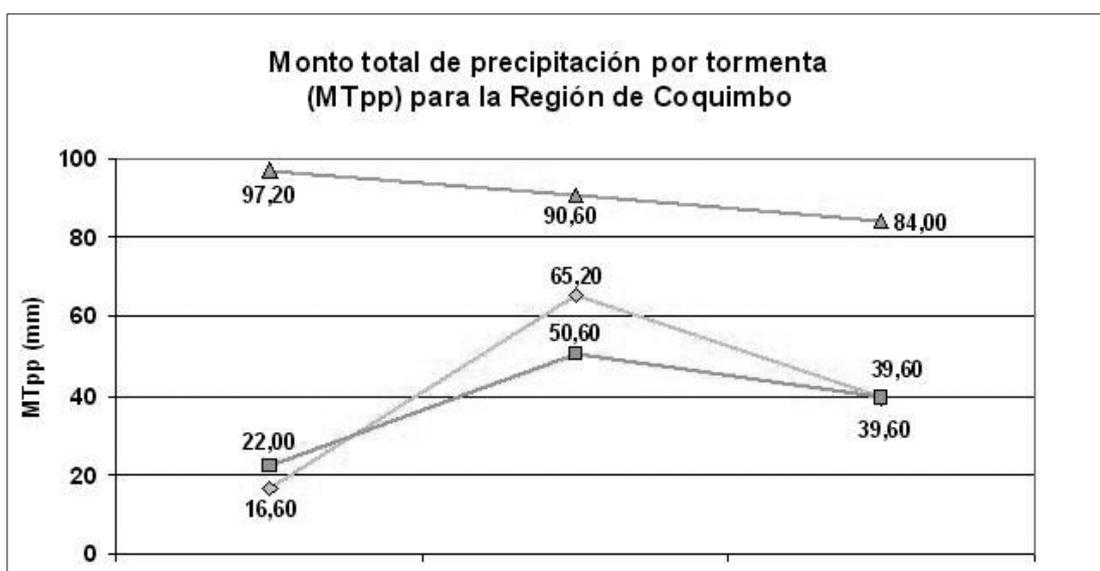


Figura 21. Monto total máximo de precipitación por tormenta, para los años 2007, 2008 y 2009 en las provincias de Elqui, Limarí y Choapa.

Por otra parte y según el análisis de la tabla 7, respecto de la **intensidad promedio de precipitaciones por tormenta (IT)** para el período 2007-2009, en la Región de Coquimbo se observa que el año 2009 es el que ha presentado los valores más altos de intensidad, con un valor regional de 3,70 mm/h, el cual casi duplica a los valores encontrados en los años 2007 y 2008.

También es importante señalar que el comportamiento de la intensidad promedio de precipitaciones por tormenta, para cada una de las provincias analizadas, es totalmente distinto respecto a lo sucedido con el monto total de precipitaciones. Si bien, la provincia de Choapa fue la que presentó el mayor MTpp, su intensidad promedio por tormenta (IT) es la menor de las tres provincias, tanto en términos de promedio provincial (período 2007 a 2009), así como en sus valores anuales, donde se observa que sólo en el año 2007, dicha provincia supera en su valor de IT a la provincia de Limarí.

Por su parte, la provincia de Elqui fue la que presentó los mayores valores de IT (promedio provincial de 4,48 mm/h para el período considerado), sobre todo en el año 2009, en donde se observa que los valores promedio de intensidad por tormenta superan hasta en más dos veces, tanto a los valores de las provincias restantes, como a los valores encontrados en esta misma provincia durante los años 2007 y 2008.

En el figura 22, se presenta el comportamiento anual de las provincias, en base a la tormenta más intensa registrada en cada año y ello como promedio de cada tormenta. Con esto se puede ratificar que la provincia de Elqui presentó las tormentas de mayor intensidad (año 2007 y año 2009), superada levemente sólo en el año 2008 por la provincia de Limarí, lo que habla de la alta variabilidad de los componentes climáticos en zonas áridas y semiáridas.

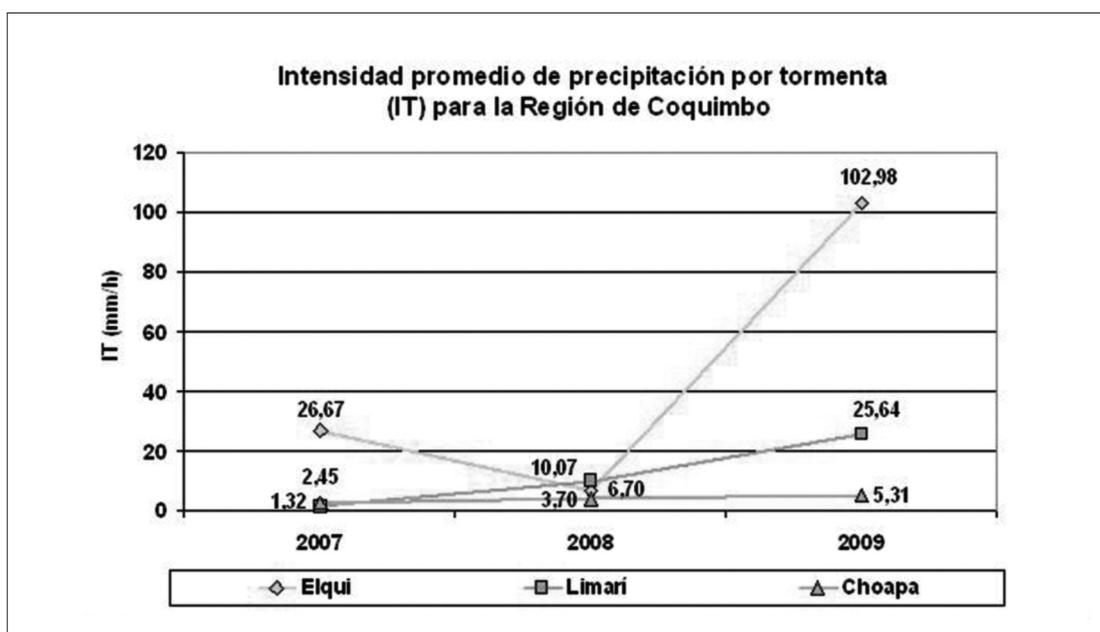


Figura 22. Valores Máximos de la variable Intensidad promedio de la tormenta, para las provincias de Elqui, Limarí y Choapa.

De igual forma y siguiendo con el análisis de las tormentas con mayor intensidad por provincia, se evidencia que la provincia de Elqui, es la que presenta los eventos de precipitación más intensos, llegando incluso a superar hasta en 20 veces a la provincia de Choapa y hasta en 4 veces a la provincia de Limarí durante el año 2009. Asimismo, es importante destacar que los altos montos de intensidad promedio, corresponden a chubascos intensos, caídos en lapsos muy pequeños, lo que determina que al llevarlos desde un tiempo bajo al tiempo de caída del total del evento, definen una intensidad promedio extraordinariamente alta, lo cual nunca se

produce, porque es imposible que se mantenga esa intensidad de lluvia por un lapso superior a unos pocos minutos.

En el mismo contexto, pero al analizar la **intensidad máxima de la tormenta en una hora (Imax1h)**, como valor promedio para la Región de Coquimbo, se observa un aumento desde el año 2007, con un valor promedio por tormenta de 9,74 mm/h. Luego en el año 2008 dicho valor se incrementó a 15,49 mm/h. Finalmente, en el año 2009, se alcanzó un valor promedio por tormenta para la Región de Coquimbo de 20,51 mm/h. De esta forma, se observó que el año 2009 fue el que presentó las tormentas más intensas, al igual que lo ocurrido con los valores de intensidad promedio de la tormenta (IT) (Tabla 7).

De la información de la tabla 7, se observa que es la provincia de Limarí la que presenta el menor valor promedio de intensidad, en este caso para la variable Imax1h (12,39 mm/h.). Por el contrario, el mayor valor de Imax1h lo presentó la provincia de Elqui con 20,27 mm/h. Todo esto considerando desde el año 2007 al 2009.

Mediante el análisis de los valores extremos de la intensidad máxima en una hora para las tormentas seleccionadas, se puede señalar que en la provincia de Elqui el valor más bajo fue registrado durante el año 2008 y el más alto fue registrado durante el 2009. Esta situación es totalmente distinta a lo ocurrido en las provincias de Limarí y Choapa, dado que el valor más bajo fue registrado durante el año 2007 y el valor más alto fue registrado durante el 2008 (Figura 23).

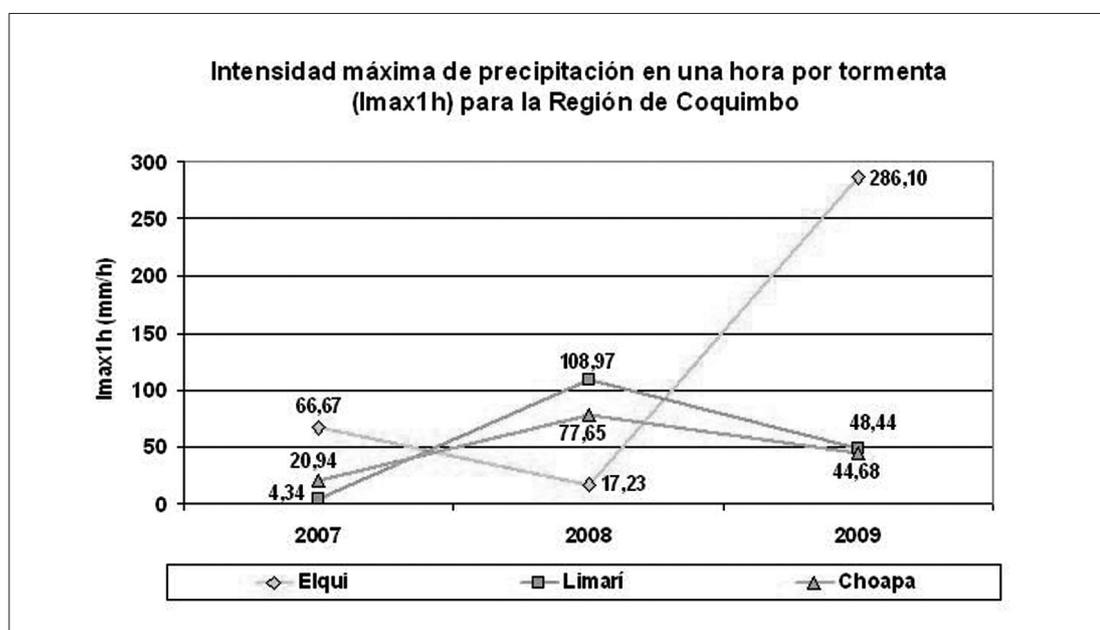


Figura 23. Valores Máximos por año de la variable Intensidad de la tormenta en una hora, para las provincias de Elqui, Limarí y Choapa.

Nuevamente llama la atención el alto valor de la intensidad de precipitación en una hora, pero ello es producto de que los pluviógrafos digitales pueden estimar intensidades en lapsos pequeños, menores a una hora. Por tanto, si cae una intensidad de 10 mm en 5 minutos y este valor se extrapola a la hora, se encuentra un valor de la intensidad horaria de 120 mm/h, valor que supera con creces los 24 mm/h, valor máximo capturado en los pluviogramas de la estación La Paloma en la Región de Coquimbo. (Pizarro et al, 2008).

También se puede agregar que en el año 2008 los valores máximos de la variable I_{max1h} encontrados en las provincias de Limarí y Choapa, superaron en más de cuatro veces al valor de 17,23 mm/h registrado en la provincia de Elqui. Sin embargo, en los años 2007 y 2009, la situación cambia radicalmente, dado que en dichos años Elqui triplicó los valores encontrados en Limarí y Choapa durante el 2007 y también superó en más de cuatro veces a los valores encontrados en dichas provincias durante el año 2008. Esta situación denota la alta variabilidad de los fenómenos pluviométricos en la Región de Coquimbo.

4.3 RESULTADOS DE LOS PROCESOS EROSIVOS

En la tabla 8 se muestran los resultados promedio para cada año, los cuales corresponden a la suma de las erosiones anuales ocurridas por sector, dividida por el número de tormentas o eventos de lluvia de los procesos erosivos. Dichos resultados son presentados en ton/ha, tanto a nivel provincial como regional.

Año	Proceso Erosivo	Provincia			Promedio Regional
		Elqui	Limarí	Choapa	
2007	E (ton/ha)	5,81	4,75	2,96	4,51
	S (ton/ha)	2,47	2,31	3,55	2,77
	EN (ton/ha)	3,34	2,44	-0,59	1,73
	SM (ton/ha)	8,28	7,06	6,51	7,28
2008	E (ton/ha)	3,67	4,75	4,32	4,25
	S (ton/ha)	2,27	2,84	1,46	2,19
	EN (ton/ha)	1,40	1,91	2,86	2,06
	SM (ton/ha)	5,94	7,59	5,79	6,44
2009	E (ton/ha)	4,78	6,62	5,86	5,75
	S (ton/ha)	1,12	1,02	1,39	1,18
	EN (ton/ha)	3,66	5,60	4,47	4,58
	SM (ton/ha)	5,90	7,64	7,25	6,93
Promedio Provincial	E (ton/ha)	4,75	5,37	4,38	4,84
	S (ton/ha)	1,95	2,06	2,14	2,05
	EN (ton/ha)	2,80	3,32	2,25	2,79
	SM (ton/ha)	6,70	7,43	6,52	6,88

Tabla 8. Síntesis de los resultados de los procesos erosivos por provincia
E: Erosión; S: Sedimentación; En: Erosión neta; SM: Suelo movilizado.

De la tabla anterior se desprende que el **proceso de erosión** ha sido mayor durante el año 2009, con un valor promedio regional de erosión de 5,75 ton/ha, el cual supera en aproximadamente 1,5 ton/ha a los valores encontrados en los años 2007 y 2008, correspondientes a 4,51 y 4,25 ton/ha, respectivamente.

También es importante mencionar que durante el año 2007, los suelos de los sectores de la provincia de Elqui se erosionaron en 5,81 ton/ha, como valor medio de las parcelas existentes en esta provincia, siendo ésta la que presentó el mayor valor de erosión en dicho año, superando a la provincia de Limarí (4,75 ton/ha) y también sobrepasando en más de dos veces el valor encontrado en la provincia de Choapa (2,96 ton/ha). Durante los años 2008 y 2009 la provincia de Limarí presentó los mayores valores de erosión de la región (4,75 y 6,62 ton/ha, respectivamente). Por su parte, la provincia de Elqui presentó valores de erosión del suelo de 3,67 y 4,78 ton/ha, considerando los mismos años, siendo éstos, los valores promedio más bajos encontrados en la región durante el período 2008-2009. Lo anterior da cuenta nuevamente de la variabilidad que denotan las zonas áridas y semiáridas, en lo que respecta a los procesos precipitación-escorrentía.

Al analizar los valores promedio de erosión por provincia, para el período total de estudio (2007-2009) se observó que la provincia de Limarí presentó el mayor valor, correspondiente a 5,37 ton/ha; en segundo lugar se ubicó la provincia de Elqui con 4,75 ton/ha y finalmente Choapa con 4,38 ton/ha. Esto es particularmente importante, porque estos resultados llevaron a la determinación de construir modelos predictivos de erosión, por cada provincia administrativa, derivado que no en toda la Región de Coquimbo se presentaba el fenómeno erosivo con similares magnitudes ni relaciones.

Por otra parte, se verificó que en las tres provincias estudiadas el proceso de erosión ha tenido un aumento entre los años 2008 y 2009. Sin embargo, en la provincia de Choapa dicha tendencia al aumento de la erosión se ha observado desde el año 2007 hasta el 2009.

Con respecto al **proceso de sedimentación**, se observa que en términos anuales, el año 2007 fue el que presentó el mayor valor promedio regional (2,77 ton/ha); asimismo, se ha observado una disminución sostenida desde el año 2007 hasta el 2009, observándose que este último año presentó un valor promedio regional de sedimentación de 1,18 ton /ha, lo cual se explicaría por la mayor presencia de fenómenos erosivos, derivados de los montos mayores de lluvias registrados y de las intensidades de lluvia más altas.

Considerando el período 2007 a 2009, se denota que la provincia que tuvo un mayor promedio de sedimentación fue Choapa (2,14 ton/ha), seguida por Limarí (2,06 ton/ha) y finalmente Elqui con un total de 1,95 ton/ha. En el mismo sentido, se puede agregar que se ha observado en las tres provincias una disminución de la sedimentación en los años 2008 a 2009; sin embargo en las provincias de Elqui y Limarí, dicho proceso ha disminuido a prácticamente la mitad del valor encontrado en los años 2007 y 2008, lo cual se condice con el incremento de los fenómenos de erosión en igual periodo.

Al referirse a la **erosión neta**, cabe recordar que este proceso es el resultado de la diferencia (resta) entre la erosión y la sedimentación; así se puede señalar que la erosión neta tuvo un resultado negativo en la provincia de Choapa durante el año 2007, en donde el proceso de erosión fue superado por la sedimentación, resultando una erosión neta de -0,59 ton/ha. Sin embargo, en los años 2008 y 2009 la erosión neta muestra sólo valores positivos para las tres provincias, lo cual indica que la erosión fue mayor que la sedimentación, derivado de las razones expresadas anteriormente.

En términos regionales y a contar de la información otorgada por la tabla 8, se verifica que los valores promedio de erosión neta, han aumentado desde el año 2007 hasta el 2009, con valores para la región que van desde 1,73 ton/ha hasta 4,58 ton/ha, respectivamente.

En términos provinciales se observa que Limarí tiene el mayor promedio de erosión neta

durante el período 2007-2009, con un valor de 3,32 ton/ha; en segundo lugar se ubicó la provincia de Elqui con 2,80 ton/ha y, finalmente, Choapa con 2,25 ton/ha. En el mismo sentido, es importante mencionar que en las tres provincias se ha observado un aumento de la erosión neta durante los últimos dos años (2008 y 2009); sin embargo, en la provincia de Choapa, dicho fenómeno se ha observado desde el año 2007 hasta el 2009, lo cual se correlaciona con lo que ha ocurrido con la erosión en igual periodo.

Con respecto a la cantidad de **suelo movilizado** en la Región de Coquimbo, el año 2007 fue el que presentó el mayor valor promedio regional, correspondiente a 7,28 ton/ha. El 2008 por su parte, presentó un promedio regional de 6,44 ton/ha (valor más bajo del período) y el año 2009 tuvo un promedio regional de 6,93 ton/ha.

La provincia con mayor cantidad de suelo movilizado durante el año 2007 fue Elqui (8,28 ton/ha), seguida por las provincias de Limarí y Choapa, las cuales fueron cercanas en sus valores promedio de suelo movilizado (7,06 y 6,51 ton/ha respectivamente). Sin embargo, durante los años 2008 y 2009, la provincia con mayor cantidad de suelo movilizado fue Limarí, con valores de 7,59 y 7,64 ton/ha.

Al considerar el período 2007-2009, se observa que Limarí tiene el mayor promedio de suelo movilizado, cuyo valor alcanza las 7,43 ton/ha. En segundo lugar se encontró la provincia de Elqui con un valor promedio de 6,70 ton/ha y, finalmente, Choapa con un valor de 6,52 ton/ha. Al respecto debe señalarse que la explicación a las altas tasas de erosión en general de Elqui, y esto con respecto a las otras provincias, estaría relacionado con la presencia de una vegetación casi inexistente, con una escasa presencia de raíces de todo tipo en el suelo, y en donde montos de lluvia bajos generan procesos erosivos de mayor magnitud que en las otras provincias.

En el Figura 24 se presenta el comportamiento anual de los procesos erosivos, para las provincias de Elqui, Limarí y Choapa.

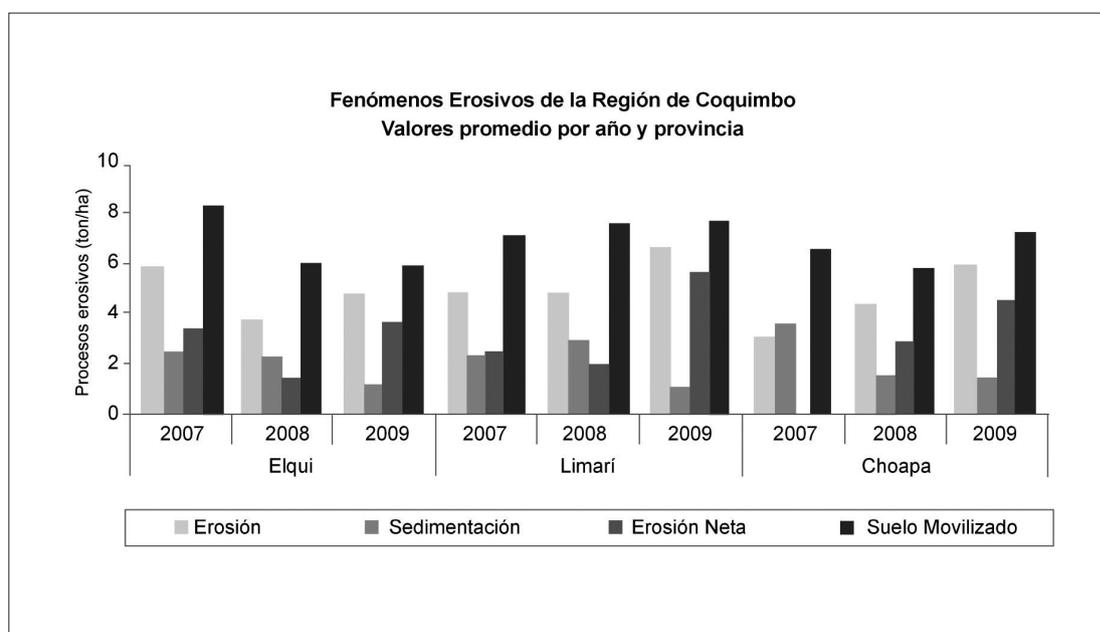


Figura 24. Comportamiento de las variables del proceso erosivo, para el período 2007-2009, en la Región de Coquimbo.

4.4 RELACION ENTRE LAS VARIABLES PLUVIOMÉTRICAS Y LAS VARIABLES DE LOS PROCESOS EROSIVOS

La relación entre las variables pluviométricas (MTpp, IT y I_{max1h}) y las variables del proceso erosivo (E, S, EN y SM), fue analizada mediante la elaboración de gráficas de dispersión (período 2007 a 2009). Con esto se logró conocer la relación entre las variables consideradas, lo cual permitió llevar a cabo el desarrollo de los modelos matemáticos. Es importante señalar que el resultado esperable al relacionar las variables pluviométricas con las variables del proceso erosivo, es que dicha relación sea positiva, lo cual quiere decir que a mayor valor de la variable pluviométrica, se espera un mayor valor del proceso erosivo, aunque también es esperable alcanzar relaciones inversas con respecto a la erosión neta, dado que es producto de una diferencia numérica, que en ocasiones puede ser negativa.

Provincia	Variables del Proceso Erosivo	MTpp	IT	I _{max1h}
Elqui	E	-	+	+
	S	+	-	-
	En	-	+	+
	Sm	-	-	-
Limarí	E	-	+	+
	S	+	+	-
	En	-	-	+
	Sm	+	+	+
Choapa	E	+	+	+
	S	+	+	+
	En	+	+	+
	Sm	+	+	+

Tabla 9. Tipo de relación gráfica entre las variables pluviométricas y las variables del proceso erosivo
E: Erosión; S: Sedimentación; En: Erosión neta; Sm: Suelo movilizado

Del cuadro anterior se desprende que la provincia de Choapa presentó la mayor cantidad de relaciones positivas entre las variables consideradas, con 12 relaciones positivas de un total de 12 analizadas (100%); en segundo lugar se ubicó la provincia de Limarí con 8 relaciones positivas de un total de 12 (alrededor de un 67%). Elqui fue la provincia que presentó una menor cantidad de relaciones positivas (5 de 12), y éstas se encontraron, principalmente, entre las variables del proceso erosivo y las variables IT e I_{max1h}.

En los puntos que vienen a continuación se presentan los resultados provinciales de las relaciones antes mencionadas, entre las variables pluviométricas y las variables del proceso erosivo.

4.4.1 Provincia de Elqui

Los resultados evidenciaron relaciones disímiles entre las variables consideradas, encontrándose situaciones poco lógicas, principalmente en la Provincia de Elqui, en donde la precipitación total caída por tormenta (MTpp), por ejemplo, no se relaciona en términos físicos con la erosión, la erosión neta y el suelo movilizado, dado que se verifica en la tendencia general, que a mayor precipitación, menor es el valor de las variables mencionadas. Es decir, la nube de puntos de la Figura, muestra una tendencia inversa (figura 25).

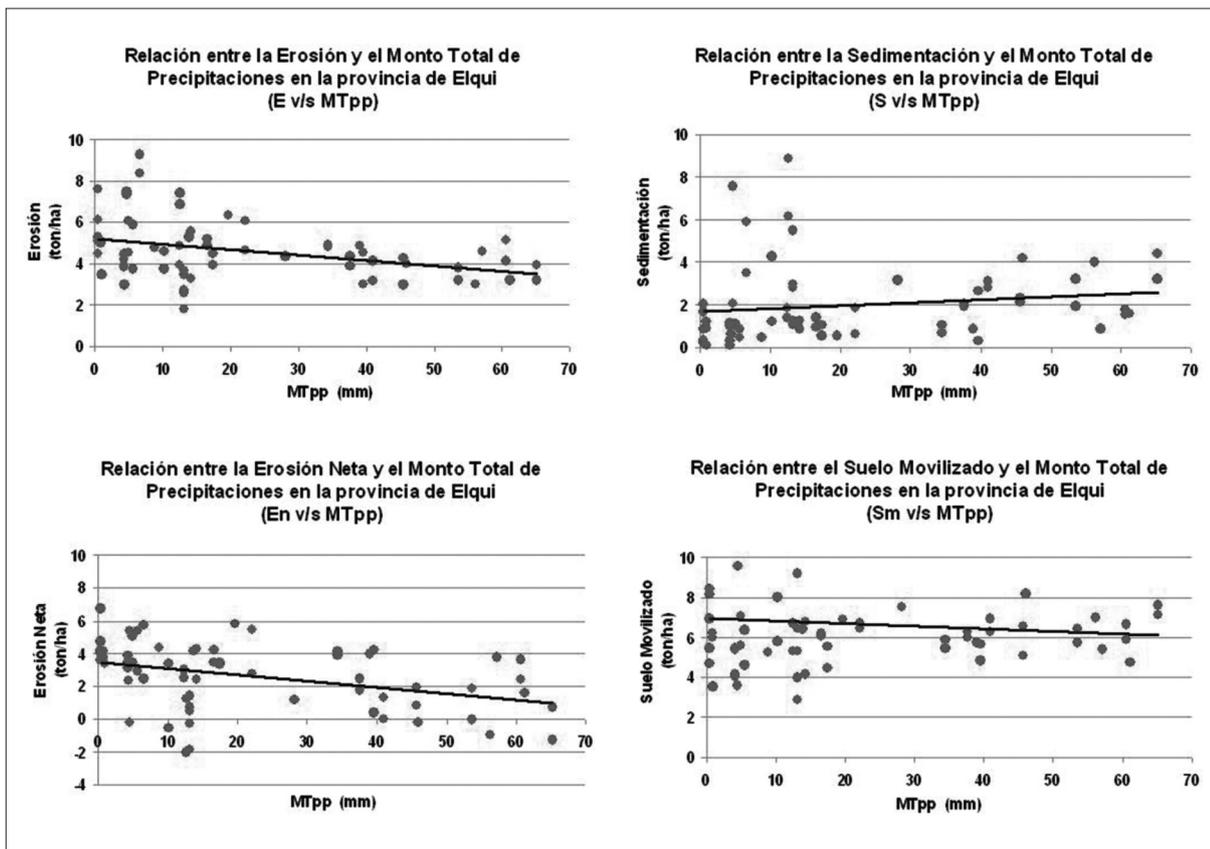


Figura 25. Relación entre las Variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm) y el Monto total de precipitaciones por tormenta (MTpp) en la provincia de Elqui.

La figura anterior deja de manifiesto que la relación entre la sedimentación (S) y el monto total de precipitación por tormenta (MTpp), es la única relación positiva para esta variable pluviométrica en la provincia de Elqui. De esta forma, la variable sedimentación puede tener un modelo de estimación basado en el MTpp; sin embargo, para las variables E, En y Sm se debe buscar alguna relación positiva con las variables pluviométricas restantes (IT e I_{max1h}), que permita el desarrollo de un modelo matemático de estimación.

La figura 26 permite analizar la relación entre las variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm) y la Intensidad promedio de precipitaciones por tormenta (IT) en la provincia de Elqui. Con esto, se observó que la variable pluviométrica IT, se relacionó de forma positiva sólo con las variables Erosión y Erosión Neta. Por su parte, la sedimentación y el suelo movilizado se relacionaron negativamente con la intensidad promedio por tormenta.

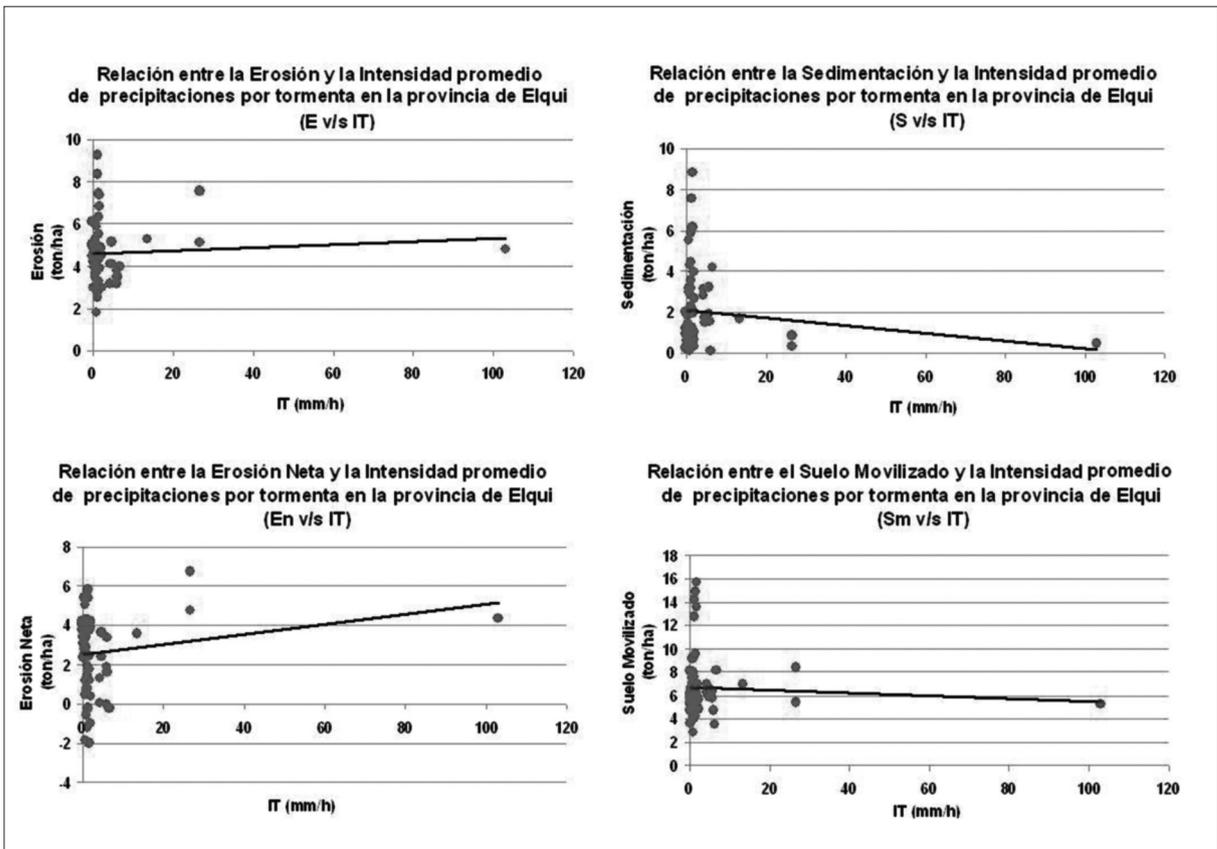


Figura 26. Relación entre las Variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm) y la Intensidad promedio de precipitaciones por tormenta (IT) en la provincia de Elqui.

De esta manera, se debe tener en consideración que para el desarrollo de un modelo de estimación de la erosión y la erosión neta, se puede depender de la variable pluviométrica intensidad promedio de la tormenta (IT), dada su relación antes mencionada. Obviamente, dicha variable pluviométrica no debe ser considerada en el desarrollo de un modelo de estimación para la sedimentación y el suelo movilizado, dado que presentan una relación incoherente.

Por otra parte, la variable intensidad máxima de precipitación de la tormenta en una hora (Imax1h), presentó el mismo comportamiento que la intensidad promedio por tormenta, relacionándose positivamente sólo con las variables erosión y erosión neta. Por su parte, la sedimentación y el suelo movilizado mostraron relaciones negativas con la variable Imax1h. En el mismo sentido es importante señalar que la mayor parte de la nube de puntos de las cuatro variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm), se ajustaron principalmente entre los 0 y 50 mm/h de intensidad máxima de precipitación por tormenta en una hora. Con esto, la tendencia quedó definida, básicamente, por los valores extremos encontrados en cada relación (figura 27).

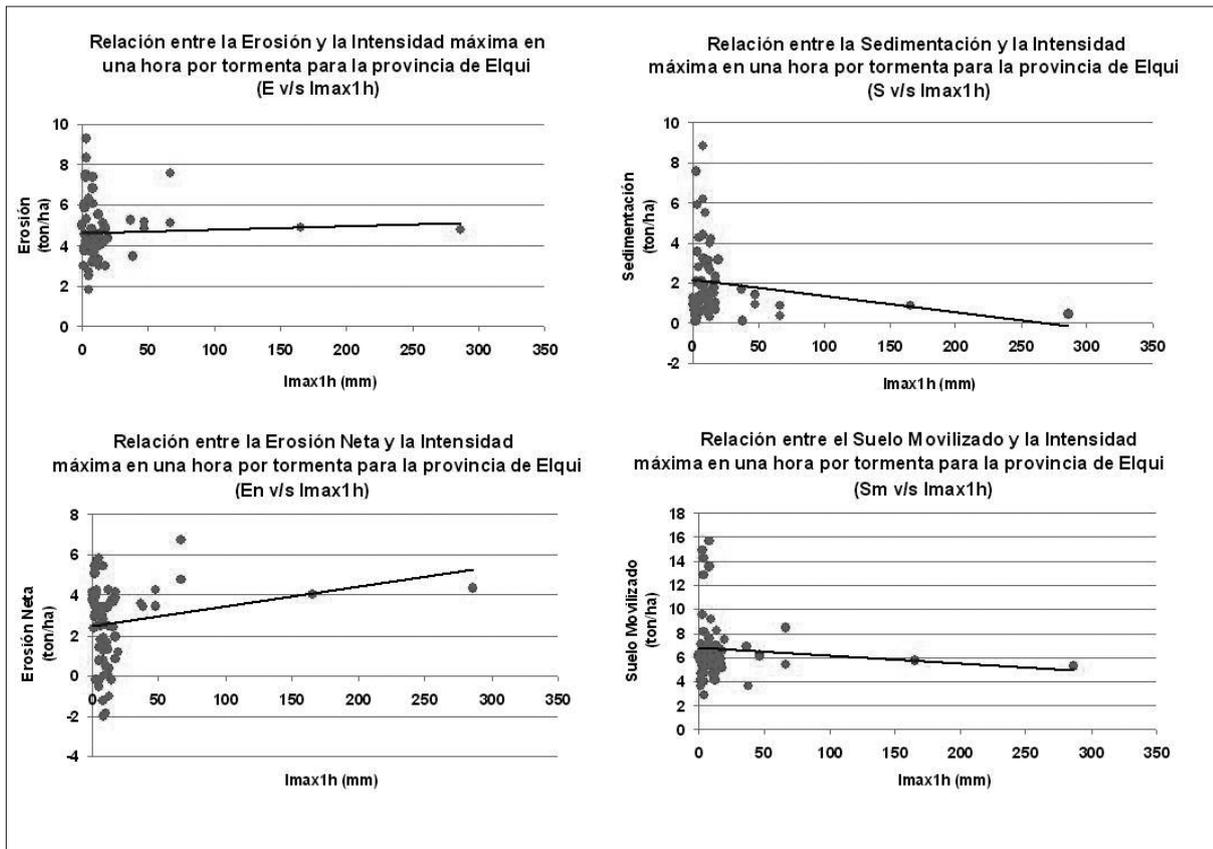


Figura 27. Relación entre las Variables del proceso erosivo (E, S, En y S_m) y la Intensidad máxima de precipitaciones en una hora por tormenta (I_{max1h}) en la provincia de Elqui.

En términos generales, es importante señalar que la variable suelo movilizado presentó relaciones negativas con todas las variables pluviométricas consideradas, con lo cual, no se puede desarrollar un modelo matemático de estimación para dicha variable. De esta forma, en la provincia de Elqui sólo se pueden desarrollar modelos de estimación para la erosión, la erosión neta y la sedimentación. Los dos primeros (E y En) basados, principalmente, en las variables IT e I_{max1h} , y la sedimentación basada, principalmente, en el MTpp.

Adicionalmente, es importante señalar que estas variabilidades son función de datos que todavía son insuficientes y, por lo tanto, obligan a hacer un esfuerzo extraordinario que permita establecer relaciones coherentes y lógicas desde una perspectiva física, matemática y estadística. Asimismo, las tendencias están definidas por pocos datos extremos los cuales es necesario incrementar. Por ello, el establecimiento de modelos matemáticos predictivos, debe ser un proceso cuidadoso en función de la información disponible.

4.4.2 Provincia de Limarí

Con respecto a la provincia de Limarí se observó que de las cuatro variables del proceso erosivo (E, En, S y S_m), sólo la erosión y la erosión neta mostraron una relación negativa con la variable pluviométrica MTpp, lo cual podría explicarse en función del predominio de la sedimentación sobre la erosión, en el caso de la erosión neta (figura 28).

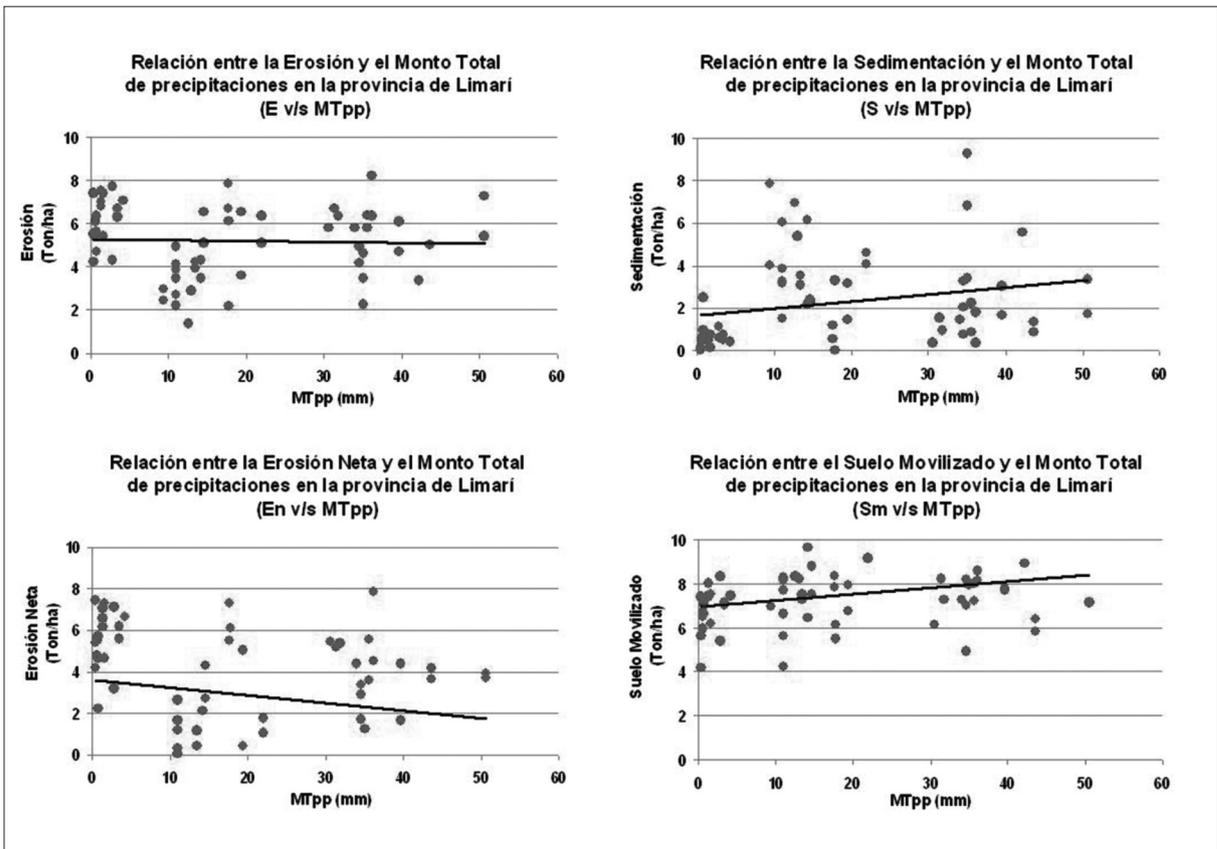


Figura 28. Relación entre las Variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm) y el Monto total de precipitaciones por tormenta (MTpp) en la provincia de Limarí.

En el contexto anterior, se puede mencionar que en la provincia de Limarí se pueden desarrollar modelos de estimación (basados en la variable pluviométrica MTpp), para las variables sedimentación y suelo movilizado, dado que presentaron relaciones positivas. Sin embargo de dichas relaciones positivas, la más ajustada fue la observada entre el Sm y el MTpp, con lo cual es factible pensar en la elaboración de un modelo de estimación para el suelo movilizado en base al monto total de precipitación por tormenta.

En la figura 29 se presenta la variable intensidad promedio de la tormenta (IT), la cual mostró relaciones positivas con las variables del proceso erosivo (E, S, y En) y sólo la erosión neta mostró una relación negativa con la IT. Asimismo, y para esta variable pluviométrica, la tendencia lineal (negativa o positiva) también quedó definida por los valores extremos encontrados en cada relación, ya que la nube de puntos se encontró, mayoritariamente, en el rango entre 0 y 5 mm/h de intensidad. De esta forma, la relación dependió, básicamente, del comportamiento de los valores extremos, los cuales superaron hasta en más de 5 veces a los valores observados en la nube de puntos.

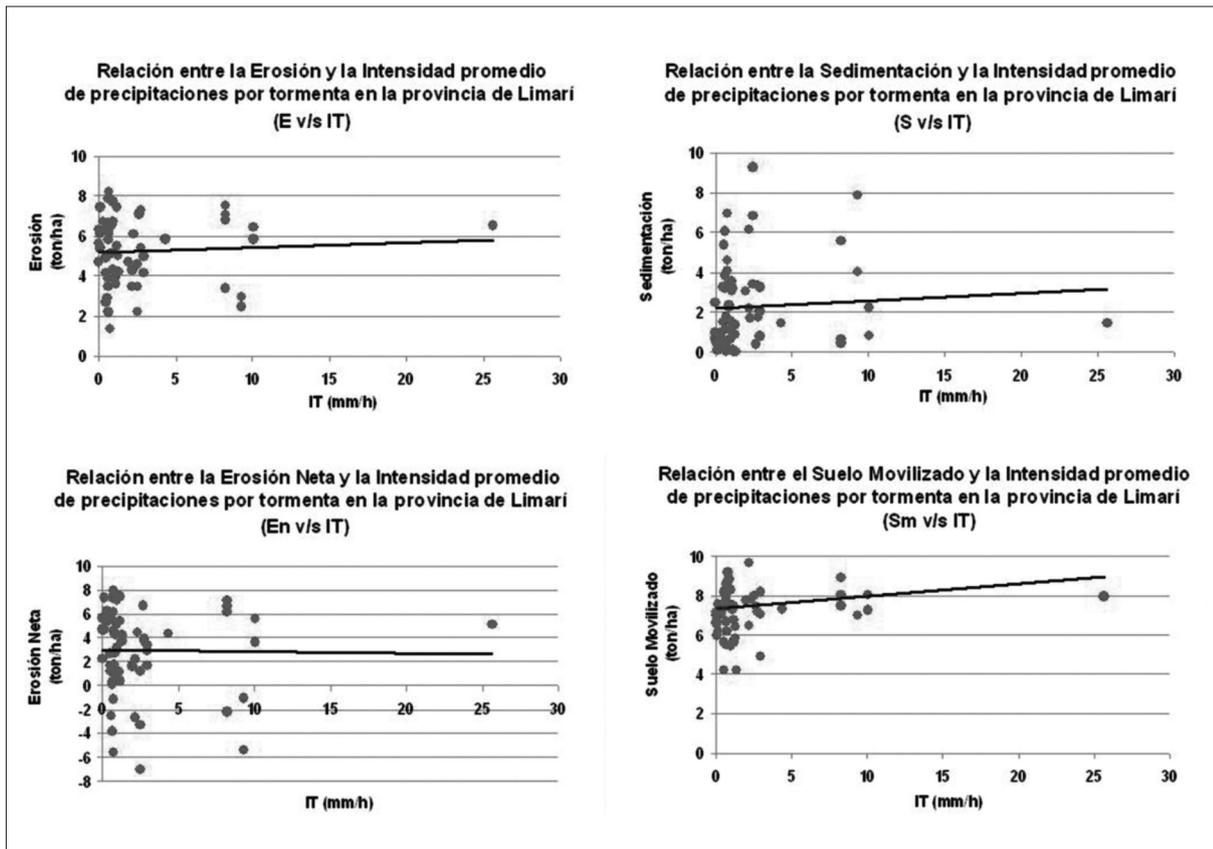


Figura 29. Relación entre las Variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm) y la Intensidad promedio de precipitaciones por tormenta (IT) en la provincia de Limarí.

De esta manera, se debe tener en consideración que para el desarrollo de un modelo de estimación de la erosión, la sedimentación y el suelo movilizado, se puede depender de la variable pluviométrica intensidad promedio de la tormenta (IT), dado su comportamiento ya descrito. También se puede agregar que dicha variable pluviométrica no debe ser considerada en el desarrollo de un modelo de estimación para la erosión neta, dado que presentaron una relación diferente a la esperada (relación negativa).

Por otra parte, la variable intensidad máxima de precipitación de la tormenta en una hora (I_{max1h}), se relacionó positivamente con las variables erosión, erosión neta y suelo movilizado. En el mismo contexto, la sedimentación mostró una relación negativa con la variable I_{max1h} . Dicha relación (negativa o positiva) de I_{max1h} y las variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm), también quedó definida por los valores extremos encontrados en cada relación (figura 30).

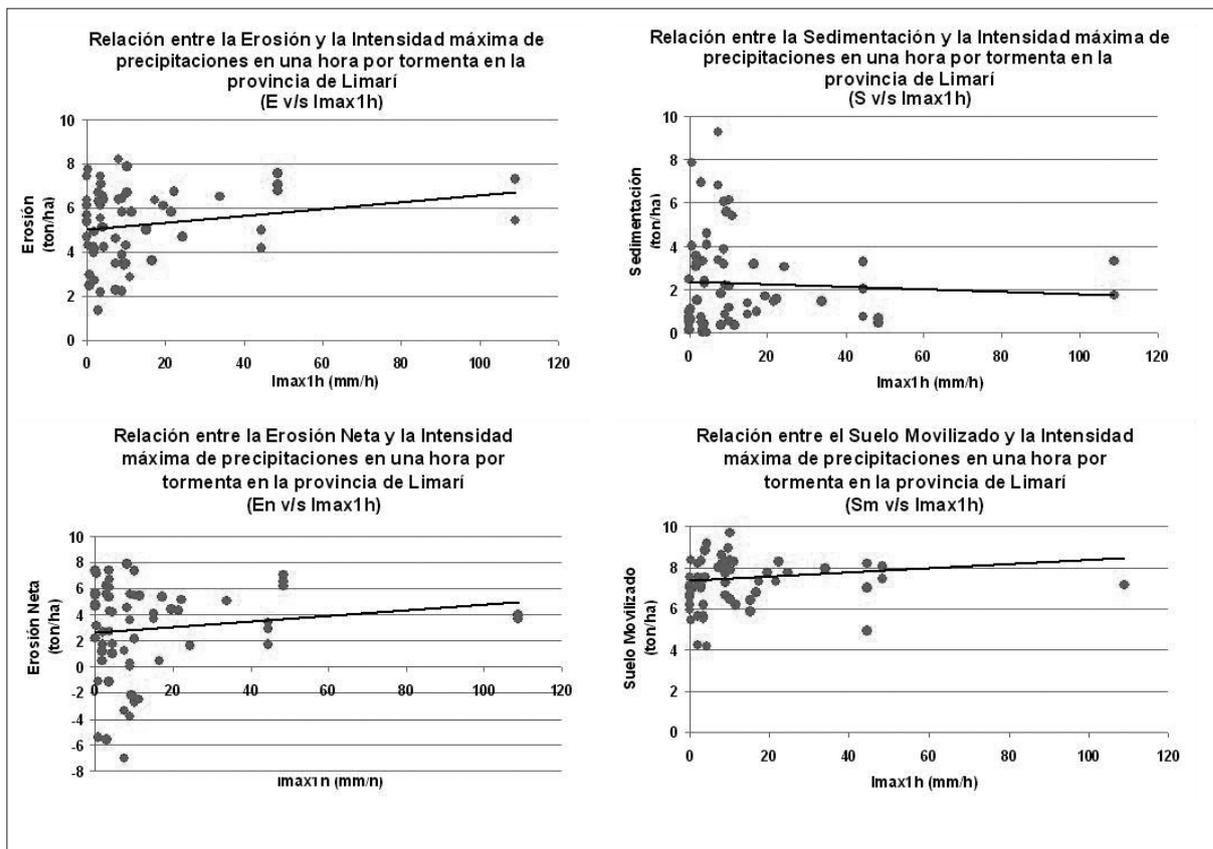


Figura 30. Relación entre las Variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm) y la Intensidad máxima de precipitaciones en una hora por tormenta (I_{max1h}) en la provincia de Limarí

El desarrollo de modelos matemáticos para la estimación de la erosión, la erosión neta y el suelo movilizado en la provincia de Limarí, puede depender de la variable pluviométrica I_{max1h} , dada su relación lineal positiva. En este contexto, es importante señalar que la erosión neta presentó una relación positiva sólo con esta variable pluviométrica, con lo cual, la confección de un modelo de estimación de la erosión neta en la provincia de Limarí debe considerar, exclusivamente, a la variable intensidad máxima de la tormenta en una hora (I_{max1h}).

4.4.3 Provincia de Choapa

En esta provincia, el monto total de precipitaciones por tormenta se relacionó positivamente con todas las variables (erosión, sedimentación, erosión neta y suelo movilizado) tal como se observa en la figura 31. En este sentido es relevante recordar que en esta provincia no se encontraron relaciones negativas entre las variables pluviométricas y las variables del proceso erosivo.

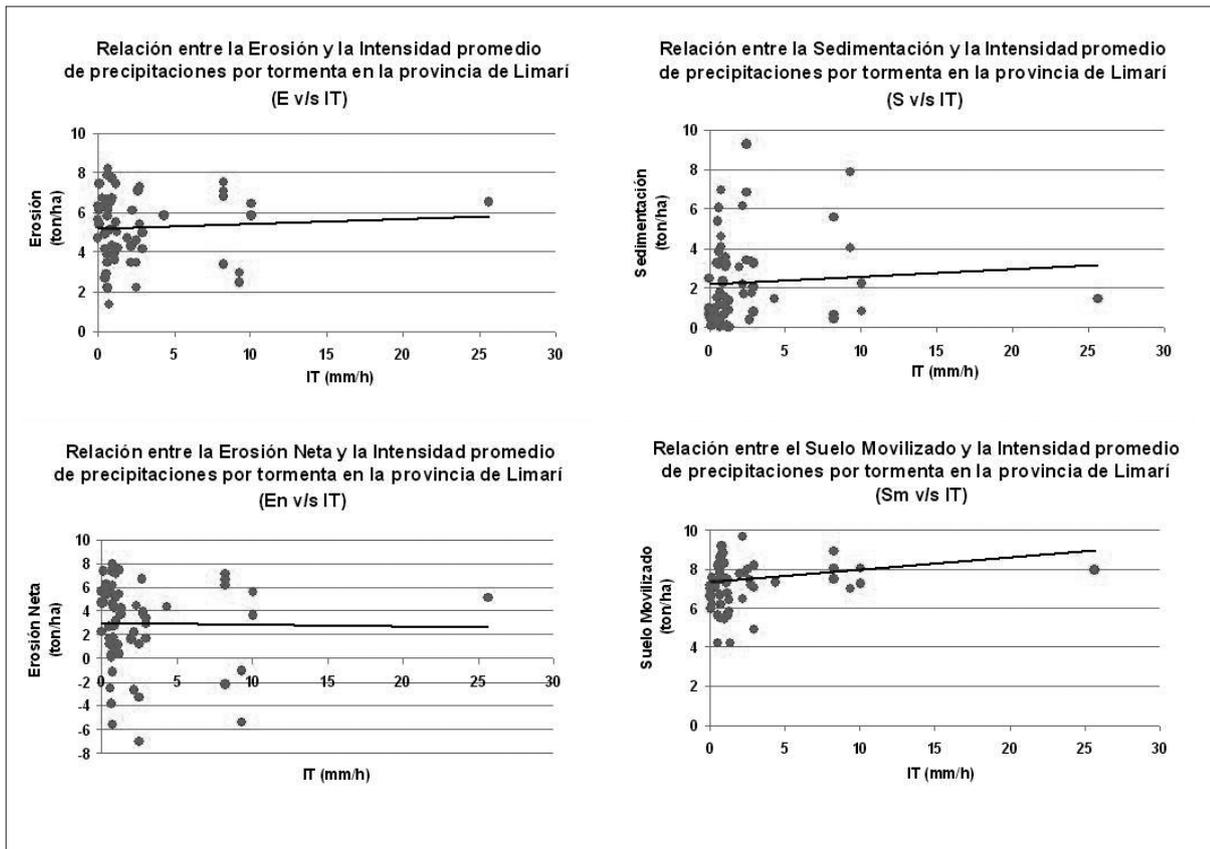


Figura 31. Relación entre las Variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm) y el Monto total de precipitaciones por tormenta (MTpp) en la provincia de Choapa.

Con lo anterior se puede señalar que el desarrollo de modelos matemáticos que consideren a la variable pluviométrica MTpp, serán aplicables para la estimación de las variables erosión, sedimentación, erosión neta y suelo movilizado; sin embargo, se puede agregar que la sedimentación no presentó una relación gráfica bien definida y es recomendable verificar su relación con las variables pluviométricas restantes, dado que la relación positiva presentada con el MTpp fue muy leve.

Con respecto a la relación entre las intensidades (IT e I_{max1h}) y las variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm), cabe señalar que en la provincia de Choapa se observaron sólo relaciones positivas entre las variables mencionadas, lo cual queda de manifiesto en las figuras 32 y 33. Además, esto indica que a mayor intensidad de la tormenta, ya sea promedio o máxima en una hora, mayores serán también los procesos erosivos.

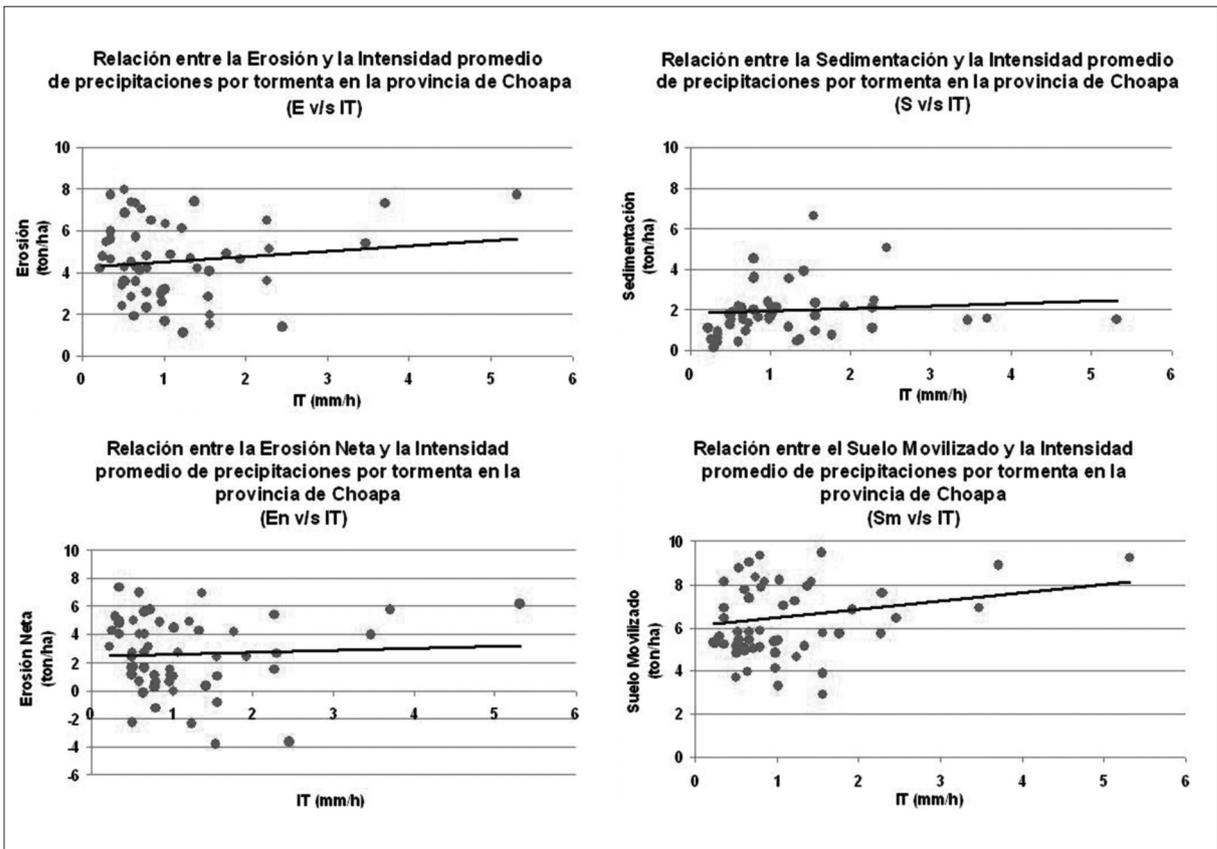


Figura 32. Relación entre las Variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm) y la Intensidad promedio de precipitaciones por tormenta (IT) en la provincia de Choapa.

En esta provincia se pueden desarrollar modelos de estimación de la erosión, la sedimentación, la erosión neta y el suelo movilizado, los cuales, pueden considerar a la variable pluviométrica IT en su confección, dado que dicha variable presentó relaciones positivas con todas las variables del proceso erosivo.

Como se mencionó anteriormente, la variable I_{max}1h presentó un comportamiento similar al de la IT, observándose sólo relaciones positivas entre las variables del proceso erosivo y la intensidad máxima por tormenta en una hora. Esta situación permite el desarrollo de modelos matemáticos de estimación de erosión, sedimentación, erosión neta o suelo movilizado, que involucren a la variable I_{max}1h en su expresión.

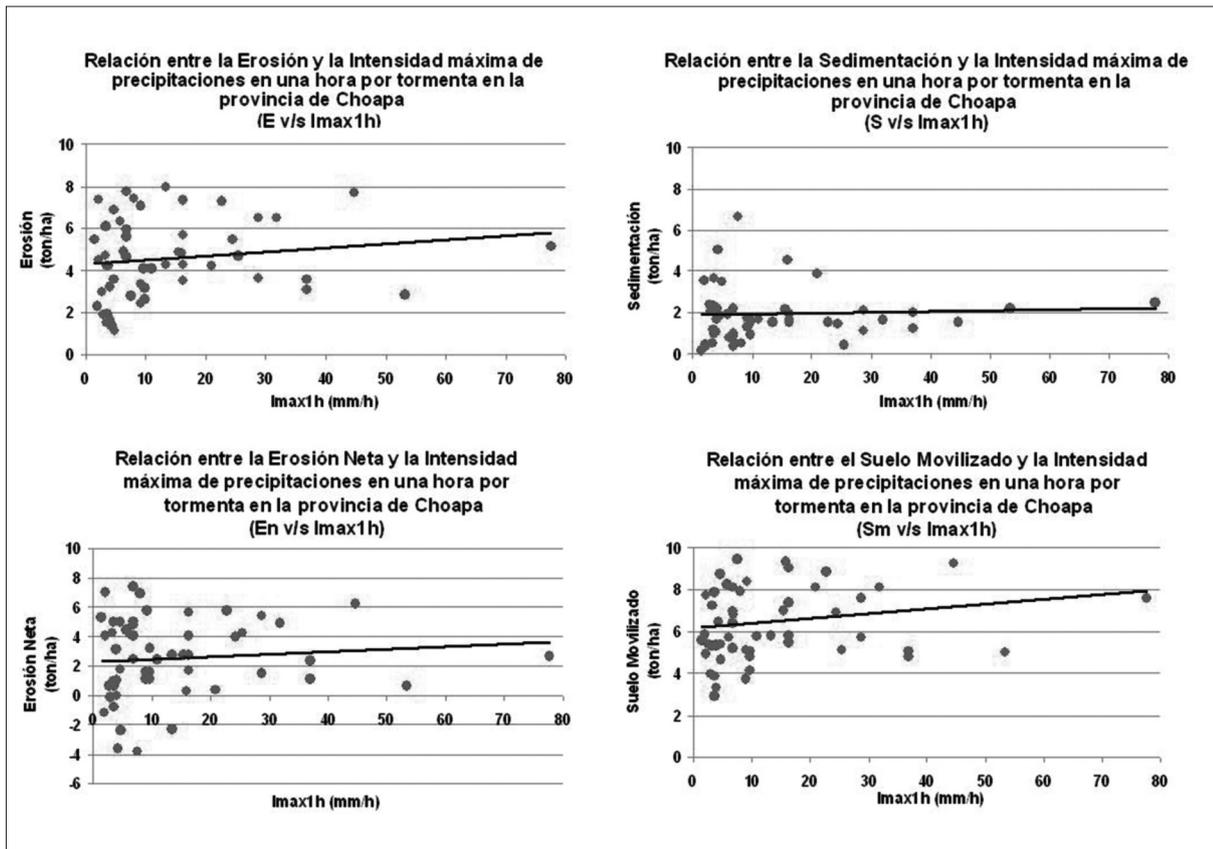


Figura 33. Relación entre las Variables del proceso erosivo (E, S, En y Sm) y la Intensidad máxima de precipitaciones en una hora por tormenta (I_{max1h}) en la provincia de Choapa.

4.5 RESULTADOS DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA ESTIMACIÓN DEL PROCESO EROSIVO EN LAS PROVINCIAS DE ELQUI, LIMARÍ Y CHOAPA

En función de los resultados alcanzados, fue posible establecer modelos matemáticos predictivos de la erosión, en función de las tres variables pluviométricas especificadas anteriormente. Así, los modelos se establecieron en función de regresiones lineales múltiples, en donde las variables dependientes son E, S, EN y SM; en tanto, las variables independientes corresponden a MT_{pp} , IT e $I_{máx1h}$, con sus respectivas transformaciones, a saber, $I_{máx1h}^2$, $IT(1/2)$, MT_{pp}^3 , etc., las que actuaron como variables auxiliares que contribuyen a minimizar la variación total de los datos.

Es importante mencionar que cada uno de los modelos mostrados corresponde al final seleccionado y es el que presentó una mayor significancia estadística, en términos de la relación de variables (Tabla Anova) y la explicación del modelo (coeficiente de determinación y error estándar de la estimación), entre otros.

También es relevante señalar que del total de relaciones entre las variables pluviométricas y las variables del proceso erosivo, hubo algunas que entregaron situaciones poco lógicas (debido a que mostraron una tendencia negativa, lo cual resulta físicamente imposible). Como resultado de este análisis, se excluyeron las variables pluviométricas que presentaron esta inconsistencia, dejando para la confección de cada modelo sólo las relaciones positivas. Lo anterior se debe a la gran variabilidad que muestran los datos, los cuales aunque fueron capturados en un número importante, son producto de un proceso precipitación-escorrentía

sólida en zonas áridas y semiáridas, lo que define dificultades en la obtención de relaciones más estables.

La información de los modelos es presentada de forma separada para cada una de las provincias; de esta manera, la tabla 10 presenta los modelos desarrollados para la provincia de Elqui; la tabla 11 presenta los modelos para la provincia de Limarí; y la tabla 12 presenta los modelos elaborados para la provincia de Choapa.

Los procedimientos de cálculo y el método utilizado para la obtención de cada modelo, se presentan en el anexo II.

4.5.1 Provincia de Elqui

En esta provincia se lograron desarrollar los modelos matemáticos para erosión, sedimentación y erosión neta (tabla 10). En el mismo sentido, cabe señalar que no se logró desarrollar un modelo matemático para suelo movilizado, debido a que la relación entre dicha variable y cada una de las variables pluviométricas fue siempre negativa, y como se señaló anteriormente, eso resulta físicamente imposible. Por tanto se descartó esta relación en el contexto de la información disponible, lo cual permite concluir en la necesidad de contar con mayor información futura, que permita resolver este tipo de inconsistencias.

Por otra parte, se puede señalar que el modelo de estimación de la erosión para la provincia de Elqui, presentó un error estándar de 1,48 ton/ha; el modelo de estimación de la sedimentación presentó un error estándar de 1,77 ton/ha y el modelo de estimación de la erosión neta fue el que presentó el mayor error estándar correspondiente a 1,98 ton/ha.

Elqui	$E = -1.15805 \cdot \text{máx}1h + 0.574923 \cdot T / \text{máx}1h - 1.2802E-48 \cdot \text{máx}1h^T + 0.0159669 \cdot \text{máx}1h^2 - 0.000062082 \cdot \text{máx}1h^3 + 4.59534 \cdot \text{máx}1h^{1/2}$	R-cuadrada = 91.582 %
		R-cuadrado (ajustado para g.1.) = 90.8563 %
	Error estándar del est. = 1.47949	
	Error absoluto medio = 1.10231	
	Estadístico Durbin-Watson = 1.74686	
	Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.101955	
	R-cuadrada = 59.3363 %	
	R-cuadrado (ajustado para g.1.) = 57.3364 %	
	Error estándar del est. = 1.76833	
	Error absoluto medio = 1.27267	
Sin Modelo	$S = -0.300714 \cdot \text{MTpp} + 0.00273942 \cdot \text{MTpp}^2 - 0.00000641303 \cdot \text{MTpp}^3 + 1.57441 \cdot \text{MTpp}^{1/2}$	Estadístico Durbin-Watson = 1.93511
		Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.0498439
	R-cuadrada = 66.1353 %	
	R-cuadrado (ajustado para g.1.) = 63.8394 %	
	Error estándar del est. = 1.98409	
	Error absoluto medio = 1.5762	
	Estadístico Durbin-Watson = 1.60741	
	Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.176156	
	Sin Ajustes	

Tabla 10. Modelos Matemáticos para la estimación de variables del proceso erosivo en la provincia de Elqui

4.5.2 Provincia de Limarí

En esta provincia se lograron desarrollar los modelos matemáticos para Erosión, Sedimentación, Erosión neta y Suelo movilizado (tabla 11), dado que todas estas variables presentaron al menos una relación positiva con alguna de las variables pluviométricas consideradas.

Por otra parte, se puede señalar que el modelo de estimación de la erosión para la provincia de Limarí, presentó un error estándar de 1,81 ton/ha; el modelo de estimación de la sedimentación presentó un error estándar de 1,86 ton/ha; el modelo de estimación de la erosión neta fue el que presentó el mayor error estándar correspondiente a 3,82 ton/ha y el modelo de suelo movilizado presentó un error estándar de 1,44 ton/ha.

Limarí	$E = -5.19561*IT + 0.0211337*Imáx1h*IT + 0.244053*IT/Imáx1h - 1.79208E-37*Imáx1h^{IT} + 0.022027^3 - 0.00000264248*Imáx1h^3 + 10.3439*IT^{1/2}$	R-cuadrada = 90.2407 %
		R-cuadrado (ajustado para g(1)) = 89.2134 %
		Error estándar del est. = 1.80756
		Error absoluto medio = 1.40677
		Estadístico Durbin-Watson = 1.74039
		Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.125986
		R-cuadrada = 67.6145 %
		R-cuadrado (ajustado para g(1)) = 64.8226 %
		Error estándar del est. = 1.85596
		Error absoluto medio = 1.29405
$S = -0.297163*MTpp + 4.02498*IT - 0.306006*IT^2 + 0.00737007*IT^3 + 2.49806*MTpp^{1/2} - 5.93033*IT^{1/2}$	Estadístico Durbin-Watson = 1.91124	
	Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.0369498	
	R-cuadrada = 33.4998 %	
	R-cuadrado (ajustado para g(1)) = 30.1748 %	
	Error estándar del est. = 3.82266	
	Error absoluto medio = 3.04051	
	Estadístico Durbin-Watson = 1.74996	
	Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.123526	
	R-cuadrada = 96.7757 %	
	R-cuadrado (ajustado para g(1)) = 96.4977 %	
$En = -0.481006*Imáx1h + 0.00875953*Imáx1h^2 - 0.0000533761*Imáx1h^3 + 2.03796*Imáx1h^{1/2}$	Error estándar del est. = 1.44036	
	Error absoluto medio = 1.10757	
	Estadístico Durbin-Watson = 2.06018	
	Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.079218	
$Sm = -2.68894*MTpp - 0.00168482*MTpp*Imáx1h + 1.3151E-102*Imáx1h^{MTpp} + 0.0669524*MTpp^2 - 0.000758236*MTpp^3 + 9.12906*MTpp^{1/2}$	R-cuadrada = 96.7757 %	
	R-cuadrado (ajustado para g(1)) = 96.4977 %	
	Error estándar del est. = 1.44036	
	Error absoluto medio = 1.10757	

Tabla 11. Modelos Matemáticos para la estimación de variables del proceso erosivo en la provincia de Limarí.

4.5.3 Provincia de Choapa

Es importante recordar que esta provincia fue la que presentó la mayor cantidad de relaciones positivas (92%) entre las variables pluviométricas y las variables del proceso erosivo. De esta manera se desarrollaron los modelos matemáticos de estimación para las variables E, S, En y Sm.

Por otra parte, se puede señalar que el modelo de estimación de la erosión para la provincia de Choapa, presentó un error estándar de 1,72 ton/ha; el modelo de estimación de la sedimentación presentó un error estándar de 1,64 ton/ha; el modelo de estimación de la erosión neta, fue el que presentó el mayor error estándar correspondiente a 2,56 ton/ha y el modelo de suelo movilizado presentó un error estándar de 2,29 ton/ha.

Choappa	$E = -0.0846519 * MT_{pp} + 1.35521 * MT_{pp}^{1/2}$	R-cuadrada = 88.1643 %
		R-cuadrado (ajustado para g(1)) = 87.9366 %
		Error estándar del est. = 1.7166
	$S = -0.00979956 * MT_{pp} * IT + 2.4371 * IT^{1/2}$	Error absoluto medio = 1.41263
		Estadístico Durbin-Watson = 1.67503
		Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.15146
	$E_n = 0.449838 * MT_{pp}^{1/2}$	R-cuadrada = 61.0904 %
		R-cuadrado (ajustado para g(1)) = 60.3421 %
		Error estándar del est. = 1.64189
		Error absoluto medio = 0.932983
Estadístico Durbin-Watson = 2.12106		
$S_m = -0.140709 * MT_{pp} + 2.06082 * MT_{pp}^{1/2}$	Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.0702804	
	R-cuadrada = 52.0758 %	
	R-cuadrado (ajustado para g(1)) = 52.0758 %	
	Error estándar del est. = 2.56499	
	Error absoluto medio = 2.035	
	Estadístico Durbin-Watson = 1.41611	
	Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0.279475	
	R-cuadrada = 89.4757 %	
	R-cuadrado (ajustado para g(1)) = 89.2733 %	
	Error estándar del est. = 2.28608	
	Error absoluto medio = 1.59797	
	Estadístico Durbin-Watson = 2.02671	
	Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0.0212765	

Tabla 11. Modelos Matemáticos para la estimación de variables del proceso erosivo en la provincia de Limari.

Una vez entregados los antecedentes técnicos previos, es posible señalar que con los resultados obtenidos a través de esta metodología, resulta imperativo continuar con el estudio iniciado en el presente libro, incluyendo un mayor número de mediciones y la incorporación de nuevas variables climáticas y edáficas, tales como el accionar de los vientos, la ubicación de las parcelas y el grado de inclinación de la pendiente, entre otras, que permitan no sólo cuantificar el proceso erosivo, sino que caracterizar los actuales cambios en el clima y pronosticar los cambios en la cubierta terrestre.

Por otra parte, en este estudio se trazaron las primeras aristas que permitieron modelar los procesos erosivos en la IV Región de Coquimbo; es por esta razón que los métodos utilizados en la selección de las variables, sumado a la cantidad de datos iniciales, deben ser ampliados y depurados en futuras investigaciones. Esto implica intensificar la instalación de los pluviógrafos, a fin de aminorar futuros errores de estimación relacionados con la asignación de tormentas a más de un sector de estudio y es vital ampliar la red de parcelas en tiempo y espacio.

Finalmente, los modelos que aquí se entregan corresponden a la primera experiencia en Chile de intentar obtener un modelo de estimación de la erosión hídrica a partir de parcelas experimentales, lo cual es un logro significativo por la amplitud del territorio estudiado. Pero asimismo debe señalarse que, aunque es un esfuerzo importante, responde a una modelación preliminar, que debería ser ampliada en el objetivo de alcanzar una mejor gestión de los procesos erosivos y de sedimentación y, por sobre todo, en la mitigación de los impactos ambientales y sociales que estos procesos conllevan.

BIBLIOGRAFÍA

AÑÓ, C. PERIS, M. 2003. El Olivar y la lucha contra la erosión. (en línea). Valencia, España. Consultado 12 abr. 2009. Disponible en http://www.infoagro.com/olivo/olivar_erosion.htm

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA AGRICULTURA DE CONSERVACIÓN / SUELOS VIVOS (AEAC/SV). 2004. (en línea). España. Consultado 15 ago. 2009. Disponible en <http://www.aeac-sv.org/pdfs/infoerosion.pdf>

ARTIGAS, J.; LÓPEZ, J.; CÓRDOVA, J. 2006. Methodology to estimate the total sediment transport in mountainous river basins. Revista Técnica Ingeniería Universidad Zulia. (en línea). Consultado 31 oct. 2009, p.221-234. Disponible en <http://www.scielo.org.ve/scielo>.

BACKHOFFff, M. A. 2005. Poligonos de Thiessen. In Transporte y espacio geográfico: Una aproximación geoinformática. (en línea). México. Universidad Nacional Autónoma de México. Consultado 20 abr. 2009. Disponible en <http://books.google.cl/books?id=H0VxBirKbpsC&printsec=frontcover#PPA10,M1>

BENEDETTI, S.; PIZARRO, R. 2006. Restauración hidrológico forestal y oasisificación: herramientas claves para el aumento de productividad de los suelos degradados de la Región de Coquimbo. (en línea). Santiago, Chile. INFOR. Consultado 5 oct. 2009. Disponible en http://www.infor.cl/areas_investigacion/restauracion_ecosistemas/restauracion_hidrolog_forest_oasisificacion_2006.htm

BENÍTEZ, A. 2007. Evaluación del Método de predicción y de las medidas de control de la sedimentación en el embalse "San Jacinto". (en línea). Tarija, Bolivia. Consultado 7 de oct. 2009. Disponible en http://hispagua.cedex.es/documentacion/revistas//Ing_civil/2007_151_157.pdf

CAIRNS, I.; HANDYSIDE, B.; HARRIS, M.; LAMBRESCHTSEN, N. 2001. Soil conservation technical handbook. (en línea). Wellington, Nueva Zelanda. Consultado 12 sep. 2009. Disponible en <http://www.mfe.govt.nz/publications/land/soil-conservation-handbookjun01/soil-conserv-handbook-jun01.pdf>

CLÉRICI, C.; GARCÍA, F. 2001. Aplicaciones del modelo USLE/RUSLE para estimar pérdidas del suelo por erosión en Uruguay y la erosión sur de la cuenca del río de la Plata. (en línea). Montevideo, Uruguay. Consultado 3 de oct. 2009. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/agrociencia/VOL5/1/p92-103.pdf>

CIREN (CENTRO DE INFORMACIÓN SOBRE RECURSOS NATURALES, CHILE). 2006. Zonificación de erosión y fragilidad de los suelos del secano costero de las Regiones VI y VII. Informe Técnico de Resultados. Santiago, Chile. 67 p.

COMISIÓN DE LAS COMUNIDADES EUROPEAS. 2002. Comunicación de la Comisión al Consejo, el Comité Económico y Social y el Comité de las Regiones. Hacia una estrategia temática para la protección del suelo. (en línea). Bruselas, Bélgica. Consultado 15 oct. 2009. Disponible en <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2002:0179:FIN:ES:PDF>

CUITIÑO, H. 1999. Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos de la Precordillera Andina y Valle Central de la VII Región. Tesis Ing. Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales. 104 p.

DE REGOYOS, M. 2003. Metodología para la evaluación de la erosión hídrica con modelos informáticos. Aplicación del modelo geowepp a dos pequeñas cuencas en Madrid. (en línea). Tesis Doctoral. España. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos. 466 p. Consultado 5 abr. 2009. Disponible en <http://oa.upm.es/450/01/02200329.pdf>

DSCyLCD (DIRECCIÓN DE CONSERVACIÓN DE SUELOS Y LUCHA CONTRA LA DESERTIFICACIÓN). 1990. Erosión. (en línea). Buenos Aires, Argentina. Consultado 12 abr. 2009. Disponible en <http://www.santacruz.gov.ar/recursos/erosion/erosion.htm>

ELLIES, A. 2000. Soil erosion and its control in Chile. Acta Geológica Hispánica 35(3-4): 279-284.

FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia) 1994. Erosión de suelos en América Latina. Roma, Italia. Consultado 3 abr. 2009. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/T2351S/T2351S00.htm>

FARFÁN, R. 2002. Determinación del índice de erosividad pluvial (R) de la ecuación universal de pérdidas de suelos, para dos estaciones pluviográficas de la VII Región del Maule. Tesis Ing. Forestal. Talca, Chile. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales. 123 p.

FAVIS - MORTOLOCK, D. 2007. Soil Erosion Site: Erosion Processes. (en línea). Irlanda del Norte. Consultado 10 sep. 2009. Disponible en <http://soilerosion.net>

GARCÍA, J. 2006. La erosión: Aspectos conceptuales y modelos. In Hidrología de superficie y conservación de suelos. Material de clase 2007. (en línea). España. Consultado 12 abr. 2009. Disponible en <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/hidrologia-de-superficies-y-conservacion-de-suelos/material-de-clase/>

GARCIA – CHEVESICH, P. 2008. Procesos y Control de la Erosión. Outskirts Press Inc. Arizona, Estados Unidos. 292 pp.

GOMEZ, I.; ROMERO, R.; BENITEZ, J. M. 2007. Consideración de la dinámica espaciotemporal para la definición de actuaciones defensivas contra la erosión. (en línea). Geofocus Nº 7: 1-22. Consultado 4 abr. 2009. Disponible en http://geofocus.rediris.es/2007/Articulo1_2007.pdf

HONORATO, R.; BARRALES, L.; PEÑA, I.; BARRERA, F. 2001. Evaluación del modelo USLE en la estimación de la erosión en seis localidades entre la IV y IX Región de Chile. (en línea). Ciencia e Investigación Agraria 28 (1): 7-14. Consultado 10 abr. 2009. Disponible en <http://www.rcia.puc.cl/Espanol/pdf/28-1/7-14.pdf>

HUDSON, N. W. 1997. Medición sobre el terreno de la erosión del suelo y de la escorrentía. (en línea). Bedford, Inglaterra. FAO. Consultado 15 may. 2009. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/T0848S/T0848S00.htm>

JUNTA DE ANDALUCIA. 2009. El pronóstico de la erosión de suelos como parte del proceso de evaluación. (en línea). Andalucía, España. Consultado 12 sep. 2009. Disponible en http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/web/Bloques_Tematicos/Publicaciones_Divulgacion_Y_Noticias/Documentos_Tecnicos/Uso_y_erosion/PDFs/pronostico.pdf

LAL, R. 1994. Soil erosion by wind and water: problems and prospects. In Soil erosion research methods. (en línea). Estados Unidos. Soil and Water Conservation Society. Consultado 4 abr. 2009. Disponible en http://books.google.cl/books?id=1TK7dEOIM4gC&printsec=frontcover&dq=lal&ei=zOg6SPzIL5zkyASX8qGYCg&sig=v4wpxuYnznTOo5mPCGyUei_Jjo#PPR7,M1

MENDOZA, M. 2005. Métodos de clavos y rondanas. In Manual de métodos sencillos para estimar erosión hídrica. (en línea). Managua, Nicaragua. Consultado 4 abr. 2009. Disponible en <http://www.foprideh.org/cms/librosvirtuales/1180647717.pdf>

MINTEGUI, J.; LÓPEZ, F. 1990. La ordenación agrohidrológica en la planificación. Bilbao, España. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. 309 p.

MOREIRA, J. 1991. Capacidad de uso y erosión de los suelos en el valle central del río Guadalquivir. (en línea). Andalucía, España. Junta de Andalucía. Consultado 20 oct. 2009. Disponible en http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/site/web/med_ambiente.a5664a214f73c3df81d8899661525ea0/?vgnnextoid=91718ab30f767010VgnVM100000624e50aRCRD&vgnnextchannel=fdb4760edc7a7010VgnVCM1000000624e50aRCRD

MORGAN, R. 1984. Erosión de suelos. (en línea). España. Consultado 21 sep. 2009. Disponible en <http://www.uylibros.com.uy/verlibro.asp?xprod=0&id=41014&idcat=21&idsubcat=71&idarea=178>

MORGAN, R. 1997. Erosión y conservación del suelo. (en línea). Madrid, España. Consultado 2 may. 2009. Disponible en http://books.google.cl/books?id=jcFqaFlu1UC&printsec=frontcover&dq=morgan&source=gbs_summary_r&cad=0#PPP1,M1

MORGAN, R., 2005. Soil erosion and conservation. Third Edition. Blackwell Publ., Cornwell. (en línea). Consultado 12 may. 2009. Disponible en <http://www.infibeam.com/Books/info/R-P-C-Morgan/Soil-Erosion-andConservation/1405117818.html>

MUTCHLER, C.; MURPHREE, C.; MCGREGOR, K. 1994. Laboratory and field plots for erosion research. In Soil erosion research methods. (en línea). Estados Unidos. Soil and Water Conservation Society. Consultado 4 abr. 2009. Disponible en http://books.google.cl/books?id=1TK7dEOIM4gC&printsec=frontcover&dq=lal&ei=zOg6SPzIL5zkyASX8qGYCg&sig=v4wpxuYnznTOo5mPCGyUei_Jjo#PPR7,M1

OLMOS, L.; BORSELLINO, M.; MATTAR, M.; PILÁN, M.; FARIAS, H. 2003. Estimación de la tasa de producción de sedimentos en la cuenca del río Horcones (Prov. de Salta y Santiago del Estero). (en línea). Santiago del Estero, Argentina. Consultado 6 oct. 2009. Disponible en http://irh-fce.unse.edu.ar/Rios2003/RE/RE_2_8.pdf

OÑATE-VALDIVIESO, F. 2004. Metodología para la evaluación del riesgo de erosión hídrica en zonas áridas y su aplicación en el manejo y protección de proyectos hidráulicos. (en línea). Loja, Ecuador. Consultado 21 ago. 2009. Disponible en http://www.fronate.pro.ec/fronate/wp-content/media/2009/04/modelo-erosion_hidrica.pdf

PEÑA, L. 1994. Erosión y conservación de suelos. (en línea). Santiago, Chile. Consultado 4 abr. 2009. Disponible en http://mazingner.sisib.uchile.cl/repositorio/lb/ciencias_agronomicas/miscelaneasagronomicas38/C9.html

PÉREZ, U.; LÓPEZ, R. 2000. Estudio preliminar de la erosión hídrica en un inceptisol de los andes venezolanos bajo uso agrícola. (en línea). Revista Forestal Venezolana 44 (2): 11-19. Consultado 3 abr. 2009. Disponible en http://saber.ula.ve/cgi-win/be_alex.exe?Documento=T016300000160/1&term_termino_2=e:/alexandr/db/ssaber/Edocs/pubelectronicas/revistaforestal/vol44-2/articulo44_2_1.pdf&term_termino_3=&Nombrebd=SSABER

PIDWIRNY, M. 2006. Erosion and deposition. In Fundamentals of physical geography. (en línea). Kelowna, Canadá. Consultado 20 de sep. 2009. Disponible en <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/10w.html>

PIZARRO, R. 1988. Elementos técnicos de hidrología II (Instructivos técnicos): Proyecto regional sobre uso y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y el Caribe. Chile. UNESCO, Oficina Regional de Ciencia y Tecnología. 109 p.

PIZARRO, R.; CUITIÑO, H. 2002. Método de evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos en Chile. In Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales (2002, Madrid, España). Actas de la I Reunión del Grupo de trabajo de Hidrología Forestal. Madrid, España. p. 165-170.

PIZARRO, R.; SANGUESA, C.; BRAVO, C.; FARÍAS, C. 2003a. Manual de conservación de aguas y suelos. Instructivo N° 1 Zanjas de Infiltración. (en línea). Talca, Chile. Consultado 1 abr. 2009. Disponible en http://eias.entalca.cl/2publicaciones/3manuales/f_instructivo_zanja.pdf

ROMERO, C.; STROONSNIJDER, L. 2002. Evaluación del comportamiento del modelo de erosión WEPP bajo condiciones de los Andes: Caso La Encañada – Perú. (en línea). Anales Científicos de la UNAML. Consultado 10 abr. 2009. Disponible en <http://www.tradeoffs.montana.edu/pdf/WEPP.pdf>

SUDAS (STATEWIDE URBAN DESIGN AND SPECIFICATIONS, USA). 2006. The erosion and sedimentation process. In Iowa Statewide Urban Design Standards Manual. 2007. (en línea). Iowa, Estados Unidos. Consultado 4 abr. 2009. Disponible en <http://www.iowasudas.org/design.cfm>

TRAGSA. 1998. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. Madrid, España. Ediciones Mundiprensa. 902 p.

TRISTÁ, E. 2003. Evaluación de los procesos de erosión en las playas interiores de Cuba. Tesis de doctorado, Instituto de Oceanología, La Habana, Cuba.

UNESCO, 2007. Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia, para la zona centro sur de Chile. Roberto Pizarro Tapia, Dayanna Aravena Garrido, Karina Macaya Pérez, Alejandro Abarza Martínez, Mariela Cornejo Espinoza, Mauricio Labra Lorca, Marcelo Pavez Vidal, Leonardo Román Arellano. Editorial Universidad de Talca, Chile. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°7.

USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USA). 1995. Water erosion prediction project. Hillslope profile and watershed model documentation (abstract). (en línea). Estados Unidos. Consultado 6 abr. 2009. Disponible en <http://topsoil.nserl.purdue.edu/nserlweb/weppmain/docs/abstract.pdf>

USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USA). 2000. KINEROS2: A kinematic runoff and erosion model. (en línea). Estados Unidos. Consultado 15 may. 2009. Disponible en <http://www.tucson.ars.ag.gov/kineros/>

USDA (UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, USA). 2002. Water erosion. In National agronomy manual. (en línea). Estados Unidos. Consultado 2 may. 2009. Disponible en http://policy.nrcs.usda.gov/M_190_NAM.pdf

VEGA, M. B.; FEBLES, J. M. 2005. Evaluation of the rainfall erosion in cattle regions from the central part of Havana province. Cuban Journal of Agricultural Science. Consultado 2 may. 2009. Disponible en base de datos Ebsco Host.

WISHMEIER, W.; SMITH, D. 1978. Predicting rainfall erosion losses: A guide to conservation planning. (en línea). Washington, Estados Unidos. Consultado 12 abr. 2009. Disponible en http://topsoil.nserl.purdue.edu/usle/AH_537.pdf

YATACO, A. 2007. Evaluación cuantitativa de la erosión hídrica utilizando varillas de erosión, en suelos con diferentes grados de cobertura vegetal de la comunidad campesina de Yuracmayo, Lima (abstract). (en línea). Tesis de Grado Ingeniería Agrícola. Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina, Facultad de ingeniería Agrícola. 4 p. Consultado 15 may. 2009. Disponible en <http://www.lamolina.edu.pe/agricola/biblioteca/Tesis/2007/Evaluacion%20cuantitativa.pdf>

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a todas las personas e instituciones que han participado en el desarrollo de este proyecto, especialmente a las Comunidades Agrícolas de la Región de Coquimbo y a la Junta de Vigilancia de Limarí; a la Corporación Nacional Forestal, CONAF; CAZALAC, Centro del Agua para Zonas Áridas y Semiáridas de América Latina y el Caribe, al Servicio Agrícola y Ganadero, SAG, a la Dirección de Obras Hidráulicas, DOH, y a la Universidad de Chile (Campo Experimental Las Cardas), todas instituciones del Gobierno de Chile; a la empresa Ingeniería y Desarrollo Forestal, INDEF; a los encargados de la toma de datos de terreno, también a la Hacienda el Tangué y a la Hacienda Caracas; pero especialmente se quiere agradecer a la Agencia Estatal Corfo/Innova de Chile por haber financiado dicha iniciativa, la cual ha permitido seguir avanzando en la lucha contra la erosión producida en las zonas áridas y semiáridas de la región de Coquimbo, Chile.

ANEXO I

A continuación se presentan los valores anuales (2007, 2008 y 2009), de las variables pluviométricas y de las variables del proceso erosivo, pertenecientes a las tres provincias de la Región de Coquimbo.

Provincia de Elquí							
Año	MTpp	IT	Imáx1h	E	S	En	Sm
2007	4,60	1,42	2,84	7,37	7,56	-0,19	14,93
	14,20	1,34	12,43	5,54	1,26	4,28	6,80
	0,40	0,05	3,67	4,47	0,24	4,23	4,71
	4,60	1,42	2,84	7,47	2,09	5,38	9,58
	14,20	1,34	12,43	3,30	0,86	2,44	4,15
	0,40	0,05	3,67	6,10	2,03	4,08	8,13
	13,80	0,71	3,62	5,29	1,11	4,19	6,40
	0,40	13,52	36,92	5,28	1,88	3,60	6,96
	6,60	1,29	3,41	9,27	3,53	5,74	12,80
	12,40	0,57	7,04	3,93	1,40	2,53	5,33
	6,60	1,29	3,41	8,36	5,90	2,46	14,27
	12,40	0,57	7,04	4,86	1,84	3,02	6,69
	12,60	1,73	8,29	7,39	6,17	1,22	13,57
	16,60	0,71	47,19	4,85	1,39	3,46	6,24
	0,40	26,67	66,67	7,58	0,86	6,72	8,44
	12,60	1,73	8,29	6,83	8,85	-2,02	15,68
	16,60	0,71	47,19	5,16	0,92	4,24	6,09
	0,40	26,67	66,67	5,10	0,34	4,76	5,44
	10,20	0,27	7,35	4,59	1,20	3,39	5,80
	1,00	6,17	38,13	3,48	0,80	3,39	3,56
2008	4,20	1,03	2,52	3,93	0,08	3,85	4,01
	45,60	1,27	17,23	4,24	2,30	1,95	6,54
	53,60	5,85	8,46	3,81	1,93	1,88	5,74
	5,60	0,94	2,27	5,88	0,46	5,42	6,34
	4,20	1,03	5,52	3,82	0,34	3,49	4,16
	45,60	1,27	17,23	2,98	2,12	0,86	5,09
	53,60	5,85	8,46	3,19	3,21	-0,02	6,39
	5,60	0,94	2,27	3,78	0,85	2,91	4,61
	10,20	0,87	4,89	3,73	4,28	-0,55	8,01
	46,00	6,70	14,09	3,98	4,21	-0,22	8,19
	57,20	1,70	14,10	4,57	0,83	3,74	5,41
	13,20	0,78	9,76	3,47	3,00	0,47	6,46
	37,60	1,62	6,71	3,88	2,09	1,78	5,97
	41,00	4,32	11,71	3,15	3,11	0,04	6,26
	13,20	0,78	9,76	3,66	5,52	-1,86	9,17
	37,60	1,62	6,71	4,37	1,91	2,46	6,28
	41,00	4,32	11,71	4,11	2,81	1,30	6,92
	13,20	1,24	4,74	2,53	2,79	-0,27	5,32
	65,20	1,22	7,96	3,17	4,43	-1,25	7,60
	60,60	4,78	16,03	4,13	1,74	2,39	5,88
13,20	1,24	4,74	2,70	1,28	1,42	3,98	
85,20	1,22	7,96	3,94	3,19	0,75	7,13	
60,60	4,78	16,03	5,14	1,51	3,63	6,65	
13,20	1,01	4,74	1,81	1,06	0,75	2,87	
61,20	6,08	10,75	3,18	1,55	1,63	4,74	
56,20	1,89	12,91	2,99	3,99	-0,99	6,98	
4,40	0,18	1,58	2,98	0,62	2,36	3,59	

	17,40	0,91	11,86	3,92	0,55	3,37	4,47
	5,00	0,60	1,90	4,55	1,06	3,49	5,61
	17,40	0,91	11,86	4,49	1,05	3,44	5,55
	5,00	0,60	1,90	8,06	1,01	5,05	7,08
	39,60	2,08	12,95	3,01	2,66	0,35	5,66
	4,20	0,22	2,59	4,44	1,00	3,44	5,45
	39,60	2,08	12,95	4,54	0,31	4,23	4,84
	4,20	0,22	2,59	4,22	1,13	3,09	5,36
	28,20	0,72	19,63	4,34	3,17	1,18	7,51
2009	19,60	1,47	5,16	6,36	0,55	5,80	8,91
	22,20	0,40	8,23	6,07	0,62	5,44	6,69
	22,20	0,40	8,23	4,63	1,84	2,79	6,46
	34,40	1,99	17,18	4,80	0,66	4,13	5,48
	0,80	0,10	0,01	5,07	0,92	4,15	5,99
	34,40	1,99	17,18	4,88	1,02	3,87	5,90
	0,80	0,10	0,01	5,00	1,23	3,76	6,23
	8,80	102,98	286,10	4,79	0,45	4,34	5,25
	39,00	1,52	165,33	4,88	0,87	4,00	5,75

Tabla 13: Variables pluviométricas y del proceso erosivo, para los años 2007, 2008 y 2009; Provincia de Elqui.

Provincia de Limarí							
Año	MTpp	IT	Imáx1h	E	S	En	Sm
2007	22,00	0,75	4,34	6,37	4,62	1,76	10,99
	17,80	0,70	3,36	2,17	3,33	-1,16	5,49
	22,00	0,75	4,34	5,13	4,06	1,06	9,19
	17,80	0,70	3,36	6,15	0,02	6,13	6,17
	12,60	0,73	2,84	1,37	6,96	-5,59	8,32
	11,00	0,52	1,87	4,14	1,49	2,65	5,63
	11,00	0,52	1,87	4,93	3,24	1,69	8,17
	11,00	0,52	1,87	2,70	1,51	1,19	4,22
	14,60	0,86	3,82	6,55	2,27	4,29	8,82
	0,40	1,17	3,40	7,43	0,00	7,43	7,43
	14,60	0,86	3,82	5,13	2,40	2,74	7,53
	0,40	1,17	3,40	5,51	0,12	5,40	5,63
	0,40	1,32	4,33	4,20	0,01	4,19	4,21
2008	14,20	2,19	10,01	4,30	2,16	2,14	6,47
	35,60	10,17	9,00	6,42	0,85	5,57	7,27
	50,60	2,76	108,97	5,42	1,74	3,69	7,16
	2,80	0,96	0,24	4,30	1,13	3,17	5,43
	14,20	2,19	10,01	3,48	6,17	-2,69	9,65
	35,60	10,07	9,00	5,83	2,22	3,61	8,04
	50,60	2,76	108,97	7,29	3,34	3,96	10,63
	2,80	0,96	0,24	7,74	0,61	7,13	8,35
	13,00	0,56	11,08	2,86	5,38	-2,49	8,26
	42,20	8,24	9,50	3,38	5,56	-2,18	8,94
	39,60	1,97	24,45	4,70	3,05	1,65	7,75
	11,00	0,62	8,94	348	3,17	0,31	6,65
	35,00	2,50	7,32	4,61	3,37	1,24	7,98
	34,60	2,93	44,44	4,99	2,05	2,94	7,04
	0,60	0,05	0,00	5,37	0,61	4,76	5,98
	11,00	0,62	8,94	3,88	3,84	0,04	7,72
	35,00	2,50	7,32	3,47	6,83	-3,36	10,31
	34,60	2,93	44,44	4,95	3,25	1,70	8,20
	0,60	0,05	0,00	6,12	0,60	5,53	8,72
	11,00	0,62	8,94	2,24	6,05	-3,81	8,29
	35,00	2,50	7,32	2,25	9,28	-7,03	11,52
	34,60	2,93	44,44	4,16	0,76	3,40	4,92
	0,60	0,05	0,00	6,09	0,47	5,62	6,57
	19,40	1,15	16,59	3,60	3,18	0,42	6,78
	30,60	0,65	11,47	5,81	0,36	5,45	6,17
	34,00	4,32	21,58	5,84	1,46	4,38	7,30
	4,20	2,65	3,65	7,08	0,39	6,69	7,47
	9,40	9,31	0,65	2,46	7,88	-5,42	10,34
	13,40	1,07	1,83	4,22	3,07	1,15	7,29
	43,60	1,28	15,09	5,04	1,36	3,68	6,41
1,60	0,10	0,01	7,44	0,12	7,32	7,56	
9,40	9,31	0,65	2,96	4,03	-1,08	6,99	
13,40	1,07	1,83	3,97	3,55	0,42	7,52	
43,60	1,28	15,09	5,00	0,85	4,15	5,85	
1,60	0,10	0,01	5,43	0,77	4,66	6,19	
	36,20	0,69	8,04	8,23	0,36	7,88	8,59
	3,40	0,29	2,89	6,32	0,72	5,60	7,04
	36,20	0,69	8,04	6,37	1,81	4,56	8,18
	3,40	0,29	2,89	6,70	0,48	6,22	7,18
	39,60	2,29	16,53	6,10	1,68	4,42	7,78
	0,80	0,03	0,01	5,66	0,96	4,40	6,62

2009	1,40	8,24	48,44	6,80	0,64	6,16	7,44
	0,80	0,03	0,01	6,34	0,65	5,68	7,01
	1,40	8,24	48,44	7,55	0,49	7,07	8,04
	0,80	0,03	0,01	4,70	2,47	2,23	7,16
	1,40	8,24	48,44	7,03	0,45	6,58	7,48
	31,80	0,36	17,28	6,35	0,96	5,39	7,31
	17,60	0,62	10,20	7,69	0,52	7,34	8,38
	17,60	0,62	10,20	6,69	1,17	5,52	7,86
	31,40	0,95	22,31	6,72	1,54	5,18	8,26
	19,40	25,64	33,88	6,61	1,45	5,06	7,97

Tabla 14: Variables pluviométricas y del proceso erosivo, para los años 2007, 2008 y 2009, dentro de la Provincia de Limarí.

Provincia de Choapa							
Choapa	MTpp	IT	Imáx1h	E	S	En	Sm
2007	18,80	0,81	3,61	4,23	3,64	0,59	7,87
	9,80	2,45	4,28	1,40	5,04	-3,64	6,44
	10,80	1,54	7,55	2,81	6,63	-3,82	9,44
	36,00	0,52	13,43	4,25	1,53	2,72	5,78
	14,00	1,01	4,04	1,65	1,57	-0,02	3,32
	5,60	1,56	3,56	1,93	0,96	0,97	2,89
	36,00	0,52	13,43	7,96	10,26	-2,30	18,22
	14,00	1,01	4,04	3,21	2,18	1,03	5,39
	5,60	1,56	3,56	1,51	2,35	-0,84	3,86
	97,20	1,42	20,94	4,23	3,90	0,33	8,12
	13,00	0,64	2,94	1,89	2,08	-0,18	3,97
	3,20	0,80	2,00	2,30	3,55	-1,24	5,85
	18,60	0,97	2,72	2,99	2,39	0,59	5,38
	8,80	1,24	4,84	1,13	3,52	-2,39	4,65
2008	39,20	0,70	9,72	4,11	0,95	3,16	5,05
	88,80	1,76	6,20	4,92	0,79	4,14	5,71
	58,60	3,74	24,39	5,44	1,47	3,97	6,91
	7,40	0,26	3,25	4,75	0,53	4,21	5,28
	23,60	0,50	36,92	3,58	1,23	2,35	4,81
	41,27	1,56	10,96	4,06	1,69	2,37	5,75
	24,20	1,08	15,52	4,86	2,16	2,70	7,03
	2,20	0,30	1,41	5,44	0,15	5,29	5,59
	12,20	0,50	9,09	2,42	1,30	1,11	3,72
	47,60	0,98	9,75	2,61	1,15	1,10	4,13
	31,40	2,27	28,75	3,61	2,12	1,50	5,73
	12,20	0,50	9,09	3,37	1,75	1,62	5,12
	47,60	0,98	9,75	3,16	1,64	1,51	4,80
	31,40	2,27	28,75	6,50	1,10	5,40	7,60
	34,80	0,60	53,33	2,84	2,19	0,65	5,03
	90,60	1,93	6,87	4,62	2,20	2,43	6,82
	86,60	3,70	22,76	7,31	1,56	5,75	8,86
	44,60	0,76	36,92	3,07	2,01	1,06	5,09
65,00	1,34	25,44	4,68	0,44	4,24	5,12	
52,00	2,29	77,65	5,12	2,49	2,63	7,61	
2009	68,00	1,03	5,80	6,34	1,89	4,45	8,24
	42,40	1,38	8,06	7,42	0,50	6,91	7,92
	48,00	0,73	9,22	7,05	1,31	5,74	8,36
	16,80	1,22	3,38	6,09	1,16	4,93	7,25
	29,90	0,53	4,61	3,56	1,84	1,71	5,40
	9,60	0,60	2,15	4,48	0,44	4,03	4,92
	29,80	0,53	4,61	6,86	1,89	4,97	8,75
	9,60	0,60	2,15	7,38	0,39	6,99	7,76
	54,00	0,66	16,30	5,70	1,69	4,01	7,39
	19,60	0,35	6,84	5,97	0,97	5,01	6,94
	54,00	0,66	16,30	3,55	1,91	1,65	5,46
	19,60	0,35	6,84	7,74	0,39	7,35	8,13
	54,00	0,66	16,30	7,33	1,70	5,62	9,03
	19,60	0,35	6,84	5,60	0,82	4,77	6,42
	54,00	0,66	16,30	4,26	1,54	2,71	5,80
	19,60	0,35	6,84	4,61	0,60	4,01	5,21
	62,80	0,79	15,88	4,60	4,53	0,27	9,33
	20,00	0,22	3,90	4,22	1,09	3,13	5,31
84,00	5,31	44,68	7,71	1,53	6,18	9,25	
25,00	0,85	31,92	6,50	1,63	4,87	8,13	

Tabla 15: Variables pluviométricas y del proceso erosivo, para los años 2007, 2008 y 2009, dentro de la Provincia de Choapa.

A continuación se presentan los resultados de los test de regresión y análisis de varianza, utilizados para determinar los modelos de Erosión, Sedimentación y Erosión Neta, en la Provincia de Elqui, Región de Coquimbo.

• Resultados Modelo de Erosión

Variable (s)	
Dependiente	Independiente (s)
E	IT
	Imáx1h
	Imáx1h*IT
	IT/Imáx1h
	Imáx1h/IT
	$IT^{Imáx1h}$
	$Imáx1h^{IT}$
	IT^2
	$Imáx1h^2$
	IT^3
	$Imáx1h^3$
	$IT^{1/2}$
$Imáx1h^{1/2}$	

Tabla 16: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Erosión en la Provincia de Elqui.

Donde:

E = Erosión.

IT = Intensidad promedio por tormenta.

Imáx1h = Intensidad máxima de precipitación en 1 hora por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
Imáx1h	-1,15805	0,157905	-7,33383	0,0000
IT/Imáx1h	0,574923	0,13055	4,40387	0,0000
$Imáx1h^{IT}$	0,0	0,0	-2,24249	0,0288
$Imáx1h^2$	0,0159669	0,00290662	5,4933	0,0000
$Imáx1h^3$	0,0000662082	0,0000131135	-504884	0,0000
$Imáx1h^{1/2}$	4,59534	0,414663	11,0821	0,0000

Tabla 17: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Erosión en la Provincia de Elqui

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	1381,19	6	230,198	105,15	0,0000
Residuo	126,955	58	2,18888		
Total	1508,14	64			

Tabla 18: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Erosión en la Provincia de Elqui.

Paso	Variable (s)	G. L.	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	CME
0	0	64	0	0	23,5647
1	1	63	65,69	65,15	8,21331
2	2	62	79,45	78,79	4,9992
3	3	61	83,31	82,49	4,12535
4	4	60	86,41	85,5	3,41716
5	5	59	90,85	90,08	2,33834
6	6	58	91,58	90,71	2,18888

Tabla 19: Pasos utilizados en la test de regresión, del modelo de Erosión de la Provincia de Elqui.

Nota:

Método: Selección Hacia Adelante

F para Introducir: 4.0

F para Eliminar: 4.0

Variable (s)	
Dependiente	Independiente (s)
S	MTpp
	MTpp ²
	MTpp ³
	MTpp ^{1/2}

Tabla 20: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Sedimentación en la Provincia de Elqui.

Donde:

S = Sedimentación.

MTpp = Monto total de precipitación por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
MTpp	-0,300714	0,2484	-1,2106	0,2307
MTpp ²	0,00273942	0,00592174	0,462605	0,6453
MTpp ³	-0,00000641303	0,0000533227	-0,120268	0,9047
MTpp ^{1/2}	1,57441	0,635858	2,47604	0,0161

Tabla 21: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Sedimentación en la Provincia de Elqui.

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	278,335	4	69,5837	22,25	0,0000
Residuo	190,746	61	3,12698		
Total	469,081	65			

Tabla 22: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Sedimentación en la Provincia de Elqui.

• Resultados Modelo Erosión Neta

Variable (s)	
Dependiente	Independiente (s)
EN	IT
	Imáx1h
	Imáx1h*IT
	IT/Imáx1h
	Imáx1h/IT
	$ T ^{Imáx1h}$
	$Imáx1h^{IT}$
	IT^2
	$Imáx1h^2$
	IT^3
	$Imáx1h^3$
	$IT^{1/2}$
	$Imáx1h^{1/2}$

Tabla 23: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Erosión Neta en la Provincia de Elqui.

Donde:

EN = Erosión Neta

IT = Intensidad promedio por tormenta.

Imáx1h = Intensidad máxima de precipitación en 1 hora por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
IT	-1,20658	0,374166	-322471	0,0021
IT/máx1h	0,404226	0,177752	2,2741	0,0266
IT/máx1h/IT	0,0333755	0,011737	2,8436	0,0061
IT ²	0,0306643	1,0101508	3,02087	0,0037
IT ^{1/2}	3,12102	0,660079	4,72825	0,0000

Tabla 24: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Erosión Neta en la Provincia de Elqui.

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	453,586	5	90,7171	23,04	0,0000
Residuo	232,259	59	3,9366		
Total	685,845	64			

Tabla 25: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Erosión Neta en la Provincia de Elqui.

Paso	Variable (s)	G. L.	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	CME
0	13	51	72,17	65,07	3,74289
1	12	52	72,10	65,66	3,67991
2	11	53	71,82	65,98	3,64598
3	10	54	71,53	66,26	3,61598
4	9	55	71,00	66,25	3,61655
5	8	56	70,31	66,06	3,63675
6	7	57	69,11	65,32	3,71655
7	6	58	68,29	65,01	3,74996
8	5	59	66,14	63,27	3,9366

Tabla 26: Pasos utilizados en la test de regresión, del modelo de Erosión Neta de la Provincia de Elqui.

Nota:

Método: Selección Hacia Atrás

F para Introducir: 4.0

F para Eliminar: 4.0

A continuación se presentan los resultados de los test de regresión y análisis de varianza, utilizados para determinar los modelos de Erosión, Sedimentación y Erosión Neta, Suelo Movilizado en la Provincia de Limarí, Región de Coquimbo.

• Resultados Modelo de Erosión

Variable (s)	
Dependiente	Independiente (s)
E	IT
	Imáx1h
	Imáx1h*IT
	IT/Imáx1h
	Imáx1h/IT
	$IT^{Imáx1h}$
	$Imáx1h^{IT}$
	IT^2
	$Imáx1h^2$
	IT^3
	$Imáx1h^3$
	$IT^{1/2}$
$Imáx1h^{1/2}$	

Tabla 27: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Erosión en la Provincia de Limarí.

Donde:

E = Erosión.

IT = Intensidad promedio por tormenta.

Imáx1h = Intensidad máxima de precipitación en 1 hora por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
IT	-5,19561	0,658723	-7,88739	0,0000
Imáx1h*IT	0,0211337	0,00422387	5,0034	0,0000
IT/Imáx1h	0,244053	0,0506937	4,81427	0,0000
$Imáx1h^{IT}$	0,0	0,0	-4,74454	0,0000
IT^3	0,02207	0,00441972	4,9838	0,0000
$Imáx1h^3$	-2,64248E-06	1,31968E-06	-2,00237	0,0500
$IT^{1/2}$	10,3439	0,841358	12,2943	0,0000

Tabla 28: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Erosión en la Provincia de Limarí.

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	1722,03	7	246,005	75,29	0,0000
Residuo	186,234	57	3,26726		
Total	1908,27	64			

Tabla 29: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Erosión en la Provincia de Limarí.

Paso	Variable (s)	G. L.	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	CME
0	13	51	91,21	88,97	3,28771
1	12	52	91,21	89,18	3,22475
2	11	53	91,13	89,26	3,19405
3	10	54	90,92	89,24	3,20844
4	9	55	90,91	89,43	3,15225
5	8	56	90,70	89,37	3,16944
6	7	57	90,24	89,04	3,26726

Tabla 30: Pasos utilizados en la test de regresión, del modelo de Erosión de la Provincia de Limarí.

Nota:

Método: Selección Hacia Atrás

F para Introducir: 4.0

F para Eliminar: 4.0

• Resultados Modelo Sedimentación

Variable (s)	
Dependiente	Independiente (s)
S	MTpp
	IT
	MTpp*IT
	MTpp/IT
	IT/MTpp
	MTpp ^{IT}
	IT ^{MTpp}
	MTpp ²
	IT ²
	MTpp ³
	IT ³
	MTpp ^{1/2}
	IT ^{1/2}

Tabla 31: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Sedimentación en la Provincia de Limarí.

Donde:

S = Sedimentación.

IT = Intensidad promedio por tormenta.

MTpp = Monto total de precipitación por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
MTpp	-0,297163	0,0796952	-3,72875	0,0004
IT	4,02498	1,70297	2,36351	0,0215
IT ²	-0,306006	0,137654	-2,223	0,00301
IT ³	0,00737007	0,00351387	2,09742	0,0403
MTpp ^{1/2}	2,49806	0,619185	4,03443	0,0002
IT ^{1/2}	-5,93033	2,63945	-2,2468	0,0285

Tabla 32: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Sedimentación en la Provincia de Limarí.

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	417,112	6	69,5187	20,18	0,0000
Residuo	199,785	58	3,44458		
Total	616,897	64			

Tabla 33: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Sedimentación en la Provincia de Limarí.

Paso	Variable (s)	G. L.	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	CME
0	13	51	72,98	66,10	3,26793
1	12	52	72,98	66,74	3,20594
2	11	53	72,94	67,32	3,14999
3	10	54	72,24	67,10	3,17169
4	9	55	71,37	66,69	3,21114
5	8	56	69,94	65,65	3,31105
6	7	57	68,68	64,84	3,38926
7	6	58	67,61	64,26	3,44458

Tabla 34: Pasos utilizados en la test de regresión, del modelo de Sedimentación de la Provincia de Limarí.

• **Resultados Modelo Erosión Neta**

Variable (s)	
Dependiente	Independiente (s)
EN	Imáx1h
	Imáx1h ²
	Imáx1h ³
	Imáx1h ^{1/2}

Tabla 35: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Erosión Neta en la Provincia de Limarí.

Donde:

EN = Erosión Neta

Imáx1h = Intensidad máxima de precipitación en 1 hora por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
Imáx1h	-0,481006	0,422829	-1,13759	0,2598
Imáx1h ²	0,00875953	0,00833139	1,05139	0,2973
Imáx1h ³	-0,0000533761	0,0000501309	-1,06473	0,2913
Imáx1h ^{1/2}	2,03796	1,08908	1,87126	0,0662

Tabla 36: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Erosión Neta en la Provincia de Limarí.

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	441,676	4	110,419	7,56	0,0001
Residuo	8,76,766	60	14,6128		
Total	1318,44	64			

Tabla 37: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Erosión Neta en la Provincia de Limarí.

Variable (s)		
Dependiente	Independiente (s)	
Sm	MTpp	IT^{MTpp}
	IT	$IT^{Imáx1h}$
	MTpp*IT	$Imáx1h^{MTpp}$
	MTpp*Imáx1h	$Imáx1h^{IT}$
	Imáx1h*IT	$MTpp^2$
	MTpp/IT	IT^2
	MTpp/ Imáx1h	$Imáx1h^2$
	IT/MTpp	$MTpp^3$
	IT/Imáx1h	IT^3
	Imáx1h/MTpp	$Imáx1h^3$
	Imáx1h/IT	$MTpp^{1/2}$
	$MTpp^{IT}$	$IT^{1/2}$
	$MTpp^{Imáx1h}$	$Imáx1h^{1/2}$

Tabla 38: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Suelo Movilizado en la Provincia de Limarí.

Donde:

Sm = Suelo movilizado.

MTpp = Monto total de precipitación por tormenta.

IT = Intensidad promedio por tormenta.

Imáx1h = Intensidad máxima de precipitación en 1 hora por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
MTpp	-2,68894	0,254395	-10,5699	0,0000
MTpp*Imáx1h	-0,00168482	0,000724157	-2,3266	0,0235
$Imáx1h^{MTpp}$	0,0	0,0	3,54688	0,0008
$MTpp^2$	0,0669524	0,0093178	7,18543	0,0000
$MTpp^3$	-0,000758236	0,000132179	-5,73642	0,0000
$MTpp^{1/2}$	9,12906	0,566035	16,1281	0,0000

Tabla 39: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Suelo Movilizado en la Provincia de Limarí.

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	3611,56	6	601,927	290,14	0,0000
Residuo	120,328	58	2,07463		
Total	3731,89	64			

Tabla 40: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Suelo Movilizado en la Provincia de Limarí.

Paso	Variable (s)	G. L.	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	CME
0	0	64	0,0	0,0	58,3108
1	1	63	80,24	79,93	11,7034
2	2	62	91,25	90,96	5,26977
3	3	61	94,66	94,39	3,26983
4	4	60	96,00	95,74	2,48634
5	5	59	96,47	96,18	2,2298
6	6	58	96,78	96,44	2,07463

Tabla 41: Pasos utilizados en la test de regresión, del modelo de Suelo Movilizado de la Provincia de Limarí.

Nota:

Método: Selección Hacia Adelante

F para Introducir: 4.0

F para Eliminar: 4.0

ANEXO IV

A continuación se presentan los resultados de los test de regresión y análisis de varianza, utilizados para determinar los modelos de Erosión, Sedimentación y Erosión Neta, Suelo Movilizado en la Provincia de Choapa, Región de Coquimbo.

• **Resultados Modelo de Erosión**

Variable (s)		
Dependiente	Independiente (s)	
E	MTpp	IT ^{MTpp}
	IT	IT ^{Imáx1h}
	Imáx1h	Imáx1h ^{MTpp}
	MTpp*IT	Imáx1h ^{IT}
	MTpp*Imáx1h	MTpp ²
	Imáx1h*IT	IT ²
	MTpp/IT	Imáx1h ²
	MTpp/Imáx1h	MTpp ³
	IT/MTpp	IT ³
	IT/Imáx1h	Imáx1h ³
	Imáx1h/ MTpp	MTpp ^{1/2}
	Imáx1h/IT	IT ^{1/2}
	MTpp ^{IT}	Imáx1h ^{1/2}
	MTpp ^{Imáx1h}	

Tabla 42: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Erosión en la Provincia de Choapa.

Donde:

E = Erosión.

MTpp = Monto total de precipitación por tormenta.

IT = Intensidad promedio por tormenta.

Imáx1h = Intensidad máxima de precipitación en 1 hora por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
MTpp	-0,0846519	0,0207698	4,07572	0,0002
MTpp ²	1,35521	0,150425	9,00924	0,0000

Tabla 43: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Erosión en la Provincia de Choapa.

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	1141,41	2	570,704	193,67	0,0000
Residuo	153,23	52	2,94673		
Total	1294,64	54			

Tabla 44: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Erosión en la Provincia de Choapa.

Paso	Variable (s)	G. L.	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	CME
0	0	54	0,0	0,0	23,9748
1	1	53	84,38	84,09	3,81471
2	2	52	88,16	87,71	2,94673

Tabla 45: Pasos utilizados en la test de regresión, del modelo de Erosión de la Provincia del Choapa.

Nota:

Método: Selección Hacia Adelante

F para Introducir: 4.0

F para Eliminar: 4.0

• **Resultados Modelo Sedimentación**

Variable (s)		
Dependiente	Independiente (s)	
S	MTpp	IT^{MTpp}
	IT	$IT^{Imáx1h}$
	Imáx1h	$Imáx1h^{MTpp}$
	MTpp*IT	$Imáx1h^{IT}$
	MTpp*Imáx1h	$MTpp^2$
	Imáx1h*IT	IT^2
	MTpp/IT	$Imáx1h^2$
	MTpp/Imáx1h	$MTpp^3$
	IT/MTpp	IT^3
	IT/Imáx1h	$Imáx1h^3$
	Imáx1h/ MTpp	$MTpp^{1/2}$
	Imáx1h/IT	$IT^{1/2}$
	$MTpp^{IT}$	$Imáx1h^{1/2}$
	$MTpp^{Imáx1h}$	

Tabla 46: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Sedimentación en la Provincia de Choapa.

Donde:

S = Sedimentación.

MTpp = Monto total de precipitación por tormenta.

IT = Intensidad promedio por tormenta.

Imáx1h = Intensidad máxima de precipitación en 1 hora por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
MTpp*IT	-0,00979956	0,00350894	-2,79274	0,0073
$IT^{1/2}$	2,471	0,310365	7,85236	0,0000

Tabla 47: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Sedimentación en la Provincia de Choapa.

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	220,094	2	110,047	40,82	0,0000
Residuo	140,182	52	2,69581		
Total	360,275	54			

Tabla 48: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Sedimentación en la Provincia de Choapa.

Paso	Variable (s)	G. L.	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	CME
0	0	54	0,0	0,0	6,67177
1	1	53	55,25	54,41	3,04165
2	2	52	61,09	59,59	2,69581

Tabla 45: Pasos utilizados en la test de regresión, del modelo de Erosión de la Provincia del Choapa.

Nota:

Método: Selección Hacia Adelante

F para Introducir: 4.0

F para Eliminar: 4.0

• Resultados Modelo Erosión Neta

Variable (s)		
Dependiente	Independiente (s)	
EN	MTpp	IT^{MTpp}
	IT	$IT^{Imáx1h}$
	Imáx1h	$Imáx1h^{MTpp}$
	MTpp*IT	$Imáx1h^{IT}$
	MTpp*Imáx1h	$MTpp^2$
	Imáx1h*IT	IT^2
	MTpp/IT	$Imáx1h^2$
	MTpp/Imáx1h	$MTpp^3$
	IT/MTpp	IT^3
	IT/Imáx1h	$Imáx1h^3$
	Imáx1h/ MTpp	$MTpp^{1/2}$
	Imáx1h/IT	$IT^{1/2}$
	$MTpp^{IT}$	$Imáx1h^{1/2}$
	$MTpp^{Imáx1h}$	

Tabla 50: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Erosión Neta en la Provincia de Choapa.

Donde:

EN = Erosión Neta.

MTpp = Monto total de precipitación por tormenta.

IT = Intensidad promedio por tormenta.

Imáx1h = Intensidad máxima de precipitación en 1 hora por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
$MT_{pp}^{1/2}$	0,449838	0,0592759	7,58889	0,0000

Tabla 51: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Erosión Neta en la Provincia de Choapa.

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	378,902	1	378,902	57,59	0,0000
Residuo	348,696	53	6,57916		
Total	727,598	54			

Tabla 52: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Erosión Neta en la Provincia de Choapa.

Paso	Variable (s)	G. L.	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	CME
0	0	54	0,0	0,0	13,474
1	1	53	52,08	51,17	6,57916

Tabla 53: Pasos utilizados en la test de regresión, del modelo de Erosión Neta de la Provincia de Choapa.

Nota:

Método: Selección Hacia Adelante

F para Introducir: 4.0

F para Eliminar: 4.0

• Resultados Modelo Suelo Movilizado

Variable (s)		
Dependiente	Independiente (s)	
Sm	MT _{pp}	IT ^{MT_{pp}}
	IT	IT ^{Imáx1h}
	Imáx1h	Imáx1h ^{MT_{pp}}
	MT _{pp} *IT	Imáx1h ^{IT}
	MT _{pp} *Imáx1h	MT _{pp} ²
	Imáx1h*IT	IT ²
	MT _{pp} /IT	Imáx1h ²
	MT _{pp} /Imáx1h	MT _{pp} ³
	IT/MT _{pp}	IT ³
	IT/Imáx1h	Imáx1h ³
	Imáx1h/ MT _{pp}	MT _{pp} ^{1/2}
	Imáx1h/IT	IT ^{1/2}
	MT _{pp} ^{IT}	Imáx1h ^{1/2}
	MT _{pp} ^{Imáx1h}	

Tabla 54: Variables utilizadas para la determinación del modelo de Suelo Movilizado en la Provincia de Choapa.

Donde:

Sm = Suelo Movilizado.

MTpp = Monto total de precipitación por tormenta.

IT = Intensidad promedio por tormenta.

Imáx1h = Intensidad máxima de precipitación en 1 hora por tormenta.

Parámetro	Estimación	Error Estándar	Estadístico T	Valor P
MTpp	-0,140709	0,0276601	-5,08706	0,0000
MTpp ^{1/2}	2,06082	0,200327	10,2872	0,0000

Tabla 55: Resultados del test de regresión aplicado al modelo de Suelo Movilizado en la Provincia de Choapa.

Fuente	Suma de Cuad.	Grados de Lib.	Cuad. Medio	Razón F	Valor P
Modelo	2310,47	2	1155.23	221,05	0,0000
Residuo	271,76	52	5,226616		
Total	2582,23	54			

Tabla 56: Resultados del análisis de varianza aplicado al modelo de Suelo Movilizado en la Provincia de Choapa.

Paso	Variable (s)	G. L.	R ² (%)	R ² Ajust. (%)	CME
0	0	54	0,0	0,0	47,819
1	1	53	84,24	83,94	7,67932
2	2	52	89,48	89,07	5.22616

Tabla 57: Pasos utilizados en la test de regresión, del modelo de Suelo Movilizado de la Provincia de Choapa.

Nota:

Método: Selección Hacia Adelante

F para Introducir: 4.0

F para Eliminar: 4.0

