

Factores asociados a la erosión de los suelos de Chile entre el periodo 2001 - 2018

Ignacio Nuñez-Hidalgo

06-01-2021

1 Resumen

Los suelos son un legado biológico de importancia incalculable para la diversidad biológica en la tierra, al ser una zona que permite el ciclado de nutrientes y energía entre otros sistemas atmosféricos importantes, como la atmósfera, la hidrosfera y la litósfera. El uso intensivo de los suelos por parte del hombre ha provocado que estos se degraden, poniendo en riesgo la capacidad de estos para sustentar actividades fundamentales para el hombre como lo es la agricultura. En efecto, más del 30% de los suelos del mundo se encuentran severamente degradados, siendo la principal causa la erosión asociada a la sobreexplotación y el manejo inadecuado de los suelos. De continuar esta tendencia, se espera que para el año 2050, cerca del 90% de los suelos del mundo se encuentren severamente degradados, por lo que resulta urgente tomar medidas, no solo para identificar aquellas zonas más propensas a degradarse sino también para adoptar estrategias de manejo adecuadas para reducir su degradación futura. Este problema es más intenso en regiones como América latina, y en países como Chile, en donde los recursos disponibles para combatir la degradación de los suelos son limitados, a la vez que la desigualdad social y económica favorecen la conversión de usos de suelo que aceleran el fenómeno. Bajo este escenario, el uso de metodologías que permitan analizar y cuantificar de manera espacialmente explícita las zonas más propensas a perder suelo, al mismo tiempo que se identifican los factores asociados a dicha pérdida pueden ser particularmente útiles. Entre todas ellas, destaca la Ecuación Universal de pérdida del suelo (USLE), que se basa en la erosión hídrica provocada por la remoción o el uso inadecuado del terreno. Concretamente, se propone la estimación de las tasas de erosión a mediano plazo, abarcando el periodo entre los años 2001 a 2018 en todo Chile, para determinar: a) la tasa anual de erosión de los suelos en Chile continental por zona climática y uso de suelos; y b) determinar los factores de erosión más vinculados a la pérdida de suelos a una escala anual y por zona climática.

Palabras clave: Suelos, Degradación de los suelos, Erosión hídrica, Cambio global, Cambio de usos de suelos.

2 Introducción

La degradación de los suelos es una de las principales consecuencias ambientales ligadas al cambio global (Gwapedza, Hughes, and Slaughter 2018), impulsada por el manejo inadecuado y el cambio de uso de suelos (LULCC) (Cebecauer and Hofierka 2008; Botelho et al. 2018; Borrelli et al. 2020). Los suelos son considerados un legado biológico y un recurso no renovable, porque toman miles de años en formarse, pero mucho menos tiempo en degradarse (Doran and Safley 1997; Doran 2002; Tosic et al. 2011). La degradación de los suelos puede ocurrir de múltiples maneras, siendo la erosión hídrica una de las más severas; que involucra el lavado y remoción del suelo a causa de las precipitaciones (Lal 2015). Puede ocurrir naturalmente o verse inducido por el LULCC al reemplazarse la vegetación natural que protege los suelos por usos agrícolas, forestales, ganaderos, mineros y urbanos (Tosic et al. 2011; Kisan et al. 2016; Sanderman, Hengl, and Fiske 2017). Este problema tiene severas implicancias para la seguridad alimentaria y el sustento de los ecosistemas terrestres y su biodiversidad (Asadzadeh et al. 2015; Karlen and Rice 2015; Keesstra

et al. 2016; Robinson et al. 2017), siendo los suelos superficiales los más susceptibles a la erosión y a la vez, los más biodiversos (Mahapatra et al. 2018; Treviño and Starkey 2019). Los efectos de la erosión de los suelos tienen un efecto en cascada y son acumulables en el tiempo (Lal 2015). La erosión prolongada reduce la fertilidad de los suelos (Avanzi et al. 2013; Lal 2015, 2016), a la vez que vacía el pool de carbono, afectando negativamente a la capacidad de fijación y disponibilidad de nutrientes (Reeves 1997; Menta 2012), y a la capacidad de estos para sustentar las comunidades biológicas (Borrelli et al. 2017; Khatoon et al. 2017). También, la erosión de los suelos tiene implicancias sobre la disponibilidad de agua, reduciendo su disponibilidad y calidad, retroalimentando la desertificación de este (Halecki, Kruk, and Ryczek 2018).

Los últimos cálculos estiman que más de un tercio de los suelos del mundo ya se encuentran severamente degradados a causa de la erosión (Montanarella 2015; Rojas et al. 2016; López-García et al. 2019) y continúan degradándose a una tasa mundial anual de 35.9 Pg/yr-1 (Borrelli et al. 2017). A fines del siglo XX esta pérdida anual ya equivalía a más de US\$ 400 billones sólo en productividad agrícola, equivalente al 30% de los suelos del mundo (Myers 1984; Pimentel et al. 1995). De continuar esta tendencia, se espera que para el año 2050 cerca del 90% de los suelos del mundo se encuentren severamente degradados debido a la sobreexplotación y la erosión (Montanarella et al. 2015), lo que podría implicar una gran presión a la extensión y mantenimiento de las áreas naturales, que se verán amenazadas si a la vez consideramos que para el mismo periodo será necesario aumentar la producción global de alimentos en más de un 60% respecto a los niveles actuales (Rojas et al. 2016). El problema de erosión de suelos ocurre a escala global, pero es aún más acentuado en regiones en vías de desarrollo (Eisenberg and Muvundja 2020) como América Latina, en donde los recursos disponibles para manejar los suelos son más escasos que en países desarrollados, y en donde suele primar una visión extractivista de los recursos naturales, que en conjunto a una mayor desigualdad socioeconómica respecto a países desarrollados puede promover el LULCC por sobre la conservación de la biodiversidad (Southgate and Whitaker 1992; Ananda and Herath 2003; Borrelli et al. 2017).

En Latinoamérica, países como Chile son extremadamente sensibles a la erosión de los suelos. Chile tiene un legado histórico muy arraigado en el extractivismo y la explotación económica de sus recursos naturales en desmedro de la conservación biológica (Altieri and Rojas 1999; Barahona-Segovia et al. 2019), que en conjunción a las características topográficas accidentadas del territorio facilitan la erosión de los suelos (Gaspari, Delgado, and Denegri 2009; Borrelli et al. 2017). Chile a fines del siglo XX ya contaba con regiones que tenían más del 75% de sus suelos disponibles con grados de erosión severos o muy severos (Lagos, Espinoza, and Ortiz 1994), tendencia que en el siglo XXI se ha visto empeorada por la presencia y fomento de la industria forestal, la cual se localiza en suelos ya degradados (Miranda et al. 2017), y contribuye a la desecación y erosión del suelo posterior a las talas (Gayoso 1996; Silva, Santos, and Silva 2014; Silva et al. 2016); o al aumento de áreas cultivadas en laderas escarpadas, favoreciendo el lavado de nutrientes y consecuente aumento de la sedimentación y la eutrofización en ríos y lagos (Gaspari, Delgado, and Denegri 2009; Eisenberg and Muvundja 2020).

Una de las formas más efectivas para combatir la erosión de los suelos, está en poder cuantificar cuánto y de qué forma estos se están erosionando, con tal de poder proponer acciones de recuperación posteriores acorde a la severidad de la erosión (Erdogan, Erpul, and Bayramin 2007; Gwapedza, Hughes, and Slaughter 2018), siendo la modelación una de las vías más robustas y estandarizadas (Vagaria Alfonso and Fernanda 2015; Borrelli et al. 2020). Una metodología clásica y ampliamente validada corresponde a la Ecuación Universal de pérdida de suelos (USLE), implementada por la FDA de Estados Unidos por (Wischmeier and Smith 1978). La implementación de este protocolo históricamente se ha visto limitado a cuencas hidrográficas, al ser extremadamente costoso y dependiente de la toma de datos en terreno, volviéndose inalcanzable para el presupuesto de países en vías de desarrollo (Eisenberg and Muvundja 2020). Sin embargo, con el avance tecnológico y la mayor disponibilidad de las herramientas basadas en la percepción remota y el análisis de imágenes satelitales, es que se ha hecho posible el escalamiento de este tipo de inventarios incluso a escala mundial (Borrelli et al. 2017, 2020). El control y manejo de suelos en Chile tiene un sesgo hacia el mundo agrícola y productivo, descuidando el enfoque hacia la conservación de suelos naturales, por lo que resultaría extremadamente valioso poder generar evaluaciones con un enfoque más general y sistemático.

En este estudio se propone evaluar la dinámica nacional de la pérdida de suelos por erosión hídrica, al ser de importancia vital para un país como Chile; mediante la cuantificación de la tasa anual nacional de erosión a través de la aplicación de la Ecuación Universal de pérdida del suelo (USLE), para una ventana temporal de

17 años (2001-2018), identificando de manera espacialmente explícita los usos de suelo que más degradan, su naturaleza, y sus tasas individuales de erosión, con tal de sugerir que medidas de manejo debiesen ser aplicadas sobre dichos suelos para disminuir sus tasas de erosión anuales y consecuente degradación. Además se identificará que variables asociadas a la ecuación USLE se encuentran determinando la variación en las tasas de erosión anuales, para cada uno de los años estudiados, con la finalidad de identificar los drivers responsables píxel a píxel.

Sin embargo, para la realización de este informe, se desarrollará únicamente el último punto, que da cuenta de los drivers asociados a la erosión. Y únicamente en una zona climática (zona mediterránea)

3 Metodología

Chile tiene una de las mayores diversidades climáticas, con la presencia de al menos cuatro de los cinco tipos climáticos dominantes de la clasificación de Köppen – Geiger (Kottek et al. 2006). En paralelo, los suelos y las tasas de erosión de ellos se encuentran determinados por las variaciones en precipitación y temperatura (Orgiazzi et al. 2016), por lo que es esperable que la erosión sea distinta según tipo de clima. Para sobrellevar esto, se dividió el territorio de Chile continental en cuatro zonas climáticas: Árida, Mediterránea, Templada y Fría según la clasificación climática de Köppen calibrada para Chile (Sarricolea, Herrera-Ossandon, and Meseguer-Ruiz 2017), la cual fue utilizada en todas las escalas de análisis (Fig S1). Se trabajó únicamente con zonas que tuviesen cobertura vegetal en al menos uno de los años estudiados, con la finalidad de no considerar las tasas de erosión en zonas de alta montaña o áreas permanentemente desprovistas de vegetación. Para lograr esto, se enmascararon las zonas que tuviesen un índice de vegetación normalizado (NDVI) menor a 0.2 utilizando Sistemas de información Geográfica (SIG). El índice NDVI da cuenta del contenido de clorofila en un píxel dado y se maneja como proxy a la cobertura vegetal (Huete et al. 2002; Huete 2004). Las imágenes NDVI fueron extraídas desde imágenes MODIS MOD13Q1 a 250 m de resolución (Didan 2015) mediante Google Earth engine (GEE), un supercomputador alojado en la nube diseñado para análisis geo-científicos espaciales multitemporales (Gorelick et al. 2017).

Para cuantificar la erosión tanto anual como de todo el periodo, se adaptó la Ecuación Universal de Erosión del Suelo (USLE) propuesta originalmente por (Wischmeier and Smith 1978). La ecuación USLE permite estimar la tasa anual de erosión provocada por la interacción negativa entre la lluvia, el tipo de suelo, la pendiente y la cubierta vegetal, las cuales son variables en el tiempo y espacio geográfico (Bayramov et al. 2019), tal que:

$$A = R * K * LS * C * P \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde A equivale a la pérdida de suelo expresada en t/ha/año, R al factor de erosividad de la lluvia, K al factor de erosionabilidad del suelo, LS a factores topográficos, y P a las prácticas de manejo que se hayan llevado a cabo para combatir la erosión de los suelos. Cada uno de estos factores se descompone en ecuaciones individuales e independientes que permiten estimar la perdida de suelos en los primeros 30 cm de profundidad. Los factores fueron estimados para la totalidad del territorio de Chile continental a una resolución espacial de 250 m, para cada uno de los 18 años del periodo 2001 – 2018 utilizando SIG.

3.1 Factor R

El factor R o de erosividad, determina la facultad intrínseca de la lluvia de erosionar un área específica y será dependiente de la cantidad de precipitaciones acumuladas en un intervalo temporal determinado (Wischmeier and Smith 1978; Lal and others 1990). La forma tradicional de calcular este factor involucra la existencia de datos de precipitación diarios (véase Aguirre-Salado et al. 2017; Halecki, Kruk, and Ryczek 2018), los cuales pueden ser difíciles de conseguir o ser inexistentes en regiones montañosas y de difícil acceso (Yue et al. 2020). Afortunadamente existen formas de estimar este factor con la utilización de variables ambientales posibles a la precipitación acumulada. Para estimar este factor se utilizó la ecuación basada en el índice de Fournier aplicado en (Bayramov et al. 2019; Bonilla and Vidal 2011) tal que:

$$R = 0.028 * P^{1.534} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde R equivale al factor de erosionabilidad del suelo (MJ / mm / ha / yr), P equivale a la precipitación media anual (mm), y 0.028 y 1.534 son parámetros ajustados para Chile. Los datos de precipitación fueron obtenidos a partir de datos mensuales de precipitación para el periodo 2001 a 2018 convertidos a anuales (suma 12 meses = Precipitación media anual) de Worlclim 2 (Fick and Hijmans 2017), a una resolución espacial nativa de 2.5 km, la que fue posteriormente resampleada bilinealmente hasta 250m.

3.2 Factor K

El factor K o de erosionabilidad representa las propiedades del suelo a ser erosionado por la lluvia, y opera bajo la lógica de que si las presiones son mayores que la capacidad intrínseca del suelo a resistir la erosión, entonces el suelo se degradará (Silva, Santos, and Silva 2014). Al igual que con el factor R, existen múltiples formas de obtener el factor K. Los mecanismos clásicos involucraban la realización de pedones que dieran cuenta del contenido de materia orgánica, la textura y la permeabilidad del suelo (Wischmeier and Smith 1978), sin embargo, actualmente dichos parámetros pueden estimarse desde el modelo EPIC de (Sharpley and Williams 1990) modificados por (Yang et al. 2018) tal que:

$$K = 0.1317(0.2 + 0.3 e^{(-0.0256SAN(1-SIL/100))})(SIL/(CLA+SIL))^{0.3})/[1 - (0.25TOC)/(TOC + e^{((3.72 - 2.95TOC))})]/[1 - (0.7SN1)/(SN1 + e^{(22.9SN1 - 5.51)})] \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde K corresponde a la erosionabilidad del suelo (t / ha / MJ-1 / mm-1), SAN al contenido de arena (%), SIL al contenido de limo (%), CLA al contenido de arcilla (%), TOC al contenido de carbono orgánico (%), SN1 = 1 – SAN/100 y e = exp. Tanto el contenido de Arena, limo y Arcilla fueron obtenidos desde Soilgrids 250 (Hengl et al. 2017), mientras que el contenido de carbono orgánico fue obtenido desde (Núñez-Hidalgo in prep).

3.3 Factor LS

El factor LS o factor topográfico representa la influencia de la topografía en la erosión de los suelos, y depende de la variación del ángulo y longitud de la pendiente. Este factor fue estimado desde SAGA-GIS, utilizando el método de (Desmet and Govers 1996), especialmente calibrado para zonas con topografía compleja tal que:

$$LS = (A + D^2)m + 1 - A^m + 1) / (X^m * D^m + 2 * 22.13^m) \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde LS corresponde al factor topográfico (adimensional), A equivale a un modelo de acumulación de flujo o Flow accumulation, D al tamaño de píxel (250m), X = $\sin \theta + \cos \theta$, con θ equivalente al ángulo de exposición de la pendiente en grados o Aspect, y $m = \theta / 180 + 1$, con $\theta = ((\sin \Theta / 0.0896)) / ((0.56 + 3(\sin \Theta)0.8))$, siendo Θ equivalente a la pendiente en grados o Slope. Tanto las variables de exposición como las pendientes fueron obtenidas mediante GEE.

3.4 Factor C

El factor C o de cobertura vegetal refleja la influencia de la vegetación en disminuir o prevenir la erosión hídrica, y se sustenta en que tanto las raíces como la cobertura vegetal disminuyen el lavado de las superficies, aumentando la estructura general del suelo (Borrelli et al. 2017, 2020) Para obtener el factor se adaptó el modelo de (Almagro et al. 2019; Sone et al. 2019) tal que:

$$C = (-NDVI + 1) / 2 \text{ (Ecuación 5)}$$

Donde C equivale al factor de cobertura vegetal (adimensional), NDVI al Índice de Vegetación Normalizado y 0.1, 1 y 2 a factores de ajuste. Para obtener los índices se trabajó con las medias anuales de imágenes MODIS MOD13Q1 a 250 m de resolución (Didan 2015) procesadas en GEE.

3.5 Factor P

El factor P se encuentra asociado a las prácticas de manejo in-situ que se estén efectuando sobre un área geográfica para reducir la erosión hídrica (Bayramov et al. 2019), pudiendo oscilar entre valores de 0 a 1, donde 0 equivale a prácticas extremadamente eficientes y 1 a la ausencia de prácticas. Dada la extensión geográfica y temporal de este estudio, y al desconocimiento de prácticas de manejo y sus posibles localizaciones se asumirá un escenario pesimista para este factor, el cual será equivalente a 1 (inacción) para todo Chile (basado en Bonilla et al. 2010; Pradhan et al. 2012; Asadzadeh et al. 2015; Aguirre-Salado et al. 2017; Bayramov et al. 2019).

3.6 Análisis estadístico

Para analizar como los factores que componen al modelo USLE se encuentran afectando las tasas anuales de erosión (ton / ha / año), se generaron Modelos Aditivos Generalizados (GAM) para extraer las tasas de aporte a la erosión anual. Para generar los modelos se generaron 2500 puntos aleatorios para cada año y tipo de clima (en este caso mediterráneo), a los que se les extrajo los valores de cada USLE (covariable) y de los factores R, K, LS y C (factores), usando los años como variable de relación. Los modelos fueron generados mediante la librería mgcv (Wood 2001), para seleccionar el mejor candidato de modelos se utilizo el criterio de selección de Akaike y la libreria MuMin (Barton and Barton 2015) en R. Se analizó la significancia estadística de las relaciones utilizando un p-valor < 0.05.

4 Resultados

4.1 Visualización de datos

Las bases de datos no presentan un patrón espacial aparente, especialmente entre los factores R, K, LS y C versus USLE (Fig 1). De todas ellas únicamente el factor LS presenta una correlación no paramétrica alta con el índice de erosión, llegando a un índice de correlación de 0.9 (Fig 2).

```
## -- Attaching packages ----- tidyverse 1.3.0 --

## v ggplot2 3.3.3     v purrr    0.3.4
## v tibble   3.0.4     v dplyr    1.0.2
## v tidyverse 1.1.2     v stringr  1.4.0
## v readr    1.4.0     vforcats  0.5.0

## -- Conflicts ----- tidyverse_conflicts() --
## x dplyr::filter() masks stats::filter()
## x dplyr::lag()   masks stats::lag()

##
## Attaching package: 'kableExtra'

## The following object is masked from 'package:dplyr':
## 
##     group_rows
```

Se obtuvieron modelos con un ajuste moderado ($r=0.633$), dado por la alta dispersión de los datos de erosión. El AIC resultante del mejor modelo correspondió a 2.9619472×10^5 siendo el modelo 16 el mejor candidato (Tabla ??).

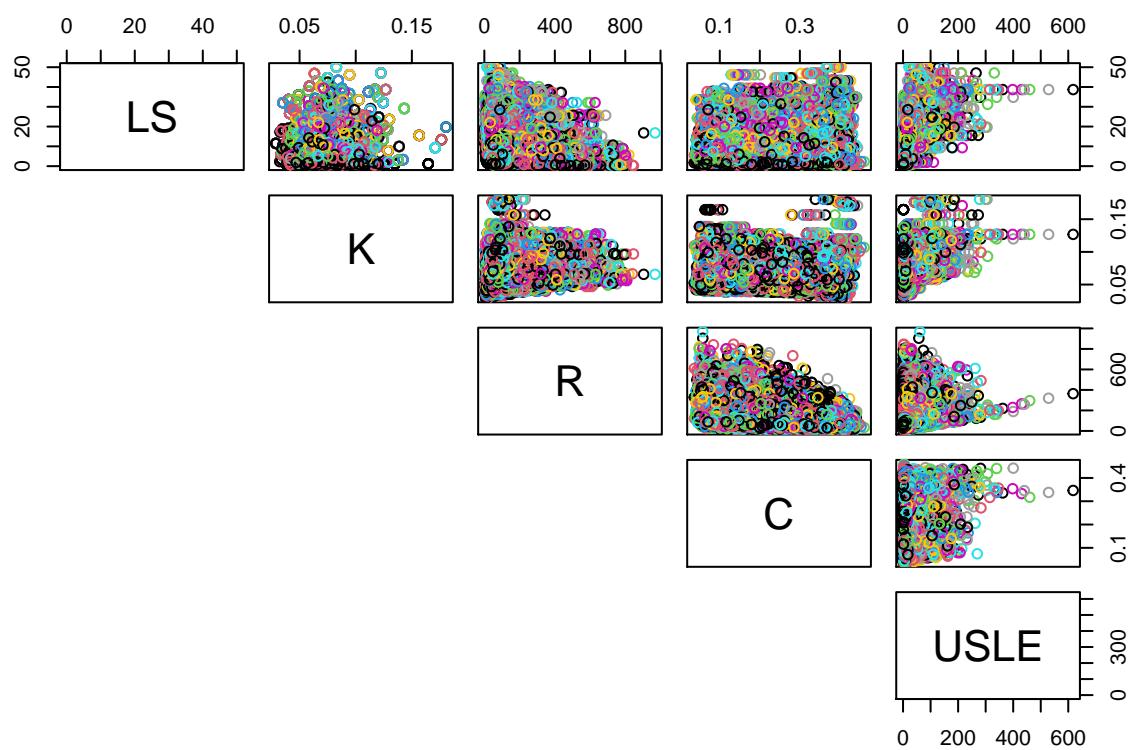


Figure 1: Dispersión de los datos

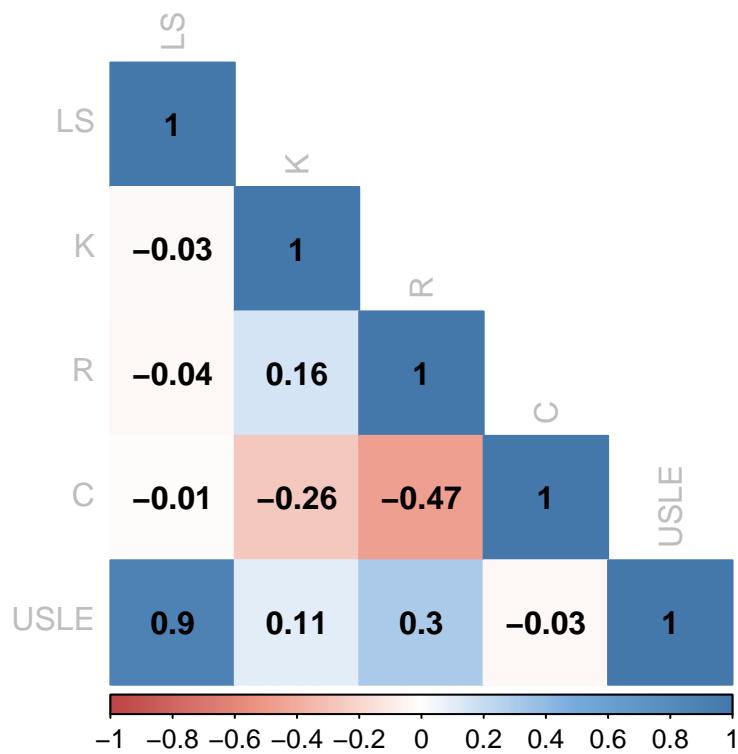


Figure 2: Panel de correlación de los datos

Table 1: Estadísticos del mejor modelo

	(Intercept)	te(Year, C)	te(Year, K)	te(Year, LS)	te(Year, R)	Year	df	logLik	AIC	de
16	10.5428089	+	+	+	+	NA	74	-148022.5	296194.7	0.0
32	2.4485023	+	+	+	+	0.0040280	74	-148022.5	296194.7	0.0
15	10.5428089	NA	+	+	+	NA	59	-149686.7	299492.9	329
31	4.3318546	NA	+	+	+	0.0030908	59	-149686.7	299492.9	329
14	10.5428089	+	NA	+	+	NA	62	-150876.1	301876.9	563
30	-3.0065446	+	NA	+	+	0.0067426	62	-150876.1	301876.9	563
13	10.5428089	NA	NA	+	+	NA	44	-151873.0	303834.9	76
29	1.3048474	NA	NA	+	+	0.0045971	44	-151873.0	303834.9	76
8	10.5428089	+	+	+	NA	NA	61	-151992.4	304107.1	79
24	3.1721254	+	+	+	NA	0.0036679	61	-151992.4	304107.1	79
7	10.5428089	NA	+	+	NA	NA	41	-152187.8	304458.6	820
23	6.1311512	NA	+	+	NA	0.0021954	41	-152187.8	304458.6	820
6	10.5428089	+	NA	+	NA	NA	38	-154435.9	308949.2	12
22	-2.1320993	+	NA	+	NA	0.0063075	38	-154435.9	308949.2	12
5	10.5428089	NA	NA	+	NA	NA	20	-154500.3	309041.0	128
21	0.4615004	NA	NA	+	NA	0.0050168	20	-154500.3	309041.0	128
12	10.5428089	+	+	NA	+	NA	60	-161660.9	323441.9	27
28	-3.4244662	+	+	NA	+	0.0069506	60	-161660.9	323441.9	27
4	10.5428089	+	+	NA	NA	NA	41	-163149.6	326381.9	30
20	-2.4706868	+	+	NA	NA	0.0064760	41	-163149.6	326381.9	30
11	10.5428089	NA	+	NA	+	NA	45	-163395.8	326881.7	300
27	0.1123653	NA	+	NA	+	0.0051906	45	-163395.8	326881.7	300
10	10.5428089	+	NA	NA	+	NA	44	-163713.3	327516.3	31
26	1.7865375	+	NA	NA	+	0.0043574	44	-163713.3	327516.3	31
3	10.5428089	NA	+	NA	NA	NA	24	-164107.1	328262.8	32
19	0.3423742	NA	+	NA	NA	0.0050761	24	-164107.1	328262.8	32
9	10.5428089	NA	NA	NA	+	NA	17	-165159.4	330352.9	34
25	0.1712071	NA	NA	NA	+	0.0051613	17	-165159.4	330352.9	34
2	10.5428089	+	NA	NA	NA	NA	23	-165161.8	330370.1	34
18	0.3078936	+	NA	NA	NA	0.0050933	23	-165161.8	330370.1	34
17	825.7806971	NA	NA	NA	NA	-0.4056919	2	-165956.7	331919.4	35
1	10.5428089	NA	NA	NA	NA	NA	2	-166091.1	332186.3	35

4.2 Contribución de los factores a la erosión de los suelos

La contribución de cada factor tiende a presentar patrones heterogéneos. El factor R (intensidad en las precipitaciones) tiene una mayor contribución hacia las tasas de erosión en el periodo inicial (aprox año 2001), central (aprox años 2009 - 2010) y final (aprox año 2018), la cual para el caso del periodo central se concentra hacia valores moderados a altos del factor R (Fig 3). En el caso del factor K (tipo de suelo), se aprecia un patrón divergente, con mayores aportes hacia el inicio y final del periodo (aprox año 2001 y año 2018), el cual se ve incrementado a altos valores del factor, particularmente en el inicio del periodo, que estarían dando cuenta de zonas altamente erosionables (Fig 4). Esto también se aprecia para el factor LS (topografía), las zonas más escarpadas al parecer tendrían un mayor riesgo a erosionarse en los primeros y últimos años del periodo (aprox año 2001 y año 2018), con especial intensidad en los primeros años (Fig 5). Finalmente, el factor C (cobertura vegetal) presenta un patrón similar a los factores K y LS, aunque menos pronunciado, donde el aporte del factor a la erosión de los suelos estaría siendo mayor en el periodo inicial y final, sin una preferencia marcada hacia zonas con mayor o menos cobertura aparente (Fig 6).

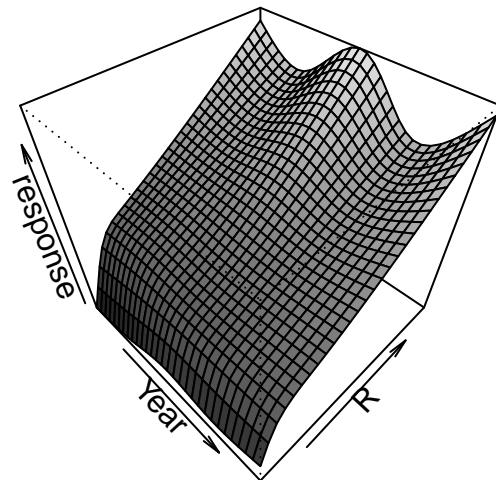


Figure 3: Contribución del factor R a la erosión de los suelos

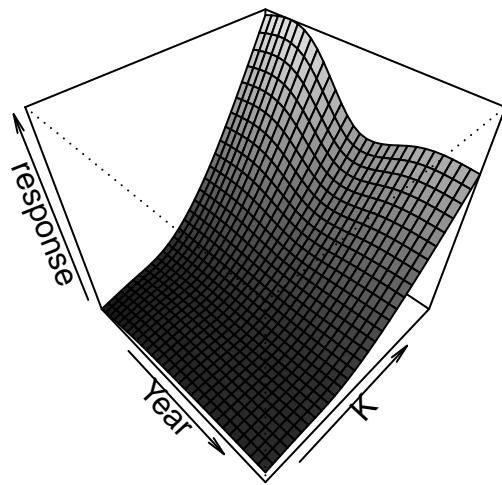


Figure 4: Contribución del factor K a la erosión de los suelos

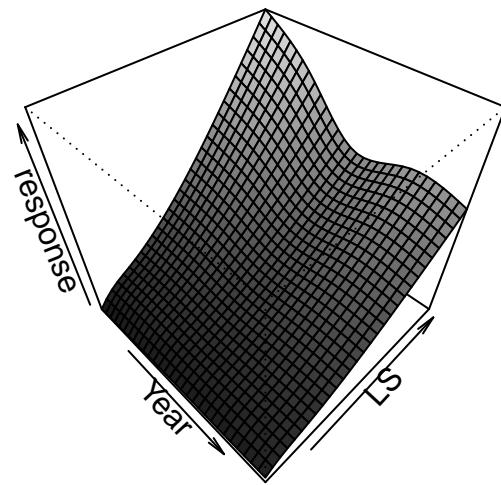


Figure 5: Contribución del factor LS a la erosión de los suelos

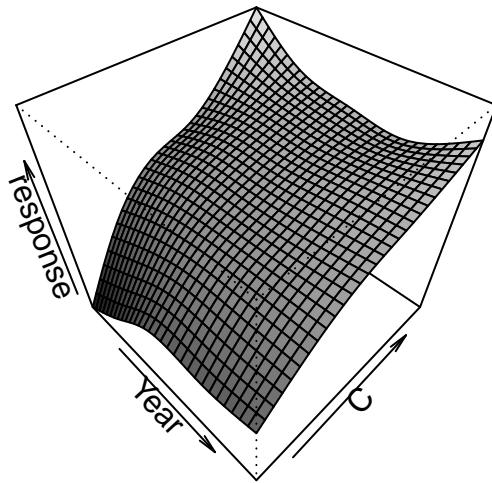


Figure 6: Contribución del factor C a la erosión de los suelos

5 Conclusiones / Discusión

Se pudo determinar que la tasa potencial de erosión se encuentra afectada de manera heterogénea por los factores que la componen, variando estos en intensidad y contribución según el año analizado.

Por otro lado, algunos patrones espaciales del factor K y LS divergen temporalmente con el factor R de precipitaciones, lo que podría estar enmascarando el efecto de otras fuerzas en la incidencia de las tasas de erosión. Algunas de esas fuerzas podrían relacionarse con el cambio de uso de suelos, que al cambiar el tipo de uso propiciaría un aumento en la erosión, aun cuando la cobertura vegetal anual no presentase una variación significativa.

Más aun, se podría estar dando un efecto acumulado, en el que los suelos al haber sido expuestos en el pasado a mayores regímenes de precipitación hayan quedado con una estructura e integridad estructural menor.

Bibliografía

Aguirre-Salado, Carlos Arturo, Liliana Miranda-Aragón, Marín Pompa-García, Humberto Reyes-Hernández, Carlos Soubervielle-Montalvo, Jorge Alberto Flores-Cano, and Heriberto Méndez-Cortés. 2017. "Improving Identification of Areas for Ecological Restoration for Conservation by Integrating Usle and Meda in a Gis-Environment: A Pilot Study in a Priority Region Northern Mexico." *ISPRS International Journal of Geo-Information* 6 (9): 262.

- Almagro, André, Thais Caregnatto Thomé, Carina Barbosa Colman, Rodrigo Bahia Pereira, José Marcato Junior, Dulce Buchala Bicca Rodrigues, and Paulo Tarso Sanches Oliveira. 2019. "Improving Cover and Management Factor (c-Factor) Estimation Using Remote Sensing Approaches for Tropical Regions." *International Soil and Water Conservation Research* 7 (4): 325–34.
- Altieri, Miguel A, and Alejandro Rojas. 1999. "Ecological Impacts of Chile's Neoliberal Policies, with Special Emphasis on Agroecosystems." *Environment, Development and Sustainability* 1 (1): 55–72.
- Ananda, Jayanath, and Gamini Herath. 2003. "Soil Erosion in Developing Countries: A Socio-Economic Appraisal." *Journal of Environmental Management* 68 (4): 343–53.
- Asadzadeh, Farrokh, Maryam Rahmati, Hossein Asgarzadeh, and others. 2015. "SOIL Erosion Risk Mapping Using Usle/Gis Methodology in Roze-Chay Catchment, Northwest Iran."
- Avanzi, Junior Cesar, Marx Leandro Naves Silva, Nilton Curi, Lloyd Darrell Norton, Samuel Beskow, and Sérgio Gualberto Martins. 2013. "Spatial Distribution of Water Erosion Risk in a Watershed with Eucalyptus and Atlantic Forest." *Ciência E Agrotecnologia* 37 (5): 427–34.
- Barahona-Segovia, Rodrigo M, Ignacio Nuñez-Hidalgo, Carlos González-Césped, and José Alejandro S Rojas-Osorio. 2019. "BEYOND the Past and Present: IDENTIFYING Current Trends of Conflicts with Biodiversity, Biological Conservation and Ecosystem Functions." *PERSPECTIVES AND CHALLENGES*, 33.
- Barton, Kamil, and Maintainer Kamil Barton. 2015. "Package 'Mumin'." *Version* 1: 18.
- Bayramov, Emil, Patric Schlager, Martin Kada, Manfred Buchroithner, and Rafael Bayramov. 2019. "Quantitative Assessment of Climate Change Impacts onto Predicted Erosion Risks and Their Spatial Distribution Within the Landcover Classes of the Southern Caucasus Using Gis and Remote Sensing." *Modeling Earth Systems and Environment* 5 (2): 659–67.
- Bonilla, Carlos A, José L Reyes, Antoni Magri, and others. 2010. "Water Erosion Prediction Using the Revised Universal Soil Loss Equation (Rusle) in a Gis Framework, Central Chile." *Chilean Journal of Agricultural Research* 70 (1): 159–69.
- Bonilla, Carlos A, and Karim L Vidal. 2011. "Rainfall Erosivity in Central Chile." *Journal of Hydrology* 410 (1-2): 126–33.
- Borrelli, Pasquale, David A Robinson, Larissa R Fleischer, Emanuele Lugato, Cristiano Ballabio, Christine Alewell, Katrin Meusburger, et al. 2017. "An Assessment of the Global Impact of 21st Century Land Use Change on Soil Erosion." *Nature Communications* 8 (1): 1–13.
- Borrelli, Pasquale, David A Robinson, Panos Panagos, Emanuele Lugato, Jae E Yang, Christine Alewell, David Wuepper, Luca Montanarella, and Cristiano Ballabio. 2020. "Land Use and Climate Change Impacts on Global Soil Erosion by Water (2015-2070)." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 117 (36): 21994–22001.
- Botelho, Thiago HA, Simone de A Jácomo, Rherison TS Almeida, and Nori P Griebeler. 2018. "USE of Usle/Gis Technology for Identifying Criteria for Monitoring Soil Erosion Losses in Agricultural Areas." *Engenharia Agrícola* 38 (1): 13–21.
- Cebecauer, Tomáš, and Jaroslav Hofierka. 2008. "The Consequences of Land-Cover Changes on Soil Erosion Distribution in Slovakia." *Geomorphology* 98 (3-4): 187–98.
- Desmet, PJJ, and Gerard Govers. 1996. "A Gis Procedure for Automatically Calculating the Usle Ls Factor on Topographically Complex Landscape Units." *Journal of Soil and Water Conservation* 51 (5): 427–33.
- Didan, Kamel. 2015. "MOD13Q1 Modis/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m Sin Grid V006." *NASA EOSDIS Land Processes DAAC* 10.
- Doran, John W. 2002. "Soil Health and Global Sustainability: Translating Science into Practice." *Agriculture, Ecosystems & Environment* 88 (2): 119–27.
- Doran, JW, and M Safley. 1997. "Defining and Assessing Soil Health and Sustainable Productivity." *Biological Indicators of Soil Health*. New York: CAB International.

- Eisenberg, Joachim, and Fabrice A Muvundja. 2020. "Quantification of Erosion in Selected Catchment Areas of the Ruzizi River (Drc) Using the (R) Usle Model." *Land* 9 (4): 125.
- Erdogan, Emrah H, Günay Erpul, and İlhami Bayramin. 2007. "Use of Usle/Gis Methodology for Predicting Soil Loss in a Semiarid Agricultural Watershed." *Environmental Monitoring and Assessment* 131 (1-3): 153–61.
- Fick, Stephen E, and Robert J Hijmans. 2017. "WorldClim 2: New 1-Km Spatial Resolution Climate Surfaces for Global Land Areas." *International Journal of Climatology* 37 (12): 4302–15.
- Gaspari, Fernanda Julia, María Isabel Delgado, and Gerardo Andrés Denegri. 2009. "Estimación Espacial, Temporal Y Económica de La Pérdida de Suelo Por Erosión Hídrica Superficial." *Terra Latinoamericana* 27 (1): 43–51.
- Gayoso, Jorge. 1996. "Costos Ambientales En Plantaciones de Pinus Radiata d. Don." *Bosque* 17 (2): 15–26.
- Gorelick, Noel, Matt Hancher, Mike Dixon, Simon Ilyushchenko, David Thau, and Rebecca Moore. 2017. "Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone." *Remote Sensing of Environment* 202: 18–27.
- Gwapedza, David, Denis A Hughes, and Andrew R Slaughter. 2018. "Spatial Scale Dependency Issues in the Application of the Modified Universal Soil Loss Equation (Musle)." *Hydrological Sciences Journal* 63 (13-14): 1890–1900.
- Halecki, Wiktor, Edyta Kruk, and Marek Ryczek. 2018. "Loss of Topsoil and Soil Erosion by Water in Agricultural Areas: A Multi-Criteria Approach for Various Land Use Scenarios in the Western Carpathians Using a Swat Model." *Land Use Policy* 73: 363–72.
- Hengl, Tomislav, Jorge Mendes de Jesus, Gerard BM Heuvelink, Maria Ruiperez Gonzalez, Milan Kilibarda, Aleksandar Blagotić, Wei Shangguan, et al. 2017. "SoilGrids250m: Global Gridded Soil Information Based on Machine Learning." *PLoS One* 12 (2): e0169748.
- Huete, Alfredo, Kamel Didan, Tomoaki Miura, E Patricia Rodriguez, Xiang Gao, and Laerte G Ferreira. 2002. "Overview of the Radiometric and Biophysical Performance of the Modis Vegetation Indices." *Remote Sensing of Environment* 83 (1-2): 195–213.
- Huete, AR. 2004. "Remote Sensing for Environmental Monitoring." In *Environmental Monitoring and Characterization*, 183–206. Elsevier.
- Karlen, Douglas L, and Charles W Rice. 2015. "Soil Degradation: Will Humankind Ever Learn?" Multidisciplinary Digital Publishing Institute.
- Keesstra, Saskia D, Johan Bouma, Jakob Wallinga, Pablo Tittonell, Pete Smith, Artemi Cerdà, Luca Montanarella, et al. 2016. "The Significance of Soils and Soil Science Towards Realization of the United Nations Sustainable Development Goals." *Soil*.
- Khatoon, Hina, Praveen Solanki, Maitrayie Narayan, Lakshmi Tewari, J Rai, and C Hina Khatoon. 2017. "Role of Microbes in Organic Carbon Decomposition and Maintenance of Soil Ecosystem." *International Journal of Chemical Studies* 5 (6): 1648–56.
- Kisan, Mali Vijay, Pathak Khanindra, Tiwari Kamlesh Narayan, and Tripathy Swarup Kumar. 2016. "Remote Sensing and Gis Based Assessment of Soil Erosion and Soil Loss Risk Around Hill Top Surface Mines Situated in Saranda Forest, Jharkhand." *Journal of Water and Climate Change* 7 (1): 68–82.
- Kotttek, Markus, Jürgen Grieser, Christoph Beck, Bruno Rudolf, and Franz Rubel. 2006. "World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated." *Meteorologische Zeitschrift* 15 (3): 259–63.
- Lagos, M, J Espinoza, and R Ortiz. 1994. "Erosión de Los Suelos En Chile." *Erosión Del Suelo En América Latina. Suelos Y Agua. FAO. Chile.*
- Lal, R. 2016. "Soil Health and Carbon Management. Food Energy Secur 5 (4): 212–222."

- Lal, Rattan. 2015. "Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation." *Sustainability* 7 (5): 5875–95.
- Lal, Rattan, and others. 1990. *Soil Erosion in the Tropics: Principles and Management*. McGraw Hill.
- López-García, Erika María, Edgardo Torres-Trejo, Lucia López-Reyes, Ángel David Flores-Domínguez, Ricardo Dario Peña-Moreno, and Jesús Francisco López-Olgún. 2019. "Estimation of Soil Erosion Using Usle and Gis in the Locality of Tzicatlacoyan, Puebla, México." *Soil and Water Research* 15 (1): 9–17.
- Mahapatra, SK, GP Obi Reddy, Ritu Nagdev, RP Yadav, SK Singh, and VN Sharda. 2018. "Assessment of Soil Erosion in the Fragile Himalayan Ecosystem of Uttarakhand, India Using Usle and Gis for Sustainable Productivity." *Current Science* 115 (1): 108.
- Menta, Cristina. 2012. "Soil Fauna Diversity-Function, Soil Degradation, Biological Indices, Soil Restoration." *Biodiversity Conservation and Utilization in a Diverse World*, 49–94.
- Miranda, Alejandro, Adison Altamirano, Luis Cayuela, Antonio Lara, and Mauro González. 2017. "Native Forest Loss in the Chilean Biodiversity Hotspot: Revealing the Evidence." *Regional Environmental Change* 17 (1): 285–97.
- Montanarella, Luca. 2015. "Agricultural Policy: Govern Our Soils." *Nature* 528 (7580): 32–33.
- Montanarella, Luca, Mohamed Badraoui, Victor Chude, IDSB Costa, Tekalign Mamo, Martin Yemefack, MS AULANG, et al. 2015. "Status of the World's Soil Resources: Main Report." *Embrapa Solos-Livro Científico (ALICE)*.
- Myers, Norman. 1984. "Gaia: An Atlas of Planet Management."
- Orgiazzi, Alberto, Richard D Bardgett, Edmundo Barrios, and others. 2016. *Global Soil Biodiversity Atlas*. European Commission.
- Pimentel, David, Celia Harvey, Pradnya Resosudarmo, K Sinclair, D Kurz, M McNair, S Crist, et al. 1995. "Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits." *Science* 267 (5201): 1117–23.
- Pradhan, Biswajeet, Amruta Chaudhari, J Adinarayana, and Manfred F Buchroithner. 2012. "Soil Erosion Assessment and Its Correlation with Landslide Events Using Remote Sensing Data and Gis: A Case Study at Penang Island, Malaysia." *Environmental Monitoring and Assessment* 184 (2): 715–27.
- Reeves, DW. 1997. "The Role of Soil Organic Matter in Maintaining Soil Quality in Continuous Cropping Systems." *Soil and Tillage Research* 43 (1-2): 131–67.
- Robinson, David A, Panos Panagos, Pasquale Borrelli, Arwyn Jones, Luca Montanarella, Andrew Tye, and Carl G Obst. 2017. "Soil Natural Capital in Europe; a Framework for State and Change Assessment." *Scientific Reports* 7 (1): 1–14.
- Rojas, Ronald Vargas, Moujahed Achouri, Jerry Maroulis, and Lucrezia Caon. 2016. "Healthy Soils: A Prerequisite for Sustainable Food Security." *Environmental Earth Sciences* 75 (3): 180.
- Sanderman, Jonathan, Tomislav Hengl, and Gregory J Fiske. 2017. "Soil Carbon Debt of 12,000 Years of Human Land Use." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114 (36): 9575–80.
- Sarricolea, Pablo, María José Herrera-Ossandon, and Óliver Meseguer-Ruiz. 2017. "Climatic Regionalisation of Continental Chile." *Journal of Maps* 13 (2): 66–73.
- Sharpley, Andrew N, and Jimmy R Williams. 1990. "EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. I: Model Documentation. II: User Manual." *Technical Bulletin-United States Department of Agriculture*, no. 1768.
- Silva, Bárbara Pereira Christofaro, Marx Leandro Naves Silva, Pedro Velloso Gomes Batista, Lucas Machado Pontes, Elias Frank Araújo, and Nilton Curi. 2016. "Soil and Water Losses in Eucalyptus Plantation and Natural Forest and Determination of the Usle Factors at a Pilot Sub-Basin in Rio Grande Do Sul, Brazil." *Ciência E Agrotecnologia* 40 (4): 432–42.

Silva, Richard Marques da, Celso AG Santos, and Alexandre Medeiros Silva. 2014. "Predicting Soil Erosion and Sediment Yield in the Tapacurá Catchment, Brazil." *Journal of Urban and Environmental Engineering* 8 (1): 75–82.

Sone, Jullian S, Gabriela C Gesualdo, Pedro AP Zamboni, Nelson OM Vieira, Tiago S Mattos, Glauber A Carvalho, Dulce BB Rodrigues, Teodorico Alves Sobrinho, and Paulo Tarso S Oliveira. 2019. "Water Provisioning Improvement Through Payment for Ecosystem Services." *Science of the Total Environment* 655: 1197–1206.

Southgate, Douglas, and Morris Whitaker. 1992. "Promoting Resource Degradation in Latin America: Tropical Deforestation, Soil Erosion, and Coastal Ecosystem Disturbance in Ecuador." *Economic Development and Cultural Change* 40 (4): 787–807.

Tosic, Radislav, Slavoljub Dragicevic, Stanimir Kostadinov, Nada Dragovic, and others. 2011. "ASSESSMENT of Soil Erosion Potential by the Usle Method: CASE Study, Republic of Srpska- Bih." *Fresenius Environmental Bulletin* 20 (8): 1910–7.

Treviño, KN, and DE Starkey. 2019. "STRATIFICATION in Topsoil: A Preliminary Analysis of Bacterial Biodiversity at Two Sites in San Antonio, Texas." *Texas Journal of Science* 71 (1): Article-3.

Vagaria Alfonso, Rodriguez, and Gaspari Fernanda. 2015. "Estimation of the Soil Loss Admissibility by Water Erosion in the Stream Napaleofu Basin, Buenos Aires Province-Argentina." *REVISTA GEOGRAFICA VENEZOLANA* 56 (1): 105–19.

Wischmeier, Walter H, and Dwight David Smith. 1978. *Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning*. 537. Department of Agriculture, Science; Education Administration.

Wood, Simon N. 2001. "Mgcv: GAMs and Generalized Ridge Regression for R." *R News* 1 (2): 20–25.

Yang, Yuanyuan, Ruiying Zhao, Zhou Shi, Raphael A Viscarra Rossel, Dan Wan, and Zongzheng Liang. 2018. "Integrating Multi-Source Data to Improve Water Erosion Mapping in Tibet, China." *Catena* 169: 31–45.

Yue, Tianyu, Yun Xie, Shuiqing Yin, Bofu Yu, Chiyuan Miao, and Wenting Wang. 2020. "Effect of Time Resolution of Rainfall Measurements on the Erosivity Factor in the Usle in China." *International Soil and Water Conservation Research*.