



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ingeniería -Programa de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con Mención
en Ingeniería Civil



Erosividad de la precipitación en el Norte Grande de Chile

Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería con
mención en Ingeniería Civil

BASTIÁN ALBERTO SÁEZ BRAVO
CONCEPCIÓN-CHILE
2019

Profesor Guía: José Vargas Baecheler
Dpto. de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería
Universidad de Concepción

RESUMEN

El extremo norte de Chile (latitud 17° S a 29° S) presenta características de zonas áridas, donde la precipitación es generalmente convectiva con alta variabilidad espacial y temporal, lo que incide en el desarrollo de inundaciones con gran cantidad de sedimentos debido a la erosión hídrica. El factor de mayor importancia en los procesos erosivos en zonas áridas corresponde a la erosividad, que se puede cuantificar mediante el factor R de la ecuación revisada de pérdida de suelo (RUSLE según sus iniciales en inglés), pero requiere datos con alta resolución temporal (precipitación cada 30 minutos) que generalmente tienen baja cobertura espacial. Frente a esto, generalmente se usa una relación establecida en otro lugar, pero no se asegura un buen desempeño por lo que el objetivo de este estudio fue evaluar diferentes modelos de regresión del factor R usando índices de agresividad de precipitación como variable predictiva.

Se realizaron estimaciones de la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) usando la intensidad máxima horaria, que sirven para calcular el factor R en nueve estaciones con 10 años de registro continuo. Se establecieron cuatro modelos de regresión para cada uno de los seis indicadores en estudio, y se seleccionó una relación mediante una validación usando 13 estaciones con unos pocos años de registro continuo. La ecuación seleccionada sirve para generar 103 valores de R distribuidos espacialmente, que luego sirvieron para realizar una interpolación mediante *co-kriging* para analizar espacialmente la erosividad de la precipitación.

Los resultados mostraron que existen subestimaciones de I_{30} , que se explican por la diferencia entre intensidad horaria e intensidad en una hora, sin embargo, se consideran aceptables dado la eficiencia obtenida (Nash-Sutcliffe=0.787). El factor R calculado permitió seleccionar la ecuación potencial, que usa la precipitación media anual como predictor ($R=0.785P^{1.002}$). La relación seleccionada permitió estimar el factor R en las 103 estaciones, oscilando entre 0.358 y 341.034 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹. Por último, se evidenció que la distribución espacial del factor R es explicado por el patrón pluviométrico; mayores valores en el Altiplano debido a las precipitaciones de tipo convectiva y gradiente de aumento en el sentido noroeste a causa del efecto orográfico. Esto revela que el comportamiento pluviométrico a escala anual puede ser un indicador para encontrar zonas susceptibles a *mudflows*, y no se requeriría mayor resolución en la medición de la precipitación.

AGRADECIMIENTOS

Primero, expreso mis agradecimientos a mi profesor guía José Vargas Baecheler, que durante los últimos años me ha colaborado y me ha guiado en el desarrollo de la investigación.

Por otro lado, deseo agradecer a mi familia; madre, padre y hermana, por el apoyo y ayuda que me brindaron para concretar mis metas.

Por último, agradezco a la Universidad de Concepción, por los increíbles años de aprendizaje y experiencias.



ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	ii
ÍNDICE DE TABLAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	1
1.2 Hipótesis	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodología de trabajo	3
1.5 Organización de la tesis	4
CAPÍTULO 2 ÍNDICES DE AGRESIVIDAD Y EROSIVIDAD DE LA PRECIPITACIÓN	5
2.1 Introducción	5
2.2 Índices de agresividad de la precipitación	5
2.3 Factor R.....	7
2.4 Conclusiones	9
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	10
3.1 Introducción	10
3.2 Área de estudio	10
3.3 Base de datos.....	11
3.4 Estimación de intensidad máxima de precipitación en 30 minutos	13
3.5 Relaciones de estimación del factor R.....	15
3.6 Distribución espacial de la erosividad de la precipitación.....	16
3.7 Conclusiones	17
CAPÍTULO 4 RESULTADOS	19
4.1 Introducción	19

4.2	Estimación de la intensidad máxima en 30 minutos y de la erosividad por evento.....	19
4.3	Estimación del factor R.....	22
4.4	Distribución espacial de la erosividad de la precipitación.....	25
4.5	Conclusiones.....	27
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES		29
REFERENCIAS		31
ANEXOS		35
ANEXO 4.3 Valores del factor R en estaciones en estudio		35
ANEXO 4.4 Valores del factor R calculado a partir de la relación seleccionada		36



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Características de estaciones pluviométricas de CODELCO	12
Tabla 3.2 Modelos de regresión usados en este estudio	16
Tabla 4.1 Análisis de los eventos registrados en las estaciones pertenecientes a CODELCO.....	19
Tabla 4.2 Indicadores de desempeño de las estimaciones de I_{30} y EI_{30}	21
Tabla 4.3 Características de los modelos de regresión con mejor desempeño	22
Tabla 4.4 Indicadores de desempeño de los modelos del factor R aplicado a 13 estaciones DGA	23
Tabla A.4. 1 Factor R calculado en las nueve estaciones CODELCO	35
Tabla A.4.2 Factor R calculado en las 13 estaciones DGA.....	35
Tabla A.4.3 Factor R calculado partir de la relación potencial en las 103 estaciones en estudio.	36



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Área de estudio.....	11
Figura 3.2 Distribución espacial estaciones pluviométricas.....	13
Figura 3.3 Ejemplo de ajuste de intensidad máxima	14
Figura 4.1 Comparación entre I_{30} estimada e I_{30} medida	20
Figura 4.2 Comparación entre EI_{30} estimada e EI_{30}	21
Figura 4.3 Comparación entre E calculada con datos de precipitación horaria y E con mediciones de precipitación intra-horarias	21
Figura 4.4 Relación entre factor R y precipitación anual promedio en nueve estaciones CODELCO	23
Figura 4.5 Relación entre factor R y precipitación anual promedio en nueve estaciones DGA ...	24
Figura 4.6 Relación entre factor R y longitud (grados)	25
Figura 4.7 Relación entre factor R y latitud (grados)	26
Figura 4.8 Distribución espacial del factor R	27
Figura 4.9 Distribución espacial del factor R con método de las rupturas naturales	27

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Las zonas áridas e hiperáridas representan el 17.2 % de la superficie terrestre y se encuentra alrededor del 5% de la población mundial. Estas áreas se caracterizan por precipitación escasa, evapotranspiración potencial alta, que se evidencia con el índice de aridez, y escasa cubierta vegetal con desigual distribución espacial. La precipitación es variable espacial y temporalmente, lo que incide en la disponibilidad del recurso hídrico para la población, y también se considera uno de los riesgos, ya que los eventos extremos de precipitación en combinación con las fuertes pendientes con suelo desnudos generan grandes inundaciones, que a menudo se acompañan de fenómenos como deslizamientos de tierra y flujos de lodo, que pueden producir pérdidas humanas y daños en infraestructura.

El escurrimiento contiene importante cantidad de sólidos debido a la erosión generada por las tormentas convectivas en las zonas altas. Los procesos erosivos dependen de factores como el clima, relieve, tipo de suelo y antrópicos, y se puede agrupar en erosionabilidad y erosividad, siendo de mayor importancia este último en zonas áridas. Para cuantificar la erosividad se usa un índice que considera la energía cinética; factor R de la *Revised Universal Soil Loss Equation* (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada; RUSLE según sus iniciales en inglés) (Lobo y Bonilla, 2015) que requiere datos de precipitación cada 30 minutos, pero cuya información rara vez está disponible con buena cobertura espacial.

Para estimar la erosividad se han establecido modelos de regresión, generalmente lineales y potenciales. Preferentemente se han usado índices de agresividad, ya que han sido formulados para evaluar erosión hídrica y también, montos de precipitación, ya que es un dato que generalmente se encuentra disponible (Renard y Freimund, 1994; Petkovšek y Mikoš, 2004; Hernando y Romana, 2016).

El Norte Grande de Chile, ubicado entre los 17 y 30°S, se considera una zona hiperárida desde el nivel del mar hasta los 3500 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) y contiene el denominado

desierto más árido del mundo; Atacama. La precipitación media anual en las ciudades costeras no supera los 3 mm/año, pero va aumentando hacia el altiplano debido a la convección húmeda que generan eventos en pequeñas áreas. Este régimen provoca la existencia de muchos ríos efímeros, en ocasiones denominados *wadis* (Sen, 2008), que esporádicamente han generado escurrimientos aluviales de gran magnitud que han afectado ciudades como Antofagasta, Calama y Chañaral.

Pese a la existencia de ciertos estudios existe poca síntesis y marcos conceptuales confiables para la comprensión de los procesos que se desarrollan, sin embargo, se cuenta con una red de monitoreo relativamente buena por lo que se puede lograr avances en la interpretación de la hidrología del Norte Grande de Chile (Houston, 2006).

Un paso importante para realizar avances científicos en esta zona es calcular el factor erosividad, ya que corresponde a un indicador de la erosión hídrica, y según Diodato y Soriano (2014) está involucrado en múltiples eventos hidrológicos dañinos como por ejemplo *mudflows* y contaminación no puntual.

Bajo este contexto, el objetivo de este estudio es evaluar modelos de regresión del factor de erosividad de la precipitación respecto a índices de agresividad, que servirán para analizar el comportamiento espacial de la erosividad en el Norte Grande de Chile.

1.2 Hipótesis

El uso de índices de precipitación permite estimar el factor de erosividad de la precipitación mediante modelos de regresión que presenten coeficiente de correlación de Pearson sobre 0.8.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el factor de erosividad de la precipitación del Norte Grande de Chile usando índices de precipitación.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Estimar la intensidad máxima de precipitación en 30 minutos mediante funciones que requieren datos horarios.
- b) Identificar el modelo de regresión que presente mejor desempeño al estimar el factor de erosividad de la precipitación.
- c) Analizar el comportamiento espacial del factor de erosividad de la precipitación en el Norte Grande de Chile.

1.4 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo se estructura en tres etapas, que se describen a continuación:

- a) Estimación de intensidad máxima de precipitación: Se usaron siete relaciones que estiman la intensidad máxima en un tiempo t . Se calcularon los parámetros para cada evento mediante mínimos cuadrados no lineales y se seleccionó la relación con el criterio de R^2_{ajustado} . Finalmente se compararon intensidad máxima en 30 minutos y erosividad por evento para evaluar el desempeño de las estimaciones.
- b) Relaciones de estimación del factor R: Se calculó el factor R en nueve estaciones que presentaron mediciones continuas en los últimos 10 años. Luego se derivaron cuatro modelos de regresión usando seis índices de precipitación, que fueron evaluados por indicadores de desempeño. Finalmente se utilizaron 13 estaciones que presentaron mediciones continuas con pocos años de datos, para validar y seleccionar la relación para estimar el factor R.

c) Distribución espacial de la erosividad de la precipitación: Se usó la relación seleccionada para calcular el factor R en las 103 estaciones en estudio. Se realizaron gráficas del factor R para analizar las variaciones espaciales en torno a la latitud y longitud. Por otro lado, la información puntual sirvió para realizar interpolación mediante *co-kriging*, que ayudó a generar un mapa isoerodente y un mapa con cortes de clases mediante rupturas naturales.

1.5 Organización de la tesis

El informe se estructuró en 5 capítulos. En el primer capítulo se presenta el problema a investigar, hipótesis del trabajo, objetivos y un esbozo de la metodología. En el segundo se describen índices de agresividad de precipitación y se presenta el factor de erosividad promedio de la precipitación. En el tercero se caracteriza el área de estudio, se identifica la base de datos de precipitación utilizada y se presenta el procedimiento para abordar la metodología; estimación máxima de intensidad máxima de precipitación, relaciones de estimación del factor R y distribución espacial de la erosividad. En el cuarto capítulo se presentan los principales resultados, incluyendo el análisis en torno a las estimaciones de intensidad máxima y estimaciones del factor R mediante relaciones. Finalmente, en el último capítulo se presentan las conclusiones y futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO 2 ÍNDICES DE AGRESIVIDAD Y EROSIVIDAD DE LA PRECIPITACIÓN

2.1 Introducción

En este capítulo se describen los índices de agresividad de precipitación; objetivos planteados en su formulación, datos que requieren y forma de cuantificarlos. Además, se presenta el factor de erosividad de precipitación, en torno a sus consideraciones de cálculo.

2.2 Índices de agresividad de la precipitación

Existen índices de agresividad que se formularon con el fin de estudiar la erosividad de la precipitación y el transporte de sedimentos. Estos índices, que dependen de la concentración y cantidad de precipitación, tienen como resultado una lámina de precipitación, en mm. A continuación, se presenta los índices considerados en este estudio

2.2.1 Índice de Fournier

Fournier (1960) encontró una alta correlación entre la erosión anual y el coeficiente de distribución de precipitación, más conocido como índice de Fournier (Ecuación 2.1).

$$IF_j = \frac{P_{\max_j}^2}{P_j}, \quad (2.1)$$

Donde P_{\max_j} es la precipitación máxima mensual dentro del año j en mm, P_j es la precipitación anual del año j en mm e IF_j corresponde al valor del índice del año j en mm.

2.2.2 Índice modificador de Fournier

Dado que el índice de Fournier no considera las tormentas fuera del mes con más alta precipitación mensual, Arnoldus (1977) propuso una modificación para considerar las tormentas que ocurren en todo el año, denominado índice modificado de Fournier (IMF):

$$\text{IMF}_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} P_{ij}^2}{P_j}, \quad (2.2)$$

Donde P_{ij} corresponde a la precipitación del mes i en el año j (mm), P_j es la precipitación anual del año j en mm e IMF_j es el valor del índice del año j en mm.

2.2.3 Índice de erosividad total

El índice de erosividad total (IET), propuesto por Vega y Febles (2008), combina el MFI con el índice de concentración de precipitación (PCI), que corresponde a un indicador que evalúa la distribución de la precipitación mensual (Oliver, 1980). Se cuantifica según la Ecuación 2.3.

$$\text{IET}_j = \text{IMF}_j \cdot \frac{100}{P_j^2} \sum_{i=1}^{12} P_{ij}^2, \quad (2.3)$$

Donde P_{ij} corresponde a la precipitación del mes i en el año j (mm), P_j es la precipitación anual del año j en mm, IMF_j es el valor del índice del año j e IET_j es el valor del índice de erosividad total del año j en mm.

2.2.4 Otros índices

Existen otros índices que se basan en el índice modificado de Fournier; como lo es índice de Ferro (F_F), propuesto por Ferro *et al.* (1991), que considera la distribución de precipitación mensual y se calculó según la Ecuación 2.3, y también se tiene el índice modificado de Fournier Maule (IMFM), que según Pizarro *et al.* (2008) corresponde a un indicador que pretende explicar la variación de las precipitaciones anuales con respecto a su promedio anual (Ecuación 2.5).

$$F_F = \frac{P_m}{12} \left[\frac{\sum_{j=1}^N P_j (1 + CV^2(p_{i,j}))}{\sum_{j=1}^N P_j} \right], \quad (2.4)$$

$$IMFM_j = \frac{(\sum_{i=1}^{12} P_{ij})^2}{P_m}, \quad (2.5)$$

Donde P_m es la precipitación media anual (mm) en los N años de estudio, $CV(p_{i,j})$ se refiere al coeficiente de variación de la precipitación mensual, P_j es la precipitación anual del año j en mm, P_{ij} es la precipitación del año i en el año j , F_F corresponde al índice de Ferro ponderado en los N años (mm) e $IMFM_j$ es el índice modificado de Fournier Maule del año j en mm.

2.3 Factor R

El modelo RUSLE preparado por la USDA-Agricultural Research Service (Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de Estados Unidos) (Foster, 2008) considera el factor R , denominado factor de erosividad promedio de la precipitación ($MJ \text{ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$). Foster *et al.* (2003) indican que se requieren 15 años de datos para obtener una estimación razonable del factor R con el fin de captar la variabilidad anual de la erosividad. Se calcula el factor R según lo establecido por Renard *et al.* (1997) (Ecuación 2.6).

$$R = 1/n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^m (EI_{30})_k, \quad (2.6)$$

Donde n es el número de años, m es el número de eventos erosivos de cada año j , EI_{30} es el índice de erosividad de precipitación de un evento k . La erosividad de un evento EI_{30} ($MJ\ mm\ ha^{-1}\ h^{-1}$) se calcula según la Ecuación 2.7.

$$EI_{30} = \left(\sum_{r=1}^t e_r v_r \right) I_{30}, \quad (2.7)$$

Donde t corresponde al número de partes que queda dividido el evento, E es la energía cinética ($MJ\ ha^{-1}$), I_{30} es la intensidad máxima en 30 minutos, e_r es la energía cinética de la precipitación por unidad de profundidad de lluvia por unidad de área ($MJ\ ha^{-1}\ mm^{-1}$) y v_r es el volumen de precipitación durante el período r .

La energía cinética de la precipitación e_r fue calculado según la ecuación 2.8, presentada en la *Revised Universal Soil Loss Equation Version 2* (RUSLE2), que corresponde a la última actualización e incorpora un *software* que resuelve las ecuaciones (Foster, 2008), y que reemplazó las relaciones presentadas en el *Agricultural Handbook No.537* (Wischmeier y Smith, 1978).

$$e_r = 0.29[1 - 0.72 \exp(-0.082i_r)], \quad (2.8)$$

Donde i_r es la intensidad de precipitación ($mm\ h^{-1}$) en el lapso r .

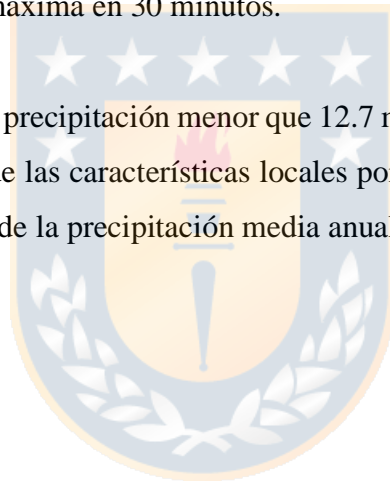
Para la consideración de eventos erosivos se deben omitir los eventos de menos de 12.7 mm de precipitación, además se usa un período de 6 horas con menos de 1.3 mm para dividir en dos tormentas (Wischmeier y Smith, 1978). McGregor *et al.* (1995) demostraron que la inclusión de eventos menores que 12.7 mm incrementan el factor de erosividad en menos de un 5%, pero se deben considerar las características locales de la precipitación para decidir la inclusión o exclusión de los eventos.

2.4 Conclusiones

Existen índices de agresividad que valoran la cantidad de precipitación y la forma en que se distribuyen en el tiempo. Tienen su origen en el índice de Fournier, que requiere datos de precipitación mensual y correlaciona bien con la erosión anual. Los otros índices en estudio presentan diferentes configuraciones para cuantificarlos, pero tienen la misma finalidad que el índice de Fournier y requieren idénticos datos de entrada.

El denominado Factor R corresponde a la erosividad promedio de la precipitación, ponderada en los suficientes años para captar la variabilidad anual. Este depende de la intensidad de precipitación mientras se desarrolla el evento y del volumen agua caída, pero fundamentalmente su cálculo queda sujeto al valor de intensidad máxima en 30 minutos.

Se mostró que los eventos con precipitación menor que 12.7 mm tienen poca incidencia en el factor de erosividad, pero depende de las características locales por lo que se concluye que la exclusión de estos eventos en zonas donde la precipitación media anual es baja no es recomendable.



CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En este capítulo se presenta la zona de estudio y la información de precipitación utilizada. Se detalla los procedimientos de análisis en el que se enmarca la metodología; que incluye la estimación de intensidad máxima en 30 minutos, las relaciones de estimación del factor de R y la distribución espacial de la erosividad.

3.2 Área de estudio

El área de estudio corresponde al denominado Norte Grande de Chile, que comprende las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama, que se ubican entre las latitudes 17.5° S y 29.3° S. Queda delimitado al norte por Perú, al oeste por el Océano Pacífico, al este por Argentina y Bolivia, y al sur por la región chilena de Coquimbo. En la Figura 3.1 se evidencia el área de estudio dentro de Sudamérica y se muestra el modelo de elevación digital.

El norte de Chile se puede dividir en tres unidades morfológicas; la cordillera de la Costa, que se ubica al oeste con cumbres que entre los 1500 y 2500 msnm, la depresión central, que consiste en una franja de ~50 km que tiene una elevación de ~1000 m en el oeste y entre 2000 y 3000 m en el este, y la cordillera de los Andes, que se ubica al este y alcanza una elevación por sobre los 4000 msnm en el Altiplano, que corresponde una franja de 200 km de largo que separa la cordillera oriental y occidental (Carretier *et al.*, 2018).

Tres factores contribuyen a la aridez presente en el área de estudio: la circulación atmosférica (*Hadley*) genera una banda subtropical de alta presión que reduce significativamente la precipitación frontal, la proximidad a la cordillera de los Andes inhibe la advección de humedad del este, creando una sombra de precipitación; y la corriente de *Humboldt* inhibe la capacidad de humedad de los vientos costeros por lo que cualquier humedad del Pacífico queda atrapada bajo los 800 msnm (Houston, 2006).

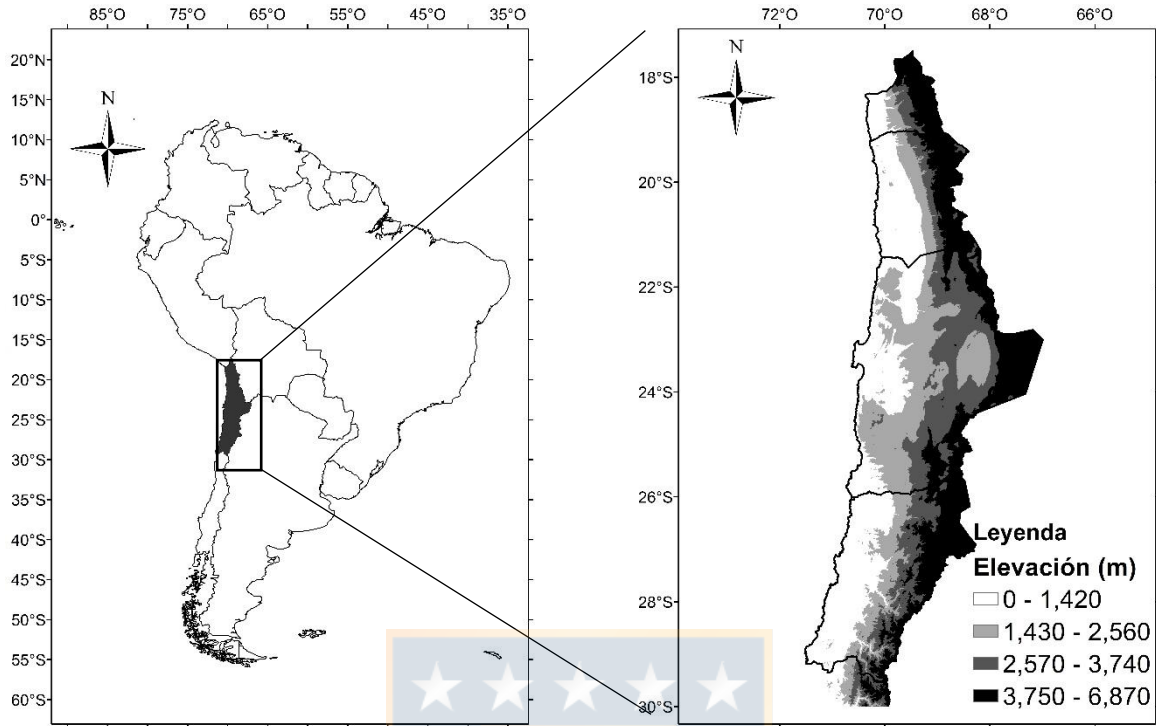


Figura 3.1 Área de estudio. La escala de grises del recuadro de la derecha muestra el modelo de elevación digital.

El régimen pluviométrico se debe principalmente a los flujos de aire que traen precipitación convectiva de la Amazonia (Houston y Hartley, 2003). La precipitación se presenta con mayor frecuencia e intensidad ente la tarde y la noche, y es producida por la radiación que calienta la superficie desestabilizando la troposfera inferior. Estas tormentas presentan una fluctuación asociados a ciclos diarios y anuales, pero están restringidas al verano austral (Noviembre a Marzo), donde el 70% de la precipitación ocurre entre Diciembre y Febrero (Garreaud *et al.*, 2003).

3.3 Base de datos

La información de precipitación usada en este estudio fue obtenida de la Corporación Nacional del Cobre (CODELCO) y la Dirección General de Aguas (DGA). CODELCO tiene estaciones que miden variables meteorológicas cada una hora en sus divisiones mineras; Chuquicamata y El

Salvador, mientras que DGA presenta una cantidad considerable de estaciones ya que corresponde a la entidad gubernamental encargada de proveer una red de medición hidrometeorológica.

Se seleccionaron las estaciones que presenten registro continuo durante los últimos 10 años resultando un total de 103, que corresponden a 94 estaciones de la DGA, de las cuales solo 13 presentan algunas mediciones con discretización horaria, y nueve de CODELCO, de las cuales en tres se cuentan con ciertos años con intervalos de medición menor a una hora (5 y 15 minutos). En la Tabla 3.1 se muestra las características de las nueve estaciones CODELCO, mientras que en la Fig. 2 se muestra la ubicación de todas las estaciones en estudio.

Tabla 3.1 Características de estaciones pluviométricas de CODELCO

Nombre estación	Latitud	Longitud	Elevación (m)	Precipitación anual promedio (mm)
Ollagüe	21°15' S	68°15' O	3756	49.9
Ojos San Pedro	21°56' S	68°17' O	3757	68.4
Pampa Puno	21°17' S	68°46' O	4070	49.6
Talabre	22° 20' S	68°40' O	2592	2.5
CAP	26°25' S	69°30' O	2600	18.1
Chañaral	26°19' S	70°36' O	25	10.7
Cine Inca	26°14' S	69° 37' O	2260	20.0
Pampa Austral Norte	26°13' S	70°04' O	950	11.7
Pampa Austral Sur	26°21' S	70°03' O	930	12.2

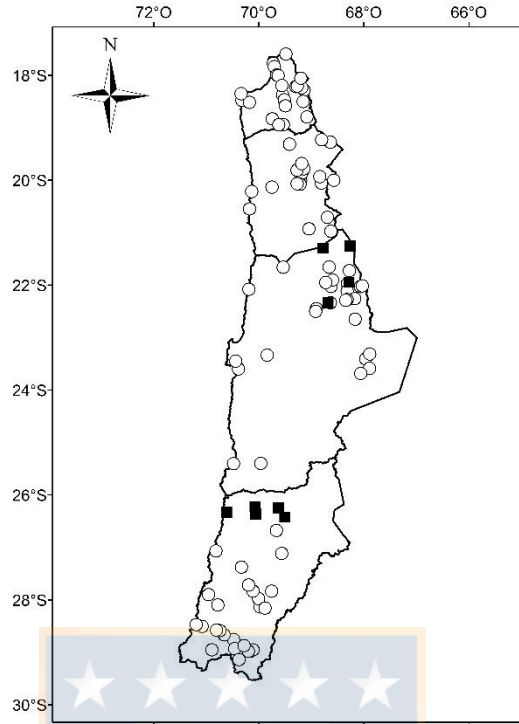


Figura 3.2 Distribución espacial estaciones pluviométricas. Los cuadrados muestran las estaciones pertenecientes a CODELCO y los círculos las estaciones de la DGA.

3.4 Estimación de intensidad máxima de precipitación en 30 minutos

La estimación de la erosividad requiere la intensidad máxima en 30 minutos (I_{30}) para cada evento. Desafortunadamente este dato pocas veces es medido, y si lo fuera, no se encuentra con buena cobertura espacial y extensión temporal. Se decidió estimar I_{30} a través datos horarios ajustando funciones que determinan la intensidad máxima en un tiempo t (García-Bartual y Schneider, 2001), que se presentan desde la Ecuación 3.1 a Ecuación 3.7.

$$i_{\max}(t) = \frac{a}{t^b}, \tag{3.1}$$

$$i_{\max}(t) = \frac{a}{t + b}, \tag{3.2}$$

$$i_{\max}(t) = a - b * \ln(t), \tag{3.3}$$

$$i_{\max}(t) = a * b^{\frac{28^{0.1} - t^{0.1}}{0.4}}, \tag{3.4}$$

$$i_{\max}(t) = \frac{a}{c + t^b}, \tag{3.5}$$

$$i_{\max}(t) = a + \frac{b}{t + c}, \tag{3.6}$$

$$i_{\max}(t) = \frac{a}{c * t + b}, \tag{3.7}$$

Donde i_{\max} corresponde a la intensidad máxima (mm h^{-1}) en el tiempo t (h^{-1}), mientras que a , b , y c , si corresponde, son los parámetros para cada uno de los eventos, que fueron ajustados mediante mínimos cuadrados no lineales usando datos de intensidad máxima desde 1 a 4 horas. Un ejemplo de los ajustes se presenta en la Figura 3.3.

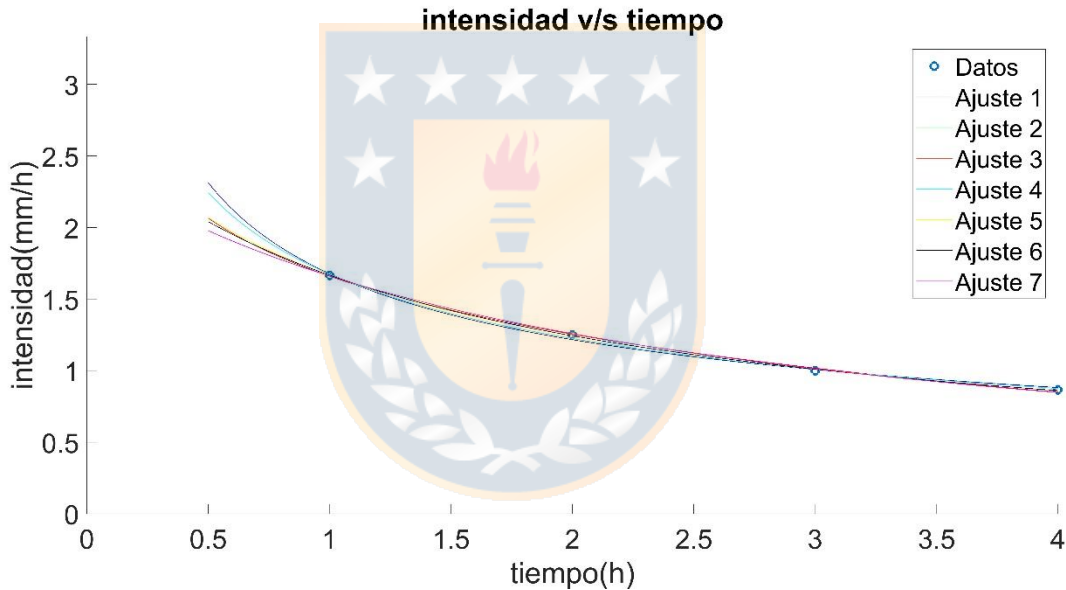


Figura 3.3 Ejemplo de ajuste de intensidad máxima. Los círculos indican las intensidades medidas y las líneas continuas muestran los siete ajustes estudiados.

Se calculó el coeficiente determinación R^2_{ajustado} entre intensidad máxima medida e intensidad máxima estimada para cada evento y para cada ajuste, con el fin de seleccionar la función que exhibió mejor desempeño. Luego, se estimó la intensidad máxima de precipitación en 30 minutos, prestando atención que estuviese acotada entre intensidad máxima horaria (I_{60}) y dos veces este valor. Si resultaba fuera del rango correspondería a una circunstancia físicamente imposible, ya que, por ejemplo, si precipitan 2 mm en una hora la cota superior de la intensidad máxima en 30

minutos es de 4 mm/h, que corresponde si los 2 mm precipitados dentro de la hora se concentran solo en 30 minutos, mientras que la intensidad máxima en 30 minutos estaría acotada inferiormente por 2 mm/h, que corresponde a la situación que la intensidad fuese constante dentro de la hora. En el caso que I_{30} estuviese fuera del rango se prefirió usar la siguiente función que presentó mejor ajuste según R^2_{ajustado} .

Con la estimación de I_{30} para cada uno de las tormentas se calculó la erosividad (EI_{30}) para cada evento.

Se usaron las tres estaciones (Puno, Ojos San Pedro y Ollagüe) que registraron tormentas con lapso menor a una hora para evaluar el desempeño de las estimaciones a través del *Root Mean Squared Error* (error cuadrático medio; RMSE según sus iniciales en inglés) y la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS) (Nash y Sutcliffe, 1970), que indica que tan cerca están los valores predichos de la línea de mejor ajuste pero a diferencia del R^2 , no se ve afectado por valores atípicos (*outlier*) (Angulo-Martínez y Beguería, 2009).

3.5 Relaciones de estimación del factor R

Para la cuantificación del factor R se requiere 15 años de datos, tal como se menciona en la sección 2.3, pero dada la base de datos, los 10 años se consideró aceptable para captar la variabilidad anual del factor de erosividad. Además, se decidió modificar el criterio de consideración de eventos erosivos; incluyendo todas las tormentas que registren una precipitación total mayor a 1.27 mm, que corresponde a un 10% del umbral estudiado por McGregor *et al.* (1995).

Se calculó el factor R para las nueve estaciones CODELCO usando la estimación de EI_{30} , luego se procedió a derivar modelos de regresión, que resulta más conveniente que aplicar relaciones establecidas en otros lugares, ya que no se garantiza que se ajusten con buen desempeño (Lastoria *et al.*, 2008). Los modelos de regresión se establecieron usando los índices de agresividad definidos en la sección 2.2; índice de Fournier (IF), índice modificado de Fournier (IMF), índice de erosividad total (IET), índice de Ferro (F_F) y índice modificado de Fournier Maule (IMFM).

Además, se incluyó la precipitación anual promedio (P), ya que se considera un buen indicador del factor de erosividad (Bonilla y Vidal, 2011).

Usando los seis indicadores ponderados en los 10 años de estudio se ajustaron cuatro curvas con modelos de regresión de la forma $R=f(I)$, generando 24 expresiones para estimar el factor R. En la Table 2 se muestra los modelos analizados, donde los parámetros a, b y c se ajustaron con mínimos cuadrados no lineales.

Tabla 3.2 Modelos de regresión usados en este estudio

Tipo	Modelo de regresión	Referencia
Lineal	$R = a * I$	Renard y Freimund (1994)
Lineal (2p)	$R = a + b * I$	Hernando y Romana (2016)
Quadratic	$R = a + b * I + c * I^2$	Renard y Freimund (1994)
Potential	$R = a * I^b$	Ferro y Porto (1999)

Para evaluar el desempeño de los ajustes se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson (r), el error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación $R^2_{ajustado}$, que a diferencia del R^2 , considera el tamaño muestral (Fox, 1997), que en este caso resultan ser nueve.

Las 13 estaciones DGA que presentan mediciones con discretización horaria no pueden ser utilizadas para calcular el factor R y el posterior ajuste de relaciones dada su baja extensión temporal, pero sí se utilizaron para validar los tres relaciones que presentaron mejor desempeño. Se usó el mismo procedimiento establecido para las estaciones CODELCO, pero el número de años considerados fueron entre tres y seis. Para la validación se usaron los mismos indicadores de desempeño; RMSE y $R^2_{ajustado}$.

3.6 Distribución espacial de la erosividad de la precipitación

Se usó el modelo de regresión validado para estimar el factor R en las 103 estaciones en estudio. Primero, se generaron gráficas del factor R versus la longitud y latitud para encontrar correlaciones y/o variaciones espaciales (Da Silva, 2004).

La información puntual del factor R sirvió para realizar una interpolación mediante la herramienta geoestadística del *co-kriging*, que según Qin *et al.* (2016) es el método más apropiado para calcular la distribución espacial de la erosividad de la precipitación, lo que es esperable en la zona de estudio, ya que una variable secundaria como la elevación mejoraría la interpolación dado el patrón pluviométrico, afectado por el efecto orográfico.

Se generó un mapa isoerodente y también un mapa para visualizar el comportamiento espacial mediante cortes de clase usando el método de rupturas naturales (*Jenks*), que máxima la diferencia entre clases y minimiza la variación dentro de las clases (Smith, 1986).

3.7 Conclusiones

El área de estudio se caracteriza por ser una zona árida debido a la circulación atmosférica, a la proximidad con los Andes y a la corriente *Humboldt*. Esto se traduce en bajos montos de precipitación, pero debido a la circulación desde la Amazonia se generan tormentas importantes en el verano austral.

Se encontraron dos fuentes de información de precipitación: CODELCO y DGA. Se seleccionaron nueve estaciones CODELCO, que midieron de manera horaria durante los últimos 10 años, y 94 estaciones pertenecientes a la DGA, de las cuales 13 presentaron mediciones horarias en algunos años. Se concluye que solo las estaciones CODELCO permiten calcular el factor R, ya que se requiere un tiempo considerable para captar la variabilidad anual.

Se presentó el procedimiento de análisis; primero se realizó la estimación de la intensidad máxima en 30 minutos mediante siete relaciones y se ayudó de las mediciones intrahorarias para evaluar el desempeño de las estimaciones mediante indicadores como error cuadrático medio y eficiencia de Nash-Sutcliffe. Segundo, se establecieron relaciones del factor R con seis índices de precipitación con cuatro modelos de regresión, resultando un total de 24, que mediante indicadores de desempeño y al uso de las 13 estaciones DGA con datos horarios permiten seleccionar la relación que estima el factor R. Por último, para analizar la distribución espacial de la erosividad se hizo uso de las 103

estaciones en estudio para generar gráficas de comparación latitudinal y longitudinal, y para aprovechar la información puntual obtenida se usó la herramienta *co-kriging* para la generación de un mapa isoerodente y un mapa con rupturas de clases.



CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los principales resultados en torno a la estimación de la intensidad máxima y erosividad por evento, relaciones de estimación del factor R y distribución espacial de la erosividad. Se analizan los resultados relacionándolos con el régimen pluviométrico de la zona de estudio.

4.2 Estimación de la intensidad máxima en 30 minutos y de la erosividad por evento

De la individualización de eventos se encontraron un total de 446 tormentas en las nueve estaciones CODELCO. En la Tabla 4.1 se especifica el número de eventos por estación y se muestra un resumen de los ajustes de las funciones de intensidad máxima.

Tabla 4.1 Análisis de los eventos registrados en las estaciones pertenecientes a CODELCO

Estación	Número de tormentas	Ecuación predominante	I ₃₀ /I ₆₀ promedio	R ² _{ajustado} promedio
Ollagüe	100	3.6	1.49	0.963
Ojos de San Pedro	118	3.6	1.43	0.961
Puno	113	3.6	1.45	0.976
Talabre	9	3.1	1.65	0.960
CAP	44	3.2	1.69	0.953
Chañaral	15	3.6	1.48	0.987
Cine Inca	22	3.6	1.41	0.945
Pampa Austral Norte	13	3.5	1.33	0.951
Pampa Austral Sur	12	3.6	1.33	0.963

Se observa que en la mayoría de las estaciones se ajustó la ecuación 3.6, y se evidencia un buen desempeño ya que el promedio del coeficiente de determinación ajustado supera el 0.9 en todas las

estaciones. Además, se muestra la intensidad máxima en 30 minutos en promedio es mayor entre un 33 y 69% con respecto a la intensidad máxima en 60 minutos.

En las estaciones de Puno, Ojos San Pedro y Ollagüe se encontraron 56 eventos con registro de 5 y 15 minutos. Se comparó la intensidad máxima en 30 minutos estimada (I_{30}^{estimada}), mediante el uso de los ajustes, con la intensidad máxima en 30 minutos registrada (I_{30}) (Figura 4.1).

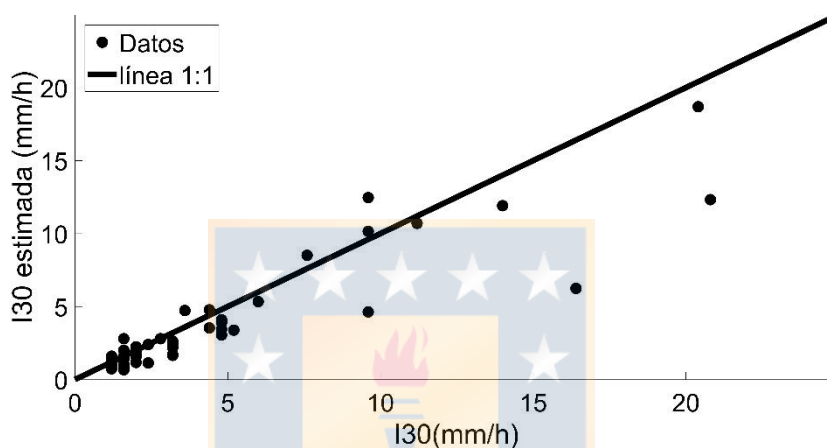


Figura 4.1 Comparación entre I_{30} estimada e I_{30} medida. Los círculos muestran la comparación puntualmente y la línea continua corresponde a una recta con pendiente 1.

También se calculó la erosividad por evento (EI_{30}) con la intensidad máxima en 30 minutos registrada, con discretización del lapso r de la Ecuación 2 de 5 o 15 minutos, y se comparó con la erosividad del evento calculada con lapso r de una hora y usando la intensidad máxima en 30 minutos estimada (Figura 4.2).

En la Tabla 4.2 se presentan los indicadores de desempeño de las estimaciones de la intensidad máxima en 30 minutos y la erosividad por evento. Se evidencia un valor de NS menor en la estimación de EI_{30} ; que resulta intuitivo ya que depende de I_{30} y del cálculo de la energía cinética (E), el cual presentó poca sensibilidad ($NS=0.943$) respecto a la discretización de los lapsos cuando se compara la energía estimada con datos horarios con la energía calculada con datos menores a una hora (Figura 4.3).

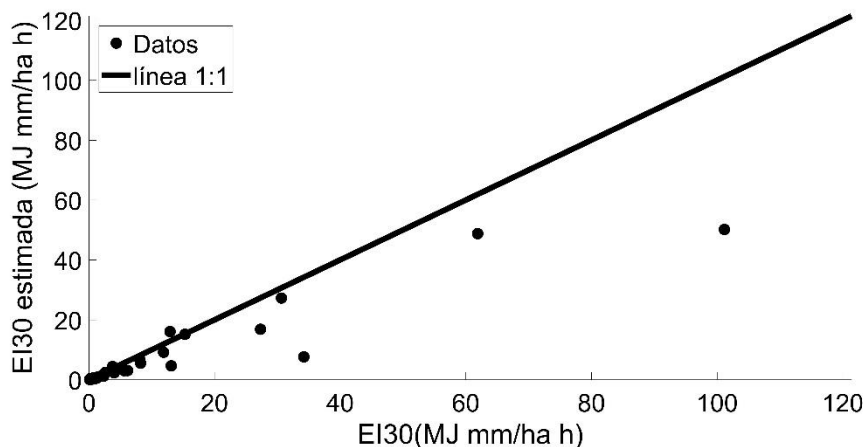


Figura 4.2 Comparación entre EI₃₀ estimada e EI₃₀. Los círculos muestran la comparación puntualmente y la línea continua corresponde a una recta con pendiente 1.

Tabla 4.2 Indicadores de desempeño de las estimaciones de I₃₀ y EI₃₀

Indicador de desempeño	I ₃₀	EI ₃₀
RMSE	2.084	8.158
NS	0.787	0.758

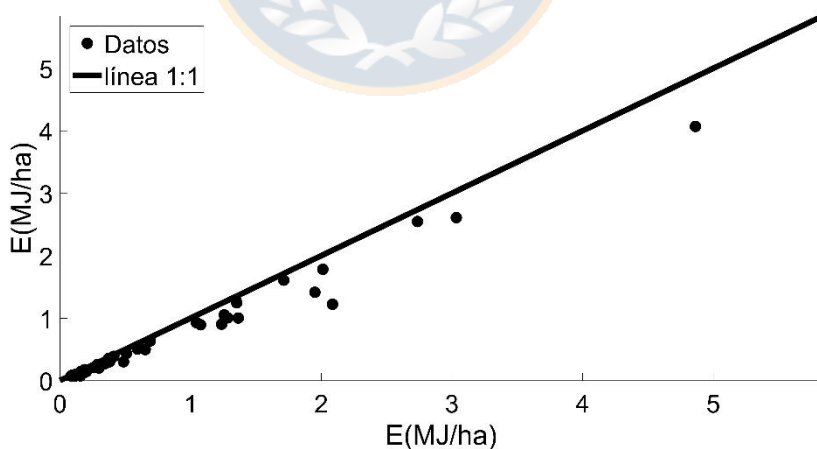


Figura 4.3 Comparación entre E calculada con datos de precipitación horaria y E con mediciones de precipitación intra-horarias

Dado lo anterior, la estimación de la erosividad del evento quedó sujeta a la estimación de I₃₀, cuyo desempeño fue relativamente bueno según lo mostrado en la Tabla 4.2, pero si se observa la Figura

4.1 existe una subestimación de la intensidad máxima, que al analizar los datos se puede explicar por la diferencia entre la intensidad máxima horaria y la intensidad máxima en una hora, que según los datos en promedio es del 15 % y alcanza un máximo de 66%. Sin embargo, se considera una estimación aceptable ya que el ajuste presenta NS por sobre 0.6.

4.3 Estimación del factor R

Usando las ecuaciones 2.6 a 2.8 se calculó el factor R en las nueve estaciones CODELCO mediante la estimación de la intensidad máxima en 30 minutos. Se encontraron valores desde 0.67 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹, en Talabre, hasta 52.3 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹ en Ojos San Pedro (Ver detalle en Anexo 4.3), que coinciden con las estaciones de valores extremos de precipitación anual promedio.

De los 24 modelos de regresión se seleccionaron los tres que presentan mejor desempeño según coeficiente de determinación R^2_{ajustado} (Table 5).

Tabla 4.3 Características de los modelos de regresión con mejor desempeño

Indicador	R^2_{ajustado}	r	RMSE	Ecuación
P1	0.974	0.915	3.100	$R=0.792*P$
P2	0.970	0.915	3.204	$R=-0.226+0.797*P$
P3	0.970	0.915	3.207	$R=0.785*P^{1.002}$

Se observa que la precipitación anual promedio genera los tres modelos de regresión de mejor desempeño, además el cuarto mejor modelo también corresponde a una curva usando P por lo que indistintamente del modelo de regresión la precipitación anual promedio corresponde a un buen estimador del factor R. Este resultado es contrario a lo expuesto por Angulo-Martínez y Beguería (2009), que mencionan que los indicadores con escalas más pequeñas tendrán mejor desempeño al estimar el factor R ya que los eventos extremos a escalas anuales se disfrazan, sin embargo en este trabajo la precipitación anual presenta el mejor desempeño, por sobre índices de agresividad que cuantifican la variabilidad mensual de la precipitación. De hecho, la precipitación anual promedio

presentó un coeficiente de correlación de Pearson de 0.872 con respecto al factor R, que da a entender que el régimen pluviométrico incide en que las tormentas no se oculten en el valor de precipitación anual.

Con el factor R calculado para las 13 estaciones DGA (Ver detalle en Anexo 4.3), se comparó con el predicho mediante los tres modelos de regresión; P1, P2 y P3. Como se observa en la Tabla 4.4 los indicadores de desempeño son bastante similares, pero se optó por seleccionar la forma potencial (P3) ya que es la forma mayormente utilizada (Renard y Freimund, 1994; Ferro y Porto, 1999; Da Silva, 2004; Bonilla y Vidal, 2011).

Tabla 4.4 Indicadores de desempeño de los modelos del factor R aplicado a 13 estaciones DGA

Indicador	R ² ajustado	RMSE
P1	0.8218	35.041
P2	0.8218	34.840
P3	0.8219	34.893

En la Figura 4.4 se muestra el resultado de la regresión con ajuste potencial, evidenciando el buen desempeño. Además, se visualiza que el comportamiento se asemeja bastante a una recta, ya que el exponente del ajuste es muy cercano a 1.

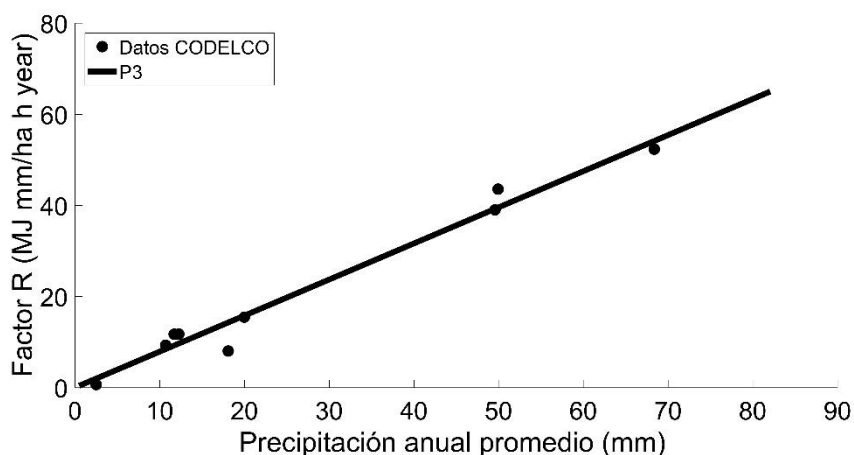


Figura 4.4 Relación entre factor R y precipitación anual promedio en nueve estaciones CODELCO. Los círculos muestran los datos y la línea continua corresponde al ajuste P3

En la Figura 4.5 se visualiza el ajuste aplicado a los datos DGA, donde se encuentran subestimaciones y sobreestimaciones, pero se considera un buen desempeño.

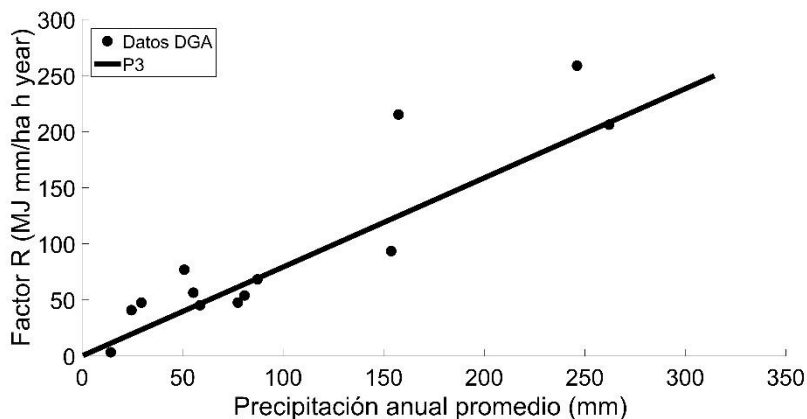


Figura 4.5 Relación entre factor R y precipitación anual promedio en nueve estaciones DGA. Los círculos muestran los datos y la línea continua corresponde al ajuste P3

La ecuación seleccionada, $R=0.785P^{1.002}$, presenta un coeficiente de correlación de Pearson de 0.915, que al compararlo con otros modelos de regresión que usan datos de precipitación mensual resulta con mejor desempeño que lo obtenido por Angulo-Martínez y Beguería (2009) y similar a lo planteado por Renard y Freimund (1994) y Hernando y Romana (2016).

Comparando los valores de los parámetros a y b con otros estudios, resultan bastante disímiles ya que Renard y Freimund (1994) determinaron valores de $a=0.048$ y $b=1.61$ y Ma *et al.* (2014) establecieron valores de $a=0.040-0.05$ y $b=1.348-1.609$. Esto ratifica lo expuesto por Lastoria *et al.* (2008) en torno a obtener modelos de regresión con datos locales y, además muestra que el patrón pluviométrico del Norte Grande es bastante particular, con precipitaciones convectivas en tiempo acotado y espacialmente muy variable.

Existe una mejora en el desempeño de las regresiones en general si se trabaja con regiones homogéneas (Diodato y Bellocchi, 2007; Hernando y Romana, 2016), pero con la limitación de estaciones consideraras en este estudio se decidió no realizar una regionalización, por lo que se acepta la ecuación seleccionada, la cual de por sí tiene buen desempeño. Por lo que se tiene una

relación útil para estimar la erosividad de la precipitación cuando no se tiene la data disponible, de tal forma de obtener información de la distribución espacial del factor R.

4.4 Distribución espacial de la erosividad de la precipitación

Con la relación seleccionada se calculó el factor R para las 103 estaciones en estudio, variando entre 0.358 y 341.034 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹, con un promedio de 56.294 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹ (Ver detalle en Anexo 4.4). En la Figura 4.6 se presenta la gráfica del factor R versus longitud en grados, mientras que en la Figura 4.7 muestra la gráfica del factor R versus la latitud en grados. Se observa una baja correlación en el sentido longitudinal ($r=0.205$), lo que es contrario al resultado esperado ya que el patrón de precipitaciones es creciente hacia el este debido al efecto orográfico lo que incidiría en mayor erosividad, pero si se presta atención se exhibe un ancho variable en la zona de estudio que condiciona el análisis planteado. Mientras que en el sentido latitudinal existe una correlación mayor ($r=0.496$); exhibiendo un aumento de la erosividad a menor latitud, lo que se explica por las tormentas convectivas que actúan en el extremo norte de la zona de estudio.

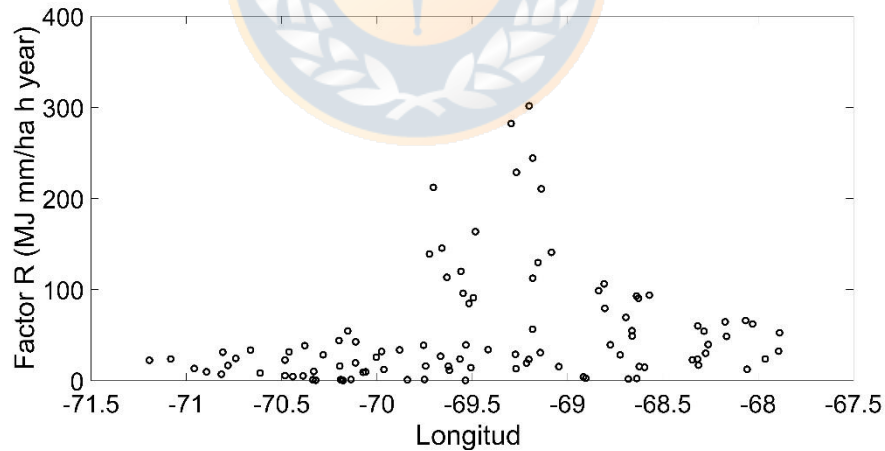


Figura 4.6 Relación entre factor R y longitud (grados)

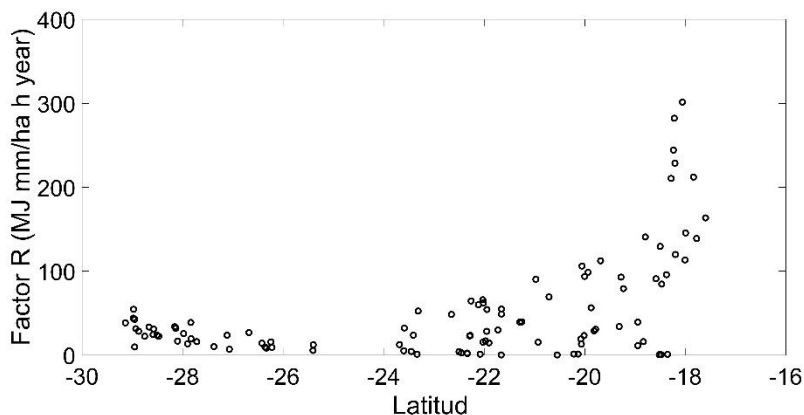


Figura 4.7 Relación entre factor R y latitud (grados)

La interpolación mediante *co-kriging* a los 103 datos puntuales del Factor R permite obtener información espacial de la erosividad; en la Figura 4.8 se presenta un mapa isoerodente con intervalo de $50 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, y en la Figura 4.9 se muestra un mapa con corte de clases mediante *Jenks*.

La Figura 4.8 muestra que gran parte del área de estudio tiene un factor R menor a $50 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$, en particular la región de Atacama casi en su totalidad no supera este umbral. La erosividad supera el valor de $100 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ en las dos regiones ubicadas en el norte y solo presentando valores superiores a $200 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ en una pequeña área en el Altiplano de la región de Arica y Parinacota. Si se usa la clasificación del factor R presentado por Da Silva (2004) la zona de estudio queda clasificada como baja erosividad ($R < 2452 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ yr}^{-1}$).

La Figura 4.9 exhibe la variación espacial del factor R; una amplia zona homogénea que se desarrolla desde la zona litoral hacia el oeste, en algunos sectores extendiéndose en todo el sentido este-oeste de la zona de estudio. Los cortes de clases reflejan un aumento de la erosividad en el sentido noroeste siendo máxima en una pequeña área del Altiplano en la región de Arica y Parinacota. Mientras que al sur de la zona de estudio se observa un aumento del factor R, pero con valores bastantes menores que los encontrados en la zona norte.

A pesar de que el factor R se calculó con una relación potencial se asocia bastante al patrón pluviométrico ya que el parámetro b es muy cercano al valor 1 (1.002), por lo que se puede explicar

la distribución espacial de la erosividad con la variación de la precipitación; bajos valores en la zona litoral aumentando hacia el Altiplano en la zona norte debido a las precipitaciones convectivas y al efecto del relieve. Similares condiciones, pero distinto patrón pluviométrico, fueron expuestas por Angulo-Martínez y Beguería (2009) y Bonilla y Vidal (2011) donde el efecto orográfico modifica la distribución espacial del factor R debido al aumento de la precipitación

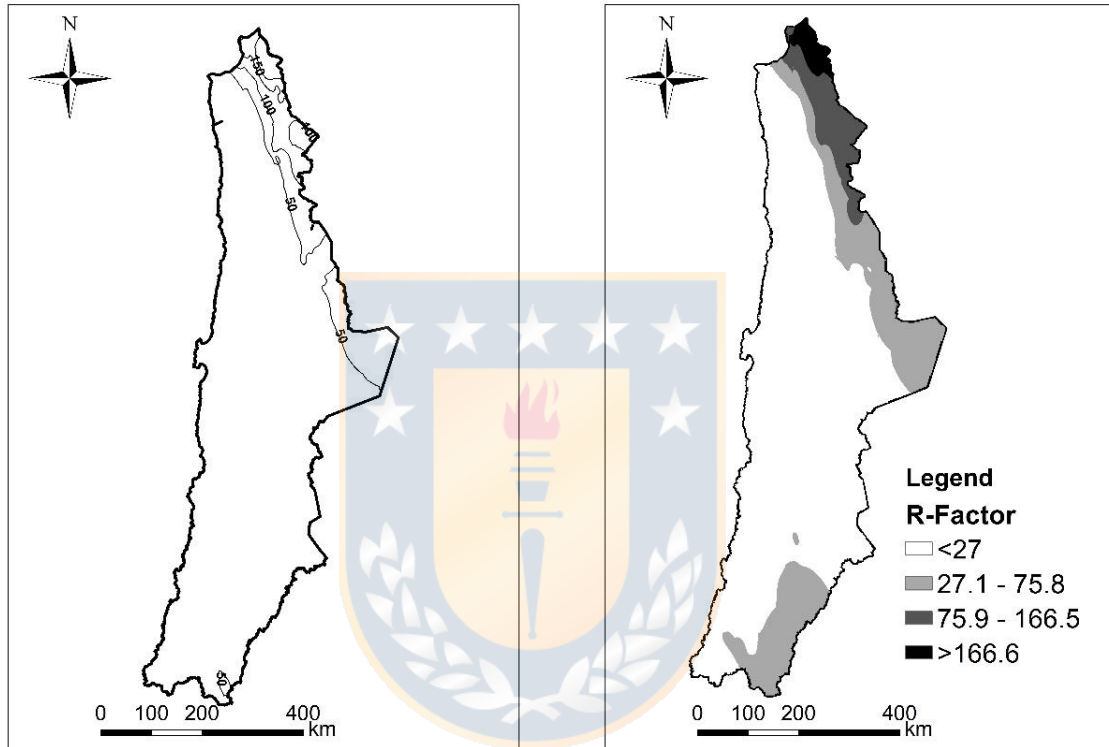


Figura 4.8 Distribución espacial del factor R. Líneas isoerodentes son generadas cada $50 \text{ MJ mm ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$

Figura 4.9 Distribución espacial del factor R con método de las rupturas naturales

4.5 Conclusiones

Se estimó la intensidad máxima en 30 minutos en 446 eventos registrados en las nueve estaciones CODELCO, se encontró que es mayor que la intensidad máxima horaria entre un 33 y 69%, lo que es esperable en zonas donde la precipitación es variable temporalmente. Las medidas de desempeño

indicaron que son buenos ajustes de intensidad máxima, pero al compararlo en 56 eventos con registros de intervalos menor a una hora se encontraron subestimaciones, sin embargo, se consideró una estimación aceptable dada la eficiencia en la comparación entre intensidad máxima medida e intensidad máxima estimada.

La estimación de erosividad por evento quedó supeditada a la estimación de intensidad máxima, pero usando la comparación en los 56 eventos se consideró una estimación aceptable dada el valor de eficiencia calculado.

Los modelos de regresión de mejor desempeño para estimar el factor R tienen como indicador a la precipitación anual promedio, tanto en la forma lineal de un parámetro, lineal de dos parámetros y potencial. Para seleccionar una relación se usaron 13 estaciones DGA, encontrando desempeños bastante similares, pero finalmente se determinó usar la relación potencial ya que es la mayormente utilizada.

La relación seleccionada sirvió para calcular el factor R en las 103 estaciones en estudio, encontrando valores desde 0.358 hasta 341.034 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹, que pueden ser clasificados como baja erosividad, pero bajo el contexto de la investigación resultó de menor importancia. Se encontró que el factor R aumenta mientras disminuye la latitud, lo que se relaciona con el patrón pluviométrico de la zona de estudio; aumento de precipitación en intensidad y cantidad al norte, mientras que en el sentido longitudinal no se encontró correlación explicado por la irregular forma del área de estudio.

La información puntual del factor R permitió realizar interpolación mediante *co-kriging*, que a través de la generación de dos mapas es posible concluir que la erosividad se asemeja al patrón pluviométrico, con valores máximos en el altiplano en la región de Arica y Parinacota, que corresponde a la ubicación de la mayor precipitación en la zona de estudio (precipitación media anual > 250 mm).

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

En zonas áridas como el Norte Grande de Chile la precipitación se caracteriza por gran variabilidad espacial y temporal, que generan crecidas con gran cantidad de sólidos debido a la erosión. Para evaluar la erosión del suelo resulta importante estimar la erosividad de la precipitación, que depende de la energía de la precipitación y la intensidad del evento.

En este estudio se calculó el factor R en nueve estaciones con lapso de medición de una hora mediante estimaciones de la intensidad máxima en 30 minutos, que al compararlo con ciertos eventos con mediciones con resolución menor a una hora se encontraron subestimaciones de I_{30} , que incide en la obtención de subestimaciones de la erosividad por evento. Esta situación se explica por la diferencia entre intensidad máxima en una hora e intensidad máxima horaria, que en ocasiones se encontraron un 50 % de diferencia, sin embargo, se considera una estimación aceptable dado los valores de eficiencia de Nash-Sutcliffe, 0.787 y 0.758 para I_{30} y EI_{30} , respectivamente.

El factor R estimado en las nueve estaciones osciló entre 0.67 y 52.3 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹; con esto se establecieron 24 relaciones con modelos de regresión para estimar el factor R en función de índices que requieren datos de precipitación fácilmente disponibles, resultando que los modelos que usan la precipitación anual promedio tienen el mejor desempeño. Para seleccionar la relación para estimar R en el área de estudio se validaron los modelos de regresión, lineal de uno y dos parámetros, y el modelo potencial con datos de la DGA, que tiene como efecto seleccionar la ecuación $R=0.785P^{1.002}$, que tiene un coeficiente de correlación de Pearson de 0.915, muy por sobre el valor de 0.8 planteado como hipótesis. La relación seleccionada difiere en términos de los parámetros establecidos en otros estudios, lo que muestra la correcta obtención de un modelo de regresión local en lugar de aplicar modelos calibrados en otras zonas.

La relación seleccionada sirve para calcular el factor de erosividad de precipitación en 103 estaciones, con valores que oscilaron entre 0.358 y 341.034 MJ mm ha⁻¹ h⁻¹ yr⁻¹. Estos valores puntuales del factor R indican que a menor latitud se tiene mayor erosividad, mientras que en el sentido longitudinal no se observa una correlación debido fundamentalmente a la irregular zona de

estudio. Mediante la herramienta geoestadística del *co-kriging* fue posible observar la distribución espacial del factor de erosividad, evidenciando una gran zona homogénea de baja erosividad que se sitúa en la zona costera del área de estudio, además se exhibió un gradiente al aumento en el sentido noroeste siendo máxima la erosividad en el altiplano en la región de Arica y Parinacota (17° S- 19° S).

La distribución espacial del factor R se asemeja al patrón pluviométrico de la zona de estudio ya que la relación usada para estimar la erosividad depende directamente de la precipitación media anual con un exponente cercano a 1 (1.002), por lo que la variación de precipitación explica la variación de erosividad. Por esto se explica mayores valores en el Altiplano debido a las precipitaciones de tipo convectiva y gradiente de aumento en el sentido noroeste a causa del efecto orográfico.

Lo anterior expuesto indica que cálculo del factor R en la zona de estudio no requiere gran detalle en la distribución de las tormentas, sino que se requiere el valor de precipitación anual, el cual tiene mayor cobertura espacial y se considera un dato de fácil cómputo. Gracias a esto es posible identificar zonas de posibles inundaciones repentinas y/o *mudflows*, como también usarlo en otros campos de investigación como la contaminación difusa. La limitación de la aplicación está en el efecto del cambio climático, lo que puede incidir en la distribución de los eventos y/o montos de precipitación.

A partir del presenta trabajo se desprenden las siguientes líneas de investigación:

- a) Realizar un análisis de precipitación por tormenta para encontrar relación entre intensidad máxima horaria e intensidad máxima en una hora.
- b) Establecer relaciones de estimación del factor R usando la erosividad por año con el fin de ampliar el número de observaciones, que fueron nueve en este trabajo.
- c) Integrar los valores del factor R a nivel de cuencas hidrográficas con el fin de identificar zonas con mayor riesgo de *mudflows*.

REFERENCIAS

Angulo-Martínez, M. y S. Beguería (2009). Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). **Journal of Hydrology**, **379 (1-2)**. 111–121.

Arnoldus, H.M.J. (1977) Methodology used to determine the maximum potential average annual soil loss due to sheet and rill erosion in Morocco. **FAO Soils Bulletin**, **34**. 39–51.

Bonilla, C.A. y K.L. Vidal (2011) Rainfall erosivity in Central Chile. **Journal of Hydrology**, **410(1-2)**. 126–133.

Carretier, S., V. Tolorza, V. Regard, G. Aguilar, M.A Bermúdez, J. Martinod, J.L Guyot, G. Hérail y R. Riquelme (2018) Review of erosion dynamics along the major N-S climatic gradient in Chile and perspectives. **Geomorphology**, **300**. 45–68.

Da Silva, A.M. (2004) Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, **57(3)**. 251–259.

Diodato, N. y G. Bellocchi (2007) Estimating monthly (R)USLE climate input in a Mediterranean region using limited data. **Journal of Hydrology**, **345(3-4)**. 224–236.

Diodato, N. y M. Soriano (2014) Rainfalls and Storm Erosivity. En N. Diodato y G. Bellocchi (eds.). **Storminess and Environmental Change**. Springer. New York.

Ferro, V., G. Giordano y M. Iovino (1991) Isoerosivity and erosion risk map for sicily. **Hydrological Sciences Journal**, **36(6)**. 549–564.

Ferro, V. y P. Porto (1999) A comparative study of rainfall erosivity estimation for southern Italy and southeastern Australia estimation for southern Italy and southeastern. **Hydrological Sciences Journal**, **44(1)**. 3–24.

Foster, G.R. (2008) **Revised Universal Soil Loss Equation Version 2 (RUSLE2)**. USDA-Agricultural Research Service. Washington, D.C.

Foster, G.R., D.C Yoder, A.Y. Glenn, D.K. McCool, K.C. McGregor y R.L Ringer (2003) **User's Guide RUSLE2**. USDA-Agricultural Research Service. Washington, D.C.

Fournier, F. (1960) **Climat et erosion**. Presses Universitaires de France. Paris.

Fox, J. (1997) **Applied Regression Analysis, Linear Models, and Related Methods**. SAGE Publications. Thousand Oaks, CA.

García-Bartual, R. y M. Schneider (2001) Estimating maximum expected short-duration rainfall intensities from extreme convective storms. **Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere**, **26(9)**. 675–681.

Garreaud, R., M. Vuille y A.C Clement (2003) The climate of the Altiplano: Observed current conditions and mechanisms of past changes. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, **194(1-3)**. 5–22.

Hernando, D. y M.G Romana (2016) Estimate of the (R) USLE rainfall erosivity factor from monthly precipitation data in mainland Spain. **Journal of Iberian Geology**, **42(1)**. 113–124.

Houston, J. (2006) The great Atacama flood of 2001 and its implications for Andean hydrology. **Hydrological Processes**, **20(3)**. 591–610.

Houston, J. y A.J. Hartley (2003) The central andean west-slope rainshadow and its potential contribution to the origin of hyper-aridity in the Atacama Desert. **International Journal of Climatology**, **23(12)**. 1453–1464.

Lastoria, B., F. Miserocchi, A. Lanciani y G. Monacelli (2008) An estimated erosion map for the Aterno-Pescara river basin. **European Water**, **21**. 29–39.

Lobo, G.P. y C.A Bonilla (2015) Effect of temporal resolution on rainfall erosivity estimates in zones of precipitation caused by frontal systems. **Catena**, **135**. 202–207.

Ma, X., Y. He, J. Xu, M. Van Noordwijk y X. Lu (2014) Spatial and temporal variation in rainfall erosivity in a Himalayan watershed. **Catena**, **121**. 248–259.

McGregor, K.C., R. Bingner, A.J. Bowie y G.R. Foster (1995) Erosivity Index Values for Northern Mississippi. **American Society of Agricultural Engineers**, **38(4)**. 1039–1047.

Nash, J. y V. Sutcliffe (1970) River flow forecasting through conceptual models. **Journal of Hydrology**, **10**. 282–290.

Oliver, J.E. (1980) Monthly precipitation distribution: A comparative index. **Professional Geographer**, **32(3)**. 300–309.

Petkovšek, G. y M. Mikoš (2004) Estimating the R factor from daily rainfall data in the sub-Mediterranean climate of southwest Slovenia. **Hydrological Sciences Journal**, **49(15)**. 869–877.

Pizarro, R., F. Cornejo, C. González y K. Macaya (2008) Análisis del comportamiento y agresividad de las precipitaciones, en la zona central de Chile. **Ingeniería hidráulica en México**, **23(2)**. 91–109.

Qin, W., Q. Guo, C. Zuo, Z. Shan, L. Ma y G. Sun (2016) Spatial distribution and temporal trends of rainfall erosivity in mainland China for 1951–2010. **Catena**, **147**. 177–186.

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool y D.C Yoder (1997) **Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. **USDA Agriculture Handbook**. **703**. U.S. Department of Agriculture. Washington, D.C.

Renard, K.G. y J.R. Freimund (1994) Using monthly precipitation data to estimate R-factor in the revised USLE. **Journal of Hydrology**, **157(1-4)**. 287–306.

Smith, R. (1986) Comparing traditional methods for selecting class intervals on choropleth maps. **Professional Geographers**, **38(1)**. 62–67.

Vega, M.B. y J.M. Febles (2008) La agresividad de la lluvia en áreas rurales de la provincia la habana como factor de presión en la sostenibilidad agroambiental. **II Seminario Internacional de Cooperación y Desarrollo en espacios rurales Iberoamericanos. Sostenibilidad e Indicadores**. Almería, España.

Wischmeier, W.H. y D.D. Smith (1978) **Predicting rainfall erosion losses. USDA Agriculture Handbook. 537**. U.S. Department of Agriculture. Washington, D.C.



ANEXOS

ANEXO 4.3 Valores del factor R en estaciones en estudio

Tabla A.4. 1 Factor R calculado en las nueve estaciones CODELCO

Nombre estación	Factor R (MJ mm/ha h año)
Ollagüe	43.56
Ojos San Pedro	52.32
Pampa Puno	39.01
Talabre	0.66
CAP	8.02
Chañaral	9.30
Cine Inca	15.46
Pampa Austral Norte	11.71
Pampa Austral Sur	11.74

Tabla A.4.2 Factor R calculado en las 13 estaciones DGA

Nombre estación	Factor R (MJ mm/ha h año)
Parinacota ex Endesa	93.46
Visviri	258.77
Chungara Ajata	206.16
Colchane	47.52
Central Chapiquiña	45.20
Belen	53.93
Linzor	68.25
Salado Embalse	56.36
Lluta Alcerreca	215.24
Ticnamar en Angostura	40.77
Camarones Chilpe	3.27
Loa Lequeña	76.82
Salado Ayquina	47.49

ANEXO 4.4 Valores del factor R calculado a partir de la relación seleccionada

Tabla A.4.3 Factor R calculado partir de la relación potencial en las 103 estaciones en estudio. Se incluye características de la precipitación

Estación	Altura (msnm)	Días lluviosos por año	Precipitación anual (mm)	Factor R (MJ mm/ha h año)
Visviri	4080	51.0	205.4	182.43
Chungara Reten	4570	59.1	264.3	236.17
Chungara Ajata	4585	62.0	306.7	274.97
Chucuyo Retén	4400	56.8	354.3	318.73
Parinacota ex Endesa	4420	56.1	287.1	256.99
Guallatire	4240	39.2	162.7	143.79
Villa Industrial	4080	42.8	174.6	154.49
Humapalca	3980	51.4	266.4	238.03
Alcerreca	3990	33.9	182.8	161.91
Central Chapiquiña	3350	26.8	120.5	105.70
Belen	3240	30.7	106.3	93.03
Ticnamar	3230	26.1	114.3	100.19
Arica Oficina	20	0.7	0.7	0.57
Azapa	365	0.7	0.8	0.65
Codpa	1870	6.9	20.3	17.11
Esquiña	2170	8.7	49.5	42.53
Colchane	3700	31.0	116.8	102.37
Coyacagua	4013	32.6	133.4	117.28
Parca	2650	9.0	29.4	24.97
Iquique	50	1.2	1.8	1.42
Guatacondo	2460	5.6	19.5	16.43
Huaytani	3950	21.6	117.9	103.35
Camiña	2500	11.5	42.9	36.76

Estación	Altura (msnm)	Días lluviosos por año	Precipitación anual (mm)	Factor R (MJ mm/ha h año)
Poroma	2880	16.4	71.0	61.51
Lagunillas	4020	35.5	124.1	108.96
Mamiña	2730	9.9	24.3	20.55
Lequena	3320	9.6	61.6	53.25
Ojos San Pedro	3800	4.8	21.5	18.09
Inacaliri	4040	15.2	82.9	72.12
Conchi Embalse	3010	6.0	19.6	16.47
Chiu-Chiu	2524	2.2	3.2	2.56
Cupo	3370	15.4	75.5	65.56
Toconce	3310	12.6	81.1	70.51
Ayquina	3031	5.8	29.6	25.16
Quillagua	802	0.4	0.5	0.39
Camar	2700	6.5	30.0	25.49
Socaire	3251	7.1	40.7	34.84
Peine	2460	3.5	15.9	13.27
Rio Grande	3250	10.2	61.1	52.77
Antofagasta	50	1.0	6.7	5.49
Tal Tal	9	1.8	7.1	5.85
Calama	2300	1.7	3.5	2.83
Las Vegas	2250	2.9	33.9	28.87
Jorquera	2000	6.6	49.0	42.06
Manflas	1410	5.1	40.3	34.51
Lautaro	1110	5.1	32.4	27.61
Los Loros	940	3.5	24.7	20.86
Elibor	750	3.3	20.3	17.07
Pastos Grandes	2260	4.1	29.9	25.37
Copiapo	385	3.3	12.8	10.63

Estación	Altura (msnm)	Días lluviosos por año	Precipitación anual (mm)	Factor R (MJ mm/ha h año)
Conay	1450	6.4	68.6	59.45
Junta del carmen	770	2.8	28.4	24.13
San Felix	1150	4.5	39.7	33.96
Santa Juana	560	5.6	42.2	36.13
Vallendar DGA	420	5.9	30.8	26.20
Iglesia Colorada	1550	5.3	42.5	36.42
El totoral	150	1.7	17.0	14.25
Canto de agua	330	2.1	21.1	17.77
Freirina	100	3.4	30.0	25.49
Chacalluta	63	0.9	1.4	1.14
Diego Aracena	52	0.6	0.5	0.36
El Loa	2293	3.1	5.3	4.29
Cerro Moreno	113	1.8	5.7	4.68
Caquena	4400	47.6	378.5	341.03
Chilcaya	4270	34.1	176.8	156.52
Lluta en Alcerreca	3550	41.3	142.5	125.52
Putre (DCP)	3560	32.4	150.6	132.82
Camarones Chilpe	1565	8.9	14.5	12.10
Enquelca	3900	28.3	99.6	87.03
Ujina	4300	27.0	113.5	99.44
Coposa	3760	26.0	87.3	75.99
Huara Baquedano	1100	1.4	1.77	1.41
Tarapaca Sibaya	2830	12.0	38.8	33.17
Mocha	2150	6.1	36.4	31.07
Chuzmiza	3400	22.0	141.2	124.34
Cerro Colorado	2510	12.3	16.7	13.99
Ascotan	3970	14.8	37.9	32.34

Estación	Altura (msnm)	Días lluviosos por año	Precipitación anual (mm)	Factor R (MJ mm/ha h año)
Loa represa Lequena	3315	17.6	68.9	59.71
Quinchamale	3080	4.3	18.6	15.62
Silala	4305	15.7	78.2	67.93
Conchi Viejo	3491	7.3	35.8	30.51
Salado Ayquina	2980	8.8	28.8	24.46
Tocopilla	150	0.4	1.5	1.21
Talabre	3300	8.1	66.1	57.15
Baquedano	1032	0.3	1.4	1.14
Aguas Verdes	1560	1.0	15.6	13.04
Caldera	15	1.0	9.0	7.43
Conay Albaricoque	1600	5.3	53.6	46.15
El Parral	1400	5.1	55.4	47.73
El Corral	1820	3.6	48.3	41.53
El Transito	1100	2.7	35.8	30.57
La compañía	430	4.9	39.3	33.60
Husco Bajo	50	2.6	28.2	23.95
Domeiko	780	4.0	12.4	10.30
Ollagüe	3756	7.3	49.94	42.93
Ojos de San Pedro	3757	26.3	68.38	59.21
Pampa Puno	4070	17.1	49.58	42.61
Talabre	2592	1.9	2.5	2.00
CAP	2600	4.2	18.1	15.20
Chañaral	25	2.5	10.7	8.87
Cine Inca	2260	4.0	20	16.83
Pampa Austral Norte	950	1.8	11.7	9.73
Pampa Austral Sur	930	2.0	12.3	10.20