

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EVALUACION DE LA EROSION DESENCADENADA POR EL INCENDIO
2017 EN LA SUBCUENCA DE SANTA OLGA, SECANO INTERIOR DE LA
REGION DEL MAULE**

JUAN PABLO CAMUS ORELLANA

Santiago, Chile

2020

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**EVALUACION DE LA EROSION DESENCADENADA POR EL INCENDIO
2017 EN LA SUBCUENCA DE SANTA OLGA, SECANO INTERIOR DE LA
REGION DEL MAULE**

**EVALUATION OF THE EROSION TRIGGERED BY FIRE 2017 IN THE
SANTA OLGA SUB-BASIN, DRYLAND REGION OF MAULE**

JUAN PABLO CAMUS ORELLANA

Santiago, Chile

2020

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**EVALUACION DE LA EROSION DESENCADENADA POR EL INCENDIO EN
LA SUBCUENCA DE SANTA OLGA, SECANO INTERIOR DE LA REGION
DEL MAULE**

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

JUAN PABLO CAMUS ORELLANA

PROFESORES GUÍAS

Sr. Mauricio Galleguillos Torres
Ingeniero Agrónomo, Mg. Sc, PhD.



Calificaciones

6,8

PROFESORES EVALUADORES

Sr. Marco Pfeiffer Jakob
Ingeniero Agrónomo, Mg S.c.

6,5

Sra. M. Verónica Díaz M.
Ingeniera Agrónoma, Mg Sc.

5,8

COLABORADORA

Sra. Violeta Tolorza T.
Geóloga, PhD

Santiago, Chile
2020

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecimientos a mi familia, a mi madre María y papá Pedro por todos estos años de enseñanza, preocupación, acompañamiento y consejos para poder terminar esta etapa. A mi tío Hernán y también a mis abuelos Adriana y Roberto por todo su apoyo educacional también.

Agradecimientos a grandes personas con quienes pude compartir en este proceso, especialmente con quienes pude compartir en Forestal. También agradecer a amigos y amigas que me apoyaron, ayudaron y acompañaron en este ciclo, a Nicolás, Pepe, Sótero; Aileen, Tania, Kika y Caro. Un saludo especial a Nico González, por su amistad desde el colegio en todos estos años.

Doy las gracias especialmente a María por su amor, compañía y consejos.

Gracias también a Violeta Tolorza por proponer el tema de tesis, junto a sus correcciones. Muchas gracias también a Mauricio Galleguillos por dedicar su tiempo valioso en guiar y poder sugerir soluciones oportunas y mejoras para terminar este trabajo. Así como también a los profesores Verónica Díaz y Marco Pfeiffer.

Finalmente doy gracias a toda aquella persona que, mediante algún consejo, palabra de aliento, risa o anécdota haya podido hacer esta etapa universitaria un buen recuerdo.

*“... Ya me he quemado bastante las pestañas
En esta absurda carrera de caballos
En que los jinetes son arrojados de sus cabalgaduras
Y van a caer entre los espectadores.*

*Justo es entonces que traté de crear algo
Que me permita vivir holgadamente
O que por lo menos me permita morir...”*

Nicanor Parra

INDICE

INTRODUCCIÓN	13
Objetivo General	15
Objetivos Específicos.....	15
MATERIALES Y MÉTODOS	16
Área de estudio	16
METODOLOGÍA	18
Parametrizar factores relevantes para la erosión post incendio en la región de estudio, que permitan alimentar un modelo de procesos.	18
El modelo WEPP.	18
La interfaz Geoespacial de WEPP.	21
Obtención y preparación de los datos de entrada necesarios para WEPP y GeoWEPP	23
Topografía.....	23
Cobertura de suelo.	23
Información de Suelos.	24
Información geoespacial de suelos	25
Información de terreno de suelo.	25
Clima.	27
Procesamiento de datos para creación de Base de Datos Climática.. ..	29
Conformación del archivo climático.....	29
Información de manejo de la vegetación.	29
Imágenes satelitales históricas de Google Earth.	30
Datos de Altura de la canopia	31
Archivos de cobertura de suelo WEPP	31
Datos diarios de escorrentía y sedimentos suspendidos..	31
Evaluar y cuantificar espacialmente la erosión post incendio utilizando un modelo de procesos en la región de estudio.....	32
Generación de escenarios.....	32
Funcionamiento de GeoWEPP y productos del modelo.....	32
Calibración del modelo para escenario con incendio.....	34
Análisis de sensibilidad para escenario con incendio	35
Evaluación del desempeño del modelo	36
Simulación espacio-temporal de erosión para ambos escenarios	36

RESULTADOS Y DISCUSION	38
Parametrizar factores relevantes para la erosión post incendio en la región de estudio, que permitan alimentar un modelo de procesos.....	38
Topografía	38
Cobertura del suelo.....	40
Severidad de incendio.....	42
Cobertura de suelos y Severidad de incendio.....	43
Informacion de Suelos.	44
Informacion Geoespacial de Suelos.....	44
Informacion Geoespacial SOTERLAC.....	46
Informacion de terreno de suelos	47
Clima.....	48
Información de manejo de la vegetación	48
Imágenes satelitales históricas de Google Earth	49
Datos de Altura de la canopia	49
Datos diarios de escorrentía y sedimentos suspendidos	50
Evaluar y cuantificar espacialmente la erosión post incendio utilizando un modelo de procesos en la región de estudio.....	52
Funcionamiento de GeoWEPP y productos del modelo	52
Calibración del modelo para escenario con incendio	53
Análisis de sensibilidad para escenario con incendio.....	53
Evaluación del desempeño del modelo	55
Simulación espacio-temporal de erosión para ambos escenarios.....	57
CONCLUSIONES	65
BIBLIOGRAFÍA	67
ANEXOS	84
APÉNDICES.....	89

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio y de modelación WEPP y GeoWEPP: Subcuenca de Santa Olga.....	16
Figura 2. Representación de una ladera con cambios de pendientes, en el modelo WEPP.....	21
Figura 3. Modelo Digital de Elevación LIDAR, Subcuenca de Santa Olga.....	39
Figura 4. Curva de elevación de la subcuenca Santa Olga.	39
Figura 5. Clasificación Supervisada, Subcuenca de Santa Olga.....	41
Figura 6. Porcentajes de las clases de cobertura de suelo de la Clasificación Supervisada, Subcuenca de Santa Olga	41
Figura 7. Severidad de incendio, Subcuenca de Santa Olga.....	42
Figura 8. Cobertura de suelos intersectada con Severidad de incendio, Subcuenca de Santa Olga.....	43
Figura 9. Tipos de suelos, Subcuenca de Santa Olga.....	45
Figura 10. Porcentajes de los tipos de suelos, Subcuenca de Santa Olga.....	46
Figura 11. Información Geoespacial SOTERLAC, Subcuenca de Santa Olga	47
Figura 12. Información diaria de sedimentos suspendidos registrados por estación Quebrada Pasitos entre periodo 15/03/2018 y 30/09/2018, sin considerar abril de ese mismo año.....	51
Figura 13. Información diaria de escorrentía registrada por estación Quebrada Pasitos entre periodo 15/03/2018 y 30/09/2018, sin considerar abril de ese mismo año.....	51
Figura 14. Discretización de subcuencas generada por GeoWEPP para ambos escenarios, Subcuenca de Santa Olga.	52
Figura 15. Gráfico de correlación estadística entre datos de producción de sedimentos modelados por WEPP y GeoWEPP versus datos observados de estación Quebrada Pasitos, modelación sin incendio.	57
Figura 16. Estimación de producción de sedimentos mediante GeoWEPP y WEPP, en escenario sin incendio y con incendio. Subcuenca de Santa Olga.....	60
Figura 17. Distribución espacial de cobertura de suelo Bosque Nativo, Subcuenca de Santa Olga, en base a Clasificación Supervisada de Purapel 2015.....	117

Figura 18. Cambios de manejo detectados para cobertura de suelo Bosque Nativo, en base a imagen de GEP del 25/02/2016.....118

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clases de cobertura de suelos y Severidad de Incendio	44
Cuadro 2. Alturas de canopia utilizadas para simulación sin incendio.....	50
Cuadro 3. Eventos generados por GeoWEPP y WEPP que coincidieron temporalmente con datos observados de estacion Quebrada Pasitos, en modelacion con incendio (previo a la calibración).....	53
Cuadro 4. Variación porcentual positiva y negativa de los niveles “base” de parámetros sensibles para 3 series de suelo, con su respectivo R^2 , para modelación con incendio. .	54
Cuadro 5. Eventos generados por GeoWEPP y WEPP que coincidieron temporalmente con datos observados de estacion Quebrada Pasitos, en modelacion con incendio.....	56
Cuadro 6. Pérdida de suelo y producción de sedimentos de laderas, generadas por GeoWEPP, en escenario sin incendio.	61
Cuadro 7. Pérdida de suelo y producción de sedimentos de laderas, generadas por GeoWEPP, en escenario con incendio.	62
Cuadro 8. Información resumida de las variables de salida de la modelación sin incendio y con incendio, utilizando WEPP y GeoWEPP.	63

GLOSARIO DE SIGLAS

AGROMET:	Red Agrometeorológica
ASCII:	<i>American Standard Code for Information Interchange</i>
CIC:	Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo
CIREN:	Centro de Información de Recursos Naturales
CLIGEN:	<i>CLImate GENerator</i>
CONAF:	Corporación Nacional Forestal
CORFO:	Corporación de Fomento de la Producción
CSA:	<i>Critical Source Area</i>
DGA:	Dirección General de Aguas
DEM:	<i>Digital Elevation Model</i>
ETM+:	<i>Enhanced Thematic Mapper Plus</i>
FONDECYT:	Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico
GEP:	Google Earth Pro
LIDAR:	<i>Laser Imaging Detection and Ranging</i>
MSCL:	<i>Minimum Source Channel Length</i>
m.s.n.m.:	Metros sobre el nivel del mar
NRCS:	<i>Natural Resources Conservation Service</i>
OFE:	<i>Overland Flow Elements</i>
OLI:	<i>Operational Land Imager</i>
RECM:	Raíz del Error Cuadrático Medio
RUSLE:	<i>Revised Universal Soil Loss Equation</i>
SIG:	Sistema de Información Geográfica
SOTERLAC:	<i>Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean</i>
SP:	Sesgo Porcentual
TOPAZ:	<i>TOpographic ParameteriZation</i>
TM5:	<i>Landsat Thematic Mapper 5</i>
USDA:	<i>United States Department of Agriculture</i>
UTF-8:	<i>8-bit Unicode Transformation Format</i>
UTM:	<i>Universal Transverse Mercator</i>
USLE	<i>Universal Soil Loss Equation</i>
WEPP:	<i>Water Erosion Prediction Project</i>

RESUMEN

La zona centro-sur de Chile se ha caracterizado históricamente sus procesos de cambios de uso de suelo desde sistemas naturales hacia actividades agrícolas y forestales. A escala de las últimas décadas, en la misma zona también se han registrado las mayores ocurrencias de incendios forestales, destacándose el episodio del incendio “las Maquinas” el año 2017. Estos incendios generan impactos en las cuencas siendo de particular importancia la pérdida de suelo y producción de sedimentos provocado por la erosión de laderas. El modelo basado en procesos WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) fue utilizado junto con información geoespacial de la subcuenca, mediante su interfaz SIG GeoWEPP. El modelo fue aplicado para un periodo de 9 años (01/01/2010 al 31/12/2018) donde la subcuenca fue subdividida en 107 unidades hidrológicas, considerando 2 escenarios (sin la ocurrencia del incendio y con la ocurrencia de éste). Para investigar la evaluación del desempeño del modelo, los valores diarios de flujo de sedimentos generados por GeoWEPP fueron comparados con datos diarios observados de la estación Quebrada Pasitos Santa Olga, para el año 2018. En el escenario con incendio, se realizó una calibración manual modificando los siguientes parámetros sensibles de suelo del modelo relacionados a la producción de sedimentos: erosionabilidad en los regueros, erosionabilidad entre regueros y esfuerzo de corte crítico. La variación porcentual que arrojó mejor exactitud y precisión de ese escenario fue variar los parámetros sensibles de suelo en +10, en que el Coeficiente de Determinación (R^2), Sesgo Porcentual (SP) y Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM) fueron de 0,9440, 62% y 141,60 respectivamente. La evaluación de escenarios muestra que, para un escenario ficticio sin incendio, el promedio anual de sedimentos que debería haber llegado a los canales es de $285 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, el promedio anual de pérdida de suelo en las laderas es de $19,2 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, la producción de sedimentos es de $1,5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y la tasa de rendimiento de éstos por subcuenca es de 0,649. Al simular un escenario real con ocurrencia de incendio, los resultados fueron de $612,7 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de promedio anual de flujo de sedimentos en los canales, $280 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en promedio anual de pérdida de suelo en laderas, $3,1 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de producción de sedimentos y la tasa de rendimiento por subcuenca es de 0,463. En ambos escenarios, las mayores tasas de erosión se ubican en coberturas de suelo desnudo y plantación forestal, suelos Alfisoles y pendientes pronunciadas; y las laderas que generan más sedimentos se ubican en la cabecera y en sectores adyacentes a canales y quebradas, en escenario sin incendio y con incendio respectivamente. De los 3 parámetros sensibles de suelo, el más influyente fue la erodabilidad entre regueros ya que la producción de sedimentos media anual que ocurre en canales fue 14 y 2 veces (sin incendio y con incendio respectivamente) más grande que la que ocurre en laderas.

Palabras clave: WEPP, GeoWEPP, Incendio “Las Máquinas”, erosión, modelación, análisis de sensibilidad.

ABSTRACT

Historically, the use of soil in the central-southern area of Chile has been characterized by its constant processes of change from natural systems towards agricultural and forestry activities. Furthermore, in the last decades, there has been an increased number of forest fires, including “Las Máquinas” fire in 2017. These fires have generated a great impact in the basins, being the loss of soil and sediment production caused by hillside erosion the most affected. In this investigation, the process-based model- WEPP (Water Erosion Prediction Project) - and the geospatial information obtained from the subbasin, through GeoWEPP GIS interface, were used. The model was applied for a period of 9 years (01/01/2010 to 12/31/2018) where the subbasin was divided into 107 hydrological units, taking into consideration two different scenarios (the presence of the fire and absence of it). In order to evaluate the performance of the model, the daily values of sediment flow generated by GeoWEPP were compared with daily data observed from Quebrada Pasitos Santa Olga station, during the year 2018. In the fire scenario, a manual calibration was performed by modifying the following soil sensitive parameters of the model related to the production of sediments: the rill erodibility, the interrill erodibility and critical shear stress. The most accurate and precise percentage variance in that scenario was to vary the sensitivity of soil parameters on +10, in which the Coefficient of Determination (R^2), Percent Bias (SP) and Root Mean Square Error (RMSE) were 0,9440, 62% and 141,60 respectively. The scenarios evaluation indicates that in a fictitious situation without the occurrence of fire, the annual average of sediments discharge in the canals was 285 tons ha^{-1} per year $^{-1}$; the average annual total soil loss was 19,2 ton ha^{-1} year $^{-1}$; the sediment production was 1.5 ton ha^{-1} year $^{-1}$; and the yield rate of these by sub-basin was 0,649. When simulating a real scenario with the occurrence of fire, the results were 612,7 ton ha^{-1} year $^{-1}$ of annual average of sediment flow in the canals; 280 ton ha^{-1} year $^{-1}$ in annual average of soil loss on slopes; 3,1 ton ha^{-1} year $^{-1}$ of sediment production; and the yield rate per subbasin was 0,463. In both scenarios, the highest erosion rates are found in bare soil and forest plantation, Alfisol soils and steep slopes. Besides, the slopes that generate more sediment are in the headwaters and in the nearby canals and streams areas, in a scenario without and with fire respectively. The most influential sensitive parameters of soil was the erodibility between ditches since the annual average of sediment production in canals was 14 and 2 times greater than the one happening on the slopes (without fire and with fire respectively).

Keywords: WEPP, GeoWEPP, Forest Fire “Las Máquinas”, erosion, modeling, sensitivity analysis.

INTRODUCCIÓN

Chile posee marcada influencia de clima tipo mediterráneo que favorece la propagación y ocurrencia de incendios forestales (Castillo et al, 2013). Un incendio forestal es definido como el fuego que se propaga sin control por terrenos forestales, y que genera destrucción de vegetación arbustiva, herbácea, hojarasca, humus, material orgánico, raíces y copas de árboles (Julio y Bosnich, 2005). Los impactos de los incendios forestales dependen de la topografía, de la recurrencia, duración e intensidad del fuego. Los efectos ambientales de los incendios forestales se manifiestan en vegetación quemada (Foldi y Kuti, 2016), muerte de animales y su pérdida de hábitat (Moser et al. 1990), junto a la polución del aire (López-Díaz et al., 2011) y de las aguas (Bagnold, 1997). Los efectos directos de los incendios forestales son la destrucción de viviendas e infraestructura, muerte de vidas humanas y daño a los cultivos (He et al., 2015), mientras que los efectos indirectos son las inundaciones aceleradas, remociones en masa, contaminación de aguas y erosión del suelo (Santin y Doerr, 2016). Otros efectos son la reducción de la infiltración en los suelos de las áreas quemadas y el aumento y amplificación de la generación de escorrentía post tormenta (Ebel et al., 2012).

La erosión de laderas aumenta dramáticamente después de los incendios forestales debido a los cambios en las propiedades hidrológicas del suelo y a la ausencia de cobertura vegetal (Ebel et al., 2012). Hay numerosa evidencia de que la tasa de erosión se relaciona con la intensidad de las lluvias después del desastre, las configuraciones geomorfológicas de las áreas quemadas (Wagenbrenner y Robichaud, 2014) y la severidad de los incendios, ya que se induce a la repelencia al agua debajo y en la superficie del suelo (Larsen y McDonald, 2007). La variación espacio-temporal de las precipitaciones genera mecanismos de remoción de sedimentos en cantidades mayores que las condiciones normales (Moody y Martin, 2009) al interior de las cuencas, junto a la movilización de flujos de sedimentos (Cannon et al., 2010), los cuales fluyen hacia las redes de canales aguas abajo y embalses (Warrick et al., 2008).

El reciente evento de Mega Sequía en Chile Central (2010-2015) tuvo significativos impactos en la hidrología superficial y subterránea de las cuencas, junto al aumento de actividad del fuego a lo largo de Chile Central (Gallardo et al., 2015). Durante el verano del 2017, en la zona centro-sur del país se desarrollaron los más grandes incendios registrados en los últimos 40 años (CONAF, 2017a). El área incendiada entre las regiones de Valparaíso y del Bío-Bío, hasta el 28 de febrero del 2017, fue de 594.783 ha. aproximadamente (De la Barrera y Ruiz, 2017). La afectación de este Mega Incendio en la Región del Maule fue de 290.762 ha quemadas (CONAF, 2017a), en que 147.139 corresponden a plantaciones forestales siendo el uso de suelo más afectado (Arias, 2017).

Históricamente, estos territorios se han visto afectado por masivas plantaciones exóticas de *Pinus radiata* y *Eucaliptus* spp., lo que ha generado impactos ecológicos debido a la fragmentación del bosque nativo (Aronson et al., 1998). Los paisajes de la Cordillera de la Costa de la Región del Maule presentan altas dinámicas espacio-temporales de cobertura de suelo, debido a los manejos forestales de las plantaciones exóticas y a los cambios de uso de suelo desde bosque nativo y matorral hacia plantaciones (Sotomayor, 2017). Algunos efectos

importantes de estas perturbaciones son la transformación de la precipitación en escorrentía superficial (Foley et al., 2005) debido a la pérdida de la cobertura vegetal, lo cual desencadena procesos erosivos y deterioro de la capacidad de almacenar agua del suelo. Además, se ha observado disminución en la tasa de infiltración (Conacher y Sala, 1998) y en la provisión de agua durante la estación seca, incluso en grandes cuencas (Little et al., 2009). Lo anterior genera a su vez pérdida de limo, arcilla, materia orgánica (Lal, 2003) y nutrientes como potasio (Dechen et al., 2015) disminución en la retención de nitrógeno y fósforo en el suelo (Oyarzún et al., 2006), lo que aumenta la erodabilidad de este recurso natural (Banfield et al., 2018).

El secano costero de la Región del Maule presenta degradación severa y muy severa del suelo, principalmente en aquellas zonas que presentan agricultura y plantaciones forestales (Flores et al., 2010). Dado que ha existido un incremento de la ocurrencia de incendios forestales en el sector centro-sur del país en ecosistemas propensos al fuego (González et al., 2011), se hace necesaria la utilización de métodos para cuantificar e identificar las zonas afectadas por erosión del suelo (Renschler et al., 2002).

En los últimos años los esfuerzos para lograr mejores predicciones de la erosión del suelo por el flujo superficial del agua han hecho hincapié en generar bases confiables de los niveles de erosión hídrica y transporte de sedimentos (Lal, 2001). Para lograr este propósito, existen los modelos empíricos simples los cuales se basan en observaciones y relaciones estadísticas, pero no permiten realizar simulaciones de los procesos erosivos como un conjunto de fenómenos físicos de la realidad (Amore et al., 2004). Dos ejemplos bastantes utilizados son la Versión Revisada de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (RUSLE en inglés) y su versión previa llamada Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE) (Bonilla et al., 2010). Por otra parte, y considerando las limitaciones de éstos, se han desarrollado modelos de base física (o de procesos) los cuales permiten mejores evaluaciones temporales y espaciales de los procesos de erosión (Nearing et al. 1989), posibilitan mayores aplicabilidades y son más complejos en relación con el requerimiento de los datos de entrada (Amore et al., 2004).

El modelo Water Erosion Prediction Project (WEPP), basado en procesos, permite estimar espacial y temporalmente la distribución de pérdida neta de suelo, extrapolar los resultados obtenidos a áreas no monitoreadas y predecir el transporte de sedimentos fuera de microcuencas (Nearing y Nicks, 1998). La integración de WEPP con un SIG ha sido facilitada y mejorada mediante herramientas como GEOWEPP, que utiliza información georreferenciada como los modelos digitales de elevación, uso de suelo y mapas de suelo con el objetivo de evaluar varios escenarios de uso de suelo para asistir en la planificación de la conservación del suelo y el agua en el paisaje (Renschler et al., 2002).

La importancia de esta investigación radica en que los efectos de la erosión debido a incendios forestales generan cambios irreversibles a escala de cuenca y paisaje en los territorios, por lo que se hace necesario, a futuro, idear medidas para mitigar o revertir los impactos de los incendios forestales en la degradación de los suelos (Rulli et al., 2013).

Objetivo General

Estimar la erosión a escala de subcuenca posterior al incendio “Las Máquinas” en la Subcuenca de Santa Olga, Secano costero interior, Región del Maule.

Objetivos Específicos

1. Parametrizar factores relevantes para la erosión post incendio en la región de estudio, que permitan alimentar un modelo de procesos.
2. Evaluar y cuantificar espacialmente la erosión post incendio utilizando un modelo de procesos en la región de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio es la subcuenca de Santa Olga, perteneciente a la Cuenca de Purapel, en el secano costero interior de la región del Maule, dentro del área definida como “Río Maule-Cobquecura” (Echeverría et al., 2006). Esta subcuenca se ubica en el flanco oeste de la Cordillera de la Costa, entre los paralelos $35^{\circ} 27'$ y $35^{\circ} 29'$ de latitud Sur y entre los meridianos $72^{\circ} 18'$ y $72^{\circ} 17'$ de longitud Oeste, abarcando un área de 173 ha. La subcuenca se encuentra definida por la estación fluviométrica Quebrada Pasitos ($35^{\circ} 28' S - 66^{\circ} 17' O$) (DGA, 2018) y administrativamente se ubica en la comuna de Constitución a una distancia de 1,9 km al SO de la localidad de Santa Olga. La Quebrada Pasitos es parte de la red hidrográfica, la cual fluye por la subcuenca desde dirección Sur hacia la dirección Noreste para continuar en esa misma dirección hasta confluir con las aguas del Río Purapel (Figura 1). Este río presenta un régimen hidrológico netamente pluvial, lo que implica que se abastece de agua-lluvia caída y que en los meses estivales su cauce es prácticamente nulo (Jordan, 2002).

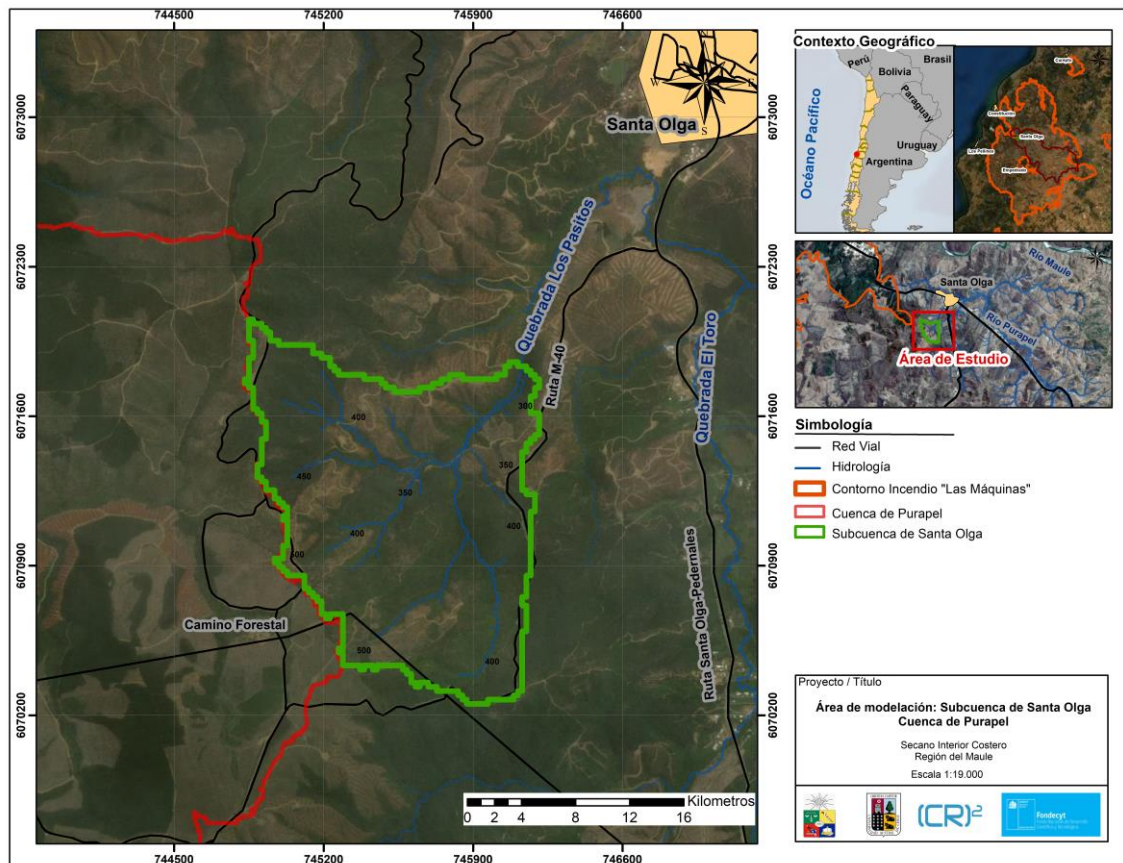


Figura 1. Área de estudio y de modelación WEPP y GeoWEPP: Subcuenca de Santa Olga.

El clima predominante es mediterráneo, con 6 meses secos y 6 meses húmedos (Cade-Idepe Consultores, 2004). Según los datos de la estación meteorológica Río Purapel en Nirivilo (35° 55' S – 72° 1' O) entre los años 1979-2016, las temperaturas máximas promedio son de 19.5° en enero y con temperaturas mínimas de alrededor 7,8° en julio (Alvarez-Garreton et al., 2018). Entre el periodo 1998-2016, las precipitaciones acumuladas medias anuales son de 612 mm aproximadamente, siendo los registros máximos en los meses de junio y julio, y los mínimos en los meses de enero y febrero (Alvarez-Garreton et al., 2018).

Según la Clasificación Supervisada realizada por Sotomayor (2018) para el año 2015, las coberturas de suelo que se encuentran en la subcuenca corresponden en su mayoría a Plantación Joven, Suelo Desnudo y Plantación Forestal Adulta. Según Luebert y Pliscoff (2006), la vegetación natural de la cuenca de Purapel corresponde a formaciones de bosque caducifolio mediterráneo costero y bosque espinoso mediterráneo. Este tipo de vegetación se ubica en parches diversos y en creciente fragmentación, inmersos en una matriz dominada por plantaciones forestales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp.*

Las series de suelo que se ubican en la subcuenca de Santa Olga son la serie Trehuaco (franco arcillo limosa, orden Inceptisol) con suelos profundos, evolucionados y generados a partir de rocas metamórficas; y también las series Alto Colorado (orden Alfisol) y Constitución (orden Alfisol) las cuales son de textura franco arcillo arenosa, con suelos profundos y desarrolladas a partir de rocas metamórficas (CIREN, 1997). Estos suelos de la Cordillera de la Costa han sido afectados por procesos de meteorización lo cual favoreció la formación *in situ* de suelos residuales con espesores variables, baja permeabilidad, fertilidad y tasas de infiltración, junto a una tendencia a la erosión lo que contribuye a altas tasas de escorrentía superficial que se concentra en los meses más lluviosos (Uribe et al., 2003). Los suelos del área de la cuenca de Purapel presentan en un 92,9% algún grado de erosión, con un 54,3% de categoría moderada a muy severa (Tolorza et al, 2017).

El incendio que afectó a la Cuenca de Purapel es el denominado incendio “Las Máquinas”, el que afectó a las comunas de Empedrado, Cauquenes, Constitución y San Javier (CONAF, 2017b). Este desastre comenzó el día 20 de enero de 2017 y finalizó el 03 de febrero de 2017, originándose a 12 km aproximadamente de la ciudad Cauquenes, afectó una superficie aproximada de 290.762 has (CONAF, 2017b) y el mayor crecimiento del incendio ocurrió entre los días 25 y 26 de enero, en donde se quemaron 115.000 ha en un periodo aproximado de 14 horas (Castellnou et al., 2017). Respecto a los combustibles sobre los cuales se desarrolló el incendio, más del 70% del incendio ocurrió en plantaciones exóticas, un 20% en matorral, un 5% sobre pasto y un 5% en bosque nativo. (Ramírez y Orellana, 2017).

METODOLOGÍA

Parametrizar factores relevantes para la erosión post incendio en la región de estudio, que permitan alimentar un modelo de procesos

El modelo WEPP

Fue utilizado el modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*, por sus siglas en inglés), desarrollado entre los años 1985-1995, por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, sus siglas en inglés) (Nearing et al., 1989) para la parametrización de factores relevantes para la erosión post incendio en la subcuenca de Santa Olga. WEPP es un modelo de base física, que utiliza la ecuación de continuidad de sedimentos en estado estacionario (Ecuación 1) para realizar simulaciones continuas o eventos simples de procesos erosivos, lo cual permite representar los efectos y cambios en el suelo generados por la erosión hídrica junto al cálculo de las distribuciones espaciales y temporales de la pérdida de suelo y sedimentos en las laderas y canales de las cuencas hidrográficas (Flanagan y Nearing, 1995). Este modelo requiere de parámetros distribuidos y georreferenciados de clima, topografía, suelo y vegetación para predecir la pérdida del suelo y depositación (Flanagan y Nearing, 2000), provocada por precipitaciones (Amaru y Hotta, 2018). El modelo permite estimar la erosión en laderas y también puede ser aplicado a cuencas hidrográficas menores a 2,6 km² (Climate Change Resource Center, 2004). El modelo está constituido por los siguientes componentes: generación de clima, irrigación, infiltración, hidrología, suelos, crecimientos de vegetación, descomposición de residuos, hidráulica de flujos superficiales, erosión en los regueros y entre los regueros, transporte y depositación de sedimentos, efectos del dosel en el desprendimiento del suelo, escorrentía superficial, efectos de labranza en las propiedades del suelo, efectos en la rugosidad del suelo y efectos de topografías y pendientes (Flanagan y Nearing, 1995).

Las laderas pueden ser representadas como unidades individuales, con todas sus características tales como la longitud de la pendiente, tipos diferentes de suelo, el gradiente y prácticas de manejo. El modelo segmenta las laderas en “Elementos de Escurrimiento Superficial” (*Overland Flow Elements, OFE*, sus siglas en inglés), para acondicionar regiones con propiedades de suelo, pendiente y manejo uniformes a lo largo de una ladera individual. Por otro lado, las cuencas son representadas por varias laderas que se encuentran conectadas por canales, los cuales se orientan hacia la salida de la cuenca (Rauter, 2005).

El componente de erosión que utiliza WEPP se basa en la ecuación de continuidad de sedimentos en estado estacionario, para calcular la pérdida de suelo y el desplazamiento de sedimentos en un surco.

$$\frac{dG}{dx} = D_f + D_i$$

Ecuación 1. Ecuación de continuidad de sedimento en estado estacionario.

, donde

G = es la descarga de sedimentos ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$)

x = es la distancia ladera abajo (m)

D_f = es la tasa de erosión en los regueros

D_i = tasa de erosión entre regueros (Foster et al., 1995).

Los regueros son pequeños canales efímeros con poca cobertura vegetal y baja cantidad de materia orgánica, en los cuales existe concentración de escorrentía superficial y son susceptibles a altas tasas de erosión (Calvo-Cases et al., 2011) debido al transporte de partículas (Rodríguez-Blanco et al., 2011).

La tasa de erosión en regueros es positiva cuando ocurre la pérdida de suelo, y negativa cuando existe sedimentación (Flanagan y Nearing, 1995).

La erosión entre regueros es el proceso en el cual los sedimentos son distribuidos desde los sectores entre regueros a un canal de flujo concentrado o a un arroyo. Posteriormente, el sedimento es arrastrado hacia fuera de la ladera por el canal de flujo o depositado en los arroyos. La tasa de erosión entre regueros está determinada por:

$$D_i = K_{iadj} I_e \theta_{ir} SDR_{RR} F_{Nozzle} \frac{Rs}{w}$$

Ecuación 2. Ecuación de la erosión entre regueros.

, donde

K_{iadj} = erodabilidad entre regueros ajustada

I_e = intensidad de precipitación efectiva (m s^{-1})

θ_{ir} = tasa de escorrentía entre regueros

SDR_{RR} = tasa de distribución de sedimentos (en función de la rugosidad, pendiente lateral de la ladera y la distribución de tamaño de las partículas intermedias)

F_{Nozzle} = factor de ajuste de la irrigación

Rs = espaciamiento de los arroyos (m)

w = ancho de los arroyos (m) (Foster et al., 1995).

La erosión de los regueros ocurre bajo ciertas condiciones:

- La tensión de corte hidráulica excede la tensión de corte crítico del suelo.
- La carga de sedimentos cae por debajo que la capacidad de transporte de sedimentos (Foster et al., 1995).

El cálculo que realiza el modelo WEPP, lo realiza mediante la siguiente ecuación

$$D_f = D_c \cdot 1 - \frac{G}{T_c}$$

Ecuación 3. Ecuación de la erosión en los regueros.

, donde

D_c = capacidad de desprendimiento de sedimentos provocado por flujos, en los arroyos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$)

T_c = capacidad de transporte de los sedimentos en los arroyos ($\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$) (Foster et al., 1995)

El modelo calcula T_c mediante una ecuación de transporte simplificada para puntos internos del perfil de ladera, junto a una ecuación modificada de la ecuación de Yalin para el cálculo en el final del perfil. La ecuación de transporte simplificada es la siguiente:

$$T_c = k_c \cdot \tau_f^{3/2}$$

Ecuación 4. Ecuación simplificada de la capacidad de transporte de sedimentos.

, donde

k_c = coeficiente de transporte ($\text{m}^{0.5} \text{s}^{-2} \text{kg}^{-0.5}$)

τ_f = esfuerzo de corte hidráulico actuando en el suelo (Pa) (Foster et al., 1995)

En la situación que se cumpla el primer criterio anteriormente mencionado, la capacidad de desprendimiento de sedimentos es expresada por

$$D_c = K_r \cdot (\tau_f - \tau_c)$$

Ecuación 5. Ecuación utilizada por el modelo WEPP cuando la tensión de corte hidráulica excede la tensión de corte crítico del suelo.

, donde

K_r = parámetro de erodabilidad en los regueros (s m^{-1})

τ_f = flujo de esfuerzo cortante (Pa)

τ_c = tensión de corte crítica del suelo (Pa) (Foster et al., 1995)

La depositación de sedimentos en los regueros se calcula cuando no se cumple la segunda condición, lo que implica que la carga de sedimentos supera la capacidad de transporte. El modelo calcula lo anterior, basado en la siguiente ecuación:

$$D_f = \frac{\beta V_f}{q} \cdot (T_c - G)$$

Ecuación 6. Ecuación de deposición de sedimentos en los regueros

, donde

V_f = velocidad de caída efectiva del sedimento, por la ladera (m s^{-1})

q = descarga de flujo por unidad de ancho de la ladera ($\text{m}^2 \text{s}^{-1}$)

β = gota de lluvia inducida por el coeficiente de turbulencia ($0,5 < \beta < 1,0$) (Foster et al., 1995)

Un valor de β de 0,5 implica que el flujo del arroyo se ve afectado por las gotas de lluvia, de lo contrario (como en una situación de riego por surco) se asigna un valor de 1 a este parámetro (Foster et al., 1995)

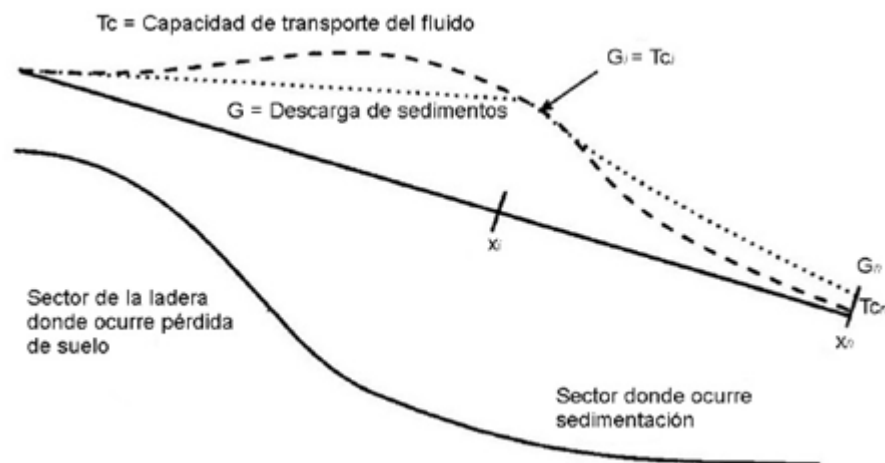


Figura 2. Representación de una ladera con cambios de pendientes, en el modelo WEPP. En la figura, la sedimentación ocurrirá solo cuando la descarga de sedimentos (línea punteada) excede la capacidad de transporte del fluido (línea segmentada) (Obtenido a partir de Flanagan y Nearing, 2000).

Para realizar los cálculos anteriormente mencionados en las ecuaciones, el modelo segmenta la ladera en 100 nodos equidistantes y determina la descarga de sedimentos en cada uno de éstos, considerando los sedimentos que provienen desde el nodo anterior. (Flanagan y Nearing, 2000),

En el Anexo 1 se ejemplifica el funcionamiento del modelo WEPP, considerando los archivos de entrada más importantes que requiere (clima, topografía, suelo y vegetación) y los procesos internos y cálculos que realiza para estimar la pérdida del suelo, deposición de sedimentos y escorrentía.

La interfaz Geoespacial de WEPP

Una interfaz controlada por un Sistema de Información Geográfica es una herramienta que permite combinar un modelo de procesos junto a las capacidades espaciales de un

SIG, para fines prácticos de evaluación, gestión, manejo e investigación de sitios particulares (Renschler, 2003). La implementación de estas interfaces requiere de datos que se encuentren ampliamente disponibles y tratamiento automático de los parámetros de entrada predeterminados por el modelo, para que éste pueda estimar predicciones de erosión, entre otras (Rauter, 2005).

La implementación del modelo WEPP en un SIG es llamada GeoWEPP, la cual es una interfaz para usar el modelo a través de un asistente con varias subrutinas (*Fortran*, por ejemplo) en un SIG comercial (Arcview 3.x y ArcMap 10.1-10.4.0) desarrollado por investigadores de la Universidad de Buffalo (Nueva York, Estados Unidos) desde el año 2002 (GeoWEPP Team, 2017).

El modelo GeoWEPP permite extraer información y parámetros necesarios para que WEPP pueda realizar simulaciones y estimaciones, utilizando capas de información geoespacial referenciada, tales como datos de elevación, suelo, cobertura y severidad de incendio. En esta interfaz, las cuencas se dividen en laderas y canales de dimensiones variables, debido al comportamiento de la topografía ingresada como variable de entrada al modelo (De Regoyos Sáinz, 2003). GeoWEPP posee el modo de simulación llamado *Watershed method* y genera subcuencas pequeñas, en donde configura perfiles de ladera representativos. Éstas, pueden drenar hacia la derecha, izquierda o hacia el inicio del curso de agua, calculado en base a un Modelo Digital de Elevación (De Regoyos Sáinz, 2003).

GeoWEPP incorpora un modelo para la delimitación automatizada de cuencas, llamado TOPAZ (*Topographic Parameterization*, en inglés) (Garbrecht y Martz, 1999). La identificación de canales y laderas que forman parte de una cuenca se conoce con el nombre de discretización. TOPAZ es un conjunto de algoritmos generados también en *Fortran*, desarrollado para la parametrización topográfica de las cuencas usando un DEM y un punto que especifique la salida de una de éstas, calculando las líneas divisorias de aguas y la red de drenaje (De Regoyos Sáinz, 2003). Los conceptos básicos implementados en estos algoritmos son el método D8, el Área Crítica de la Fuente y la Longitud Mínima del Canal de la Fuente (CSA o *Critical Source Area* y MSCL o *Minimun Source Channel Lenght*, por sus siglas en inglés respectivamente) (Garbrecht y Martz, 1999). El método D8 determina la dirección del flujo evaluando la elevación de cada celda del DEM con sus 8 vecinos más cercanos. El camino más inclinado hacia abajo de la celda de interés para uno de sus 8 vecinos adyacentes se utiliza para el enrutamiento de flujo, en pendiente descendente (De Regoyos Sáinz, 2003). En particular, CSA y MSCL deben ser ajustados de manera manual por el usuario hasta conseguir que el modelo TOPAZ genere una red hidrográfica similar a existente en la cuenca a evaluar. El valor de CSA determina la generación de los canales en base a un área mínima de drenado y flujo, mientras que MSCL se relaciona a la generación de los canales de primer orden considerando una longitud mínima (Yuksel et al., 2008). TOPAZ ha sido adaptado también en varios modelos hidrológicos y en modelos de predicción de erosión, ya que disminuye el tiempo requerido para la delimitación y discretización de las cuencas hidrográficas y los valores estimados por el modelo fueron similares a los observados (González, 2013).

A su vez, se deben considerar las limitaciones que tiene TOPAZ. Por ejemplo, este algoritmo no es capaz de generar propiedades de drenaje de grandes cuerpos de agua

como lagos y lagunas; depósitos artificiales de aguas, como embalses, deben estar incorporados con sus elevaciones correspondientes en los DEM's a utilizar en la modelación (González, 2013) y Toma et al. (2001) no recomiendan la utilización de TOPAZ en cuencas hidrográficas superiores a los 100 km², debido a que no es capaz de procesar grandes cantidades de datos geospaciales.

Obtención y preparación de los datos de entrada necesarios para WEPP y GeoWEPP

La parametrización de un modelo se refiere a determinar un conjunto de valores de parámetros, junto a definir y conocer los procesos físicos que ocurren en una cuenca determinada y que puedan ser simulados en un modelo específico (Arnold et al., 2012). Los datos de entrada que se compilaron para la parametrización del modelo fueron:

Topografía. Para representar la topografía se hizo uso de un Modelo Digital de Elevación (MDE), el cual es una capa ráster que representa las variaciones continuas del relieve a través de una matriz grillada regular en coordenadas XYZ y cada valor de píxel equivale a la elevación media de una ubicación geográfica específica (Lakshmi y Yarrakula, 2018). El MDE utilizado fue una capa ráster correspondiente a un *Digital Terrain Model* proveniente de un vuelo LIDAR, proporcionada por Forestal Arauco, correspondiente al año 2019, con 5 m de resolución, acotada a la subcuenca de Santa Olga. Esta capa espacial se tuvo que re muestrear a 20 m de resolución espacial, mediante el método *Bilinear* (GISGeography, 2015), para poder ser utilizada en GeoWEPP. Se generaron dos rasters en formato ASCII de tal manera que cada uno de estos fueron utilizados en cada uno de los escenarios de modelación propuestos.

Cobertura de suelo. La cobertura de suelo (*Land Cover*, traducido en inglés) se refiere a la cobertura física y biológica en la superficie de la tierra, incluyendo vegetación, agua, suelo desnudo y/o estructuras artificiales (Roy y Roy, 2010). Diversos estudios han concluido que el efecto de la cobertura del suelo sobre la erosión está directamente relacionado al porcentaje de suelo cubierto. Por ejemplo, las rocas superficiales que se encuentran en los pastizales son más efectivas en reducir la erosión y aumentar la infiltración de agua, que las rocas situadas como una sola capa en un sitio urbano (Terrence et al., 2002). Por otro lado, la vegetación natural es más efectiva para reducir la erosión debido a su estructura estratificada y diversa, junto a la absorción de más energía de las gotas de lluvia debido a la intercepción múltiple, en comparación a una plantación, las cuales no poseen estratos diversos de vegetación. (Wijitkosum, 2012).

La información geoespacial de cobertura de suelo que fue utilizada como variable de entrada para GeoWEPP corresponde a una capa ráster de clasificación supervisada de la cuenca de Purapel, realizada por Sotomayor (2017) para el 2015, con una resolución espacial de 30 m. Para ser utilizada en GeoWEPP, esta capa ráster fue re muestreada mediante el método de mayoría (Zhao y Liu, 2014) a 20 m, transformada a formato ASCII y acotada al área de modelación Subcuenca de Santa Olga, considerando esta misma resolución espacial para los dos escenarios. Solo en el escenario con ocurrencia de

incendio, esta capa fue intersecada espacialmente con la imagen ráster de severidad de incendio, para representar los efectos del fuego y su severidad en las distintas coberturas.

Capa ráster de severidad del incendio. La severidad del incendio es considerada un factor relevante en los procesos erosivos, debido a sus efectos potenciales en los recursos naturales suelo y agua (Fernández y Vega, 2015). Los incendios forestales de alta severidad aumentan las tasas de erosión en los suelos debido a la destrucción de la vegetación y la cubierta del suelo, lo cual expone la cubierta mineral de éste a las gotas de lluvia alterando su porosidad total, densidad aparente y estructura, lo que a su vez reduce la infiltración de las capas del suelo y promueve los flujos de tierra hacia los sectores bajos de las cuencas hidrográficas (De Bano et al., 1998; Shakesby y Doerr, 2006; Novara et al., 2011; Novara et al., 2013; Keesstra et al., 2014; Tessler et al., 2015).. La severidad moderada de los incendios reduce la estabilidad de los agregados, mediante la combustión de los agentes aglutinantes del suelo, como la materia orgánica (Mataix-Solera et al., 2011; Pereira et al., 2014).

En general, los efectos provocados por la severidad baja de los incendios no son evidentes después de que ocurre el fuego (Jian et al., 2018). Algunos efectos de esta severidad son la pérdida del carbono de la materia orgánica del suelo y que se volatiliza hacia la atmósfera contribuye directamente al cambio climático, ya que ese carbono se libera como dióxido de carbono (CO₂) (Jian et al., 2018). También, la materia orgánica combustionada es una reserva de nutrientes importante para los microorganismos del suelo y a largo plazo existe pérdida de arena (Dyrness y Youngber, 1957), limo y arcilla (Knoepp et al., 2005) mediante procesos de escorrentía (Tiedemann et al., 1979; Moody y Martin 2001; Neary et al., 2005).

Para la parametrización del modelo respecto a la severidad, se hizo uso de la capa ráster de estimación de severidad de incendio sobre imagen Sentinel-2 MSI del 20 de marzo de 2017, cuya clasificación fue realizada y validada con datos de terreno, por Iván Castillo y Mauricio Galleguillos (2018) utilizando el algoritmo de Fernández-Manso et al. (2016). También fue necesario acotar este mapa al área de modelación Subcuenca de Santa Olga, obteniendo un mapa ráster con resolución espacial de 20 m, el cual fue utilizado sólo para el segundo escenario de modelación. Esta capa espacial estaba compuesta por las categorías de severidad No quemado, Leve, Moderado y Severo (Castillo y Galleguillos, 2018). Para evaluar espacialmente los efectos del fuego en distintas coberturas de suelo, se hizo necesario intersectar espacialmente la información de las 6 coberturas con las distintas severidades de incendio. Fue necesario homogeneizar la información espacial de severidad de incendio, debido a las 24 posibles combinaciones de severidad y cobertura de suelo que el modelo WEPP no podría procesar debido a errores internos del modelo. Para esto se hizo una reducción de las categorías de severidad, de tal manera que la categoría Severa mantuvo su cantidad de píxeles y a las celdas ráster de la categoría Moderada se le añadieron los píxeles de las categorías Leves y No quemado. Finalmente, la combinación de las 6 coberturas de suelos intersectada con 2 categorías de severidad de incendio, mediante el software SIG, dio origen a una capa ráster de 11 combinaciones.

Información de Suelos

Información geoespacial de suelos. GeoWEPP requiere como parámetro de entrada una capa ráster con la información de la delimitación de los distintos suelos presentes en las

cuencas hidrográficas (Yuksel et al., 2008), para que el modelo pueda espacializar las estimaciones de erosión, escorrentía y zonas de sedimentación. Se utilizó la información del Estudio Agrológico VII Región del Maule, una base de datos en formato *shapefile*, (transformada luego a formato ráster) a escala 1:10.000 a nivel de series de suelos correspondiente a la VII Región, realizado por Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN, 1997) del Ministerio de Agricultura. El área de modelación Subcuenca de Santa Olga quedó representada por 3 series distintas de suelos: Asociación Alto Colorado, Asociación Constitución y Asociación Trehuaco (CIREN, 1997). Para poder utilizar esta capa espacial en GeoWEPP, fueron generados dos archivos ráster, con una resolución espacial de 20 m. en formato ASCII.

Complementariamente, se utilizó la Base de Datos de Suelos y Terrenos de Latinoamérica y El Caribe (SOTERLAC Versión 2.0, *Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean*, en inglés) de la Base de Datos Armonizada Continental de Suelos y Terrenos (SOTWIS, *Harmonized Continental SOTER-derived Database*, en inglés), generada a escala 1:5.000.000 en formato *shapefile*, de la cual se extrajo el valor del parámetro CIC, Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo (CEC, *Cation Exchange Capacity* en inglés), cuyas unidades de medida es centimol por kilogramo de suelo (cmol kg^{-1}) y fue estimada en unidades representativas de suelo según el criterio de expertos nacionales en ciencias del suelo, considerando los primeros 20 cm de suelo (Dijkshoorn et al., 2005). Para obtener el valor del parámetro CIC y poder ingresarlo posteriormente a los archivos de suelo del modelo WEPP, fue necesario intersectar la ubicación espacial del área de modelación con el mapa de estimación del parámetro CIC de la Base de Datos de Suelos y Terrenos de Latinoamérica y El Caribe.

Información de terreno de suelo. La representación precisa de los valores de las propiedades de suelo, que fueron utilizadas en WEPP, son esenciales para la predicción espacial y temporal de escorrentía y sedimentación (Yuksel et al., 2008). Los impactos de los cultivos y la labranza en los distintos usos y clases de suelos presentes en las cuencas hidrográficas se calculan considerando los distintos componentes y propiedades del suelo que se ingresen a WEPP (Flanagan et al., 2012). La variación de las propiedades físicas en el espacio afecta la generación de erosión y escorrentía; por ejemplo, suelos que poseen más porcentaje de arena tienen valores bajos de erodabilidad y producen menos sedimentación, debido a que poseen mayor capacidad de infiltración; suelos con alta presencia de limo son más erodables debido a que son más compactos y se incrementa la producción de escorrentía y de sedimentos (Terrence et al., 2002).

Los datos de suelo que se utilizaron para el modelo WEPP fue la información recolectada y generada por Soto et al. (2019) durante enero y noviembre del año 2015. En este estudio, se obtuvieron 17 sitios de muestreo dentro de la Cuenca de Purapel basándose principalmente en la descripción de cinco cambios de cobertura de suelo (bosque nativo, plantación de pino, plantación de eucaliptus, sucesión primaria y sucesión secundaria) definidos según las principales transiciones asociadas a operaciones forestales activas y abandonadas en el secano interior de la Región del Maule (Soto et al., 2019). Para el propósito de esta investigación, se utilizaron solo dos sitios del total que se muestrearon en la investigación de Soto et al. (2019), debido a que éstos se ubicaban dentro del área de modelación. La información geoespacial de suelos de CIREN que coincidió con este

par de sitios seleccionados, fueron finalmente las series de suelos Asociación Constitución y Asociación Trehuaco. La información de terreno recolectada correspondió a datos de profundidad, arena, arcilla y materia orgánica, detallados en el Anexo 2.

Para complementar la información de terreno de suelos, se utilizó información bibliografiada obtenida desde el Estudio Agrológico VII Región del Maule, debido a que ninguno de los 17 punto de muestreo en la cuenca de Purapel de la investigación de Soto et al. (2019), coincidió con la ubicación espacial de la Asociación Alto Colorado. La información de suelos que se recopiló de este estudio, para la cobertura de suelo anterior, fueron la profundidad, arena, arcilla y materia orgánica. En el Anexo 3 se detalla esta información obtenida.

Archivos de suelo WEPP. Para que GeoWEPP pueda utilizar la información de este componente ambiental, se requiere una capa ráster y archivos de texto generados por WEPP que detallan propiedades de los suelos de las áreas a modelar (Yuksel et al., 2008).

Para identificar la información de las asociaciones de suelo de la subcuenca, se crearon archivos de texto, con extensión SOL (Minkowski y Renschler, 2013), que detallan propiedades y parámetros de estas series. Estos archivos de suelo requieren 11 parámetros de entrada: albedo, porcentaje de humedad inicial, porcentaje de arena, porcentaje de arcilla, porcentaje de materia orgánica, Capacidad de intercambio catiónico (CIC), porcentaje de rocas, esfuerzo de corte crítico del suelo, conductividad hidráulica efectiva, factor de erodabilidad entre regueros y factor de erodabilidad en regueros (Lal, 2001; Pimentel et al., 1995). Se crearon 3 archivos distintos de parámetros de suelo en WEPP, utilizando el parámetro CIC obtenido de la Base de Datos de Suelos y Terrenos de Latinoamérica y El Caribe, junto a la información bibliográfica de CIREN y los datos de terreno de Soto et al. (2019) mencionados anteriormente, para representar las características físicas del suelo en 2 modelaciones. En el Apéndice 1.a, 1.b y 1.c se especifican los 3 archivos SOL creados y utilizados para el escenario sin incendio y con incendio (previo a la calibración) y en el Apéndice 2 se detallan los procedimientos utilizados para obtener y calcular cada uno de estos parámetros en cada una de las modelaciones.

Una vez que se han descrito las propiedades y características de las series de suelo de la subcuenca mediante los archivos de texto de parámetros, GeoWEPP requiere información que vincule los archivos ráster leídos en el SIG con los archivos creados en WEPP. Para esto se crearon archivos de texto llamados soilmap.txt y soilsdb.txt. El primero vincula los valores de las celdas ráster de suelo con una descripción de suelo proporcionada por el usuario, mientras que el segundo asocia estas descripciones con los archivos .SOL (Minkowski y Renschler, 2013). En total se crearon 4 archivos de texto: un par de archivos soilmap.txt y soilsdb.txt para realizar una simulación sin considerar el incendio, y otro par de estos archivos para realizar una simulación en el escenario con incendio.

Clima. La erosión del suelo generada por el agua también se ve influenciada por distintos factores climáticos. La precipitación es la variable climática más importante que influye en este tipo de erosión y ocurre, cuando las gotas de lluvia golpean al suelo y el agua fluye sobre el suelo (Van Dijk Bruijnzeel y Rosewell, 2002). La intensidad de lluvia afecta la erosionabilidad en los regueros y entre los regueros, al controlar las tasas de escorrentía y esfuerzo crítico del suelo (Yu, 2000; Pieri et al., 2007).

Por otro lado, las variaciones de temperatura también afectan la erosión del suelo (Nearing et al., 2004). Los cambios de la temperatura del aire modifican las tasas de evapotranspiración y contenido de humedad del suelo, lo que a su vez afecta la generación de escorrentía e infiltración del suelo (Fan et al., 2011). La temperatura del aire también puede afectar la producción de biomasa vegetal y modificar el Índice de Área Foliar de la vegetación, lo que se traduce en cambios de la exposición del suelo al impacto de las gotas de lluvia (Pruski y Nearing, 2002a; O'Neal et al., 2005).

La humedad del aire, radiación solar y el viento son factores climáticos que generan efectos evidentes a través de sus efectos sobre la evaporación y transpiración de agua de los suelos. Los factores anteriores, reducen el contenido de agua del suelo y de manera subsecuente afectan las tasas de generación de escorrentía (Ward et al., 2004). El viento modifica la velocidad de las gotas de lluvia y su Ángulo de impacto en el suelo, influenciando las tasas de erosión (Ward et al., 2004).

El modelo WEPP, y también su interfaz SIG GeoWEPP, requieren como parámetro de entrada un archivo climático, el cual contiene información de variables asociadas a precipitación, temperaturas máximas y mínimas, temperatura de punto de rocío, dirección y velocidad de vientos, y radiación solar para una sola estación climatológica (Flanagan et al., 2018). CLIGEN versión 5.3 (*CLimate GENERator*, en inglés) es un generador estocástico de información climática diaria y de archivos climáticos implementado en una interfaz en lenguaje Fortran-77 (Meyer, 2009), dentro del modelo y software WEPP, el cual permite también simular la distribución temporal de las precipitaciones para un periodo de modelación determinado (Zhang et al., 2008).

Para poder generar el archivo climático y utilizarlo en CLIGEN, fue necesario en primer lugar generar una base de datos con cada uno de los factores climáticos requeridos por los archivos climáticos de la interfaz, tales como datos diarios de precipitación, temperaturas máximas, mínimas y de punto de rocío, humedad relativa, radiación solar, dirección y velocidad de vientos de una sola estación climatológica. (Flanagan et al., 2018).

Los criterios para seleccionar la estación climatológica que fue utilizada en la modelación de WEPP y ocupar sus datos históricos para la construcción de un archivo climático de CLIGEN, fueron:

- Que la estación climatológica tenga datos históricos de precipitación, en milímetros, medida en intervalos cada media hora de acuerdo con Wischmejer y Smith (1958).
- Que la información diaria de la estación climatológica respecto a temperaturas máximas y mínimas, temperatura de punto de rocío, humedad relativa,

dirección y velocidad de vientos, y radiación solar esté disponible para una sola estación.

- Que la información climatológica diaria de la estación, mencionada anteriormente, abarque como mínimo un año después de la fecha de término del incendio “Las Máquinas”, para que el modelo pueda generar estimaciones de pérdida de suelo, tasas de sedimentación y escorrentía en una escala temporal adecuada considerando eventos de precipitaciones intensas posteriores al incendio.

En el Apéndice 3 se detallan las estaciones climatológicas ubicadas dentro de la Cuenca de Purapel y cercanas al punto de salida de ésta, y también aquellas cercanas al área de modelación Subcuenca de Santa Olga (coordenadas Este y Norte en UTM 18S WGS 84) las cuales registraron la variable precipitación en fechas específicas.

En base a los criterios anteriormente mencionados, la estación seleccionada fue Sauzal ($33^{\circ} 7' S - 72^{\circ} 11' O$), ubicada a una altura de 162 m.s.n.m., considerando que la fecha de inicio de los datos climáticos a utilizar fue 01/01/2010 y la fecha de término fue 31/12/2018. Las variables climatológicas registradas en esta estación y que fueron utilizadas fueron: precipitación (diaria y horaria cada 15 minutos, en mm), temperatura mínima y máxima diaria (ambas en grados $^{\circ}C$), humedad relativa diaria (en %), velocidad de vientos diaria (en $m s^{-1}$) y dirección de vientos diaria (en grados sexagesimales) (AGROMET, 2019).

Se debe considerar que la estación Sauzal se encuentra a aproximadamente 30 km hacia el SE de la Subcuenca de Santa Olga, y considerando que no se encuentra dentro de la cuenca a utilizar en el modelo y que no represente fielmente las características climatológicas de ésta, esta estación sí se encuentra cercana al desagüe de la cuenca principal (Purapel) y es la única con mediciones de precipitación a nivel horario, lo cual facilitó y permitió la construcción de archivos climáticos en WEPP.

Por otra parte, se consideraron algunos criterios para la creación del archivo climático en CLIGEN. El archivo creado en CLIGEN es un archivo de texto con formato CLI, y para ser generado requiere dos archivos de texto con información climatológica: un archivo de parámetros con extensión PAR y un archivo *Custom* con datos diarios de precipitaciones (en mm) y temperatura mínima y máxima (en $^{\circ}C$) (Frankenberger, 2006) (Apéndice 4). La generación de este archivo *Custom* implica que los datos observados diarios de estas tres variables deben ser años completos, es decir, la primera fecha de medición debe ser el 01 de enero de 2010 y la última fecha debe ser el 31 de diciembre de 2018 (Lobo, 2014). Este criterio mencionado fue el mismo que se prosiguió para el análisis, cálculos y obtención de la Base de Datos Climatológica, y posteriormente generar el archivo PAR; esto implica que la información de precipitación y sus variables, temperaturas máximas y mínimas, temperatura de punto de rocío, humedad relativa, dirección y velocidad de vientos, y radiación solar también empieza en la fecha el 01/01/2010 y la última fecha a considerar fue el 31/12/2018, siendo un total de 9 años.

Procesamiento de datos para creación de Base de Datos Climática. Para poder utilizar CLIGEN, en cualquiera de sus versiones, es necesario construir archivos climáticos PAR para la estación Sauzal, considerando 9 años para la modelación en WEPP y GeoWEPP. Este archivo de parámetros enlista valores estadísticos mensuales considerando información diaria de 9 años de precipitación, temperaturas, punto de rocío, radiación y vientos (Lobo, 2014). Los procedimientos y cálculos realizados para las variables de la Base de Datos Climática, tales como precipitación horaria, precipitación diaria, temperaturas máximas y mínimas, radiación solar, temperatura del punto de rocío, velocidad y dirección de los vientos, se detallan en el Apéndice 5.

Conformación del archivo climático. El archivo PAR requerido por CLIGEN para la creación de un solo archivo climático CLI fue construido utilizando procesadores de datos incluidos en WEPP y mediante el agrupamiento de información de la Base de Datos Climática (Lobo, 2014). En el Apéndice 6 se detalla cómo se obtuvieron, a partir de la información de la Base de Datos Climática, los parámetros solicitados para la generación de un archivo PAR.

Calculados y obtenidos todos los parámetros descritos en el Apéndice 6, éstos se recopilaron en un archivo de texto de codificación UTF-8, con extensión PAR (Apéndice 7). La información y abreviación de cada parámetro climático que corresponde a cada línea de texto de este archivo se detalla en el Apéndice 8. En el Apéndice 9 se detalla el archivo climático CLI junto al detalle de sus parámetros.

Información de manejo de la vegetación. Para identificar en el modelo los distintos usos de suelo en cada ladera se requieren archivos de manejo relacionados a cada tipo de cobertura de suelo, los cuales contienen la información relacionada a los parámetros de las especies vegetales (relación biomasa-energía, espaciado entre plantas, índice máximo de área foliar, altura máxima de la canopia y tasa de crecimientos de la vegetación), prácticas de manejo (operaciones de labranza, manejo de plantas y residuos, cosecha, cultivos con manejo de contorno, drenaje, rotación de cultivos, ocurrencia y severidad incendio y fechas en que ocurren estas operaciones de manejo) y datos de la condición inicial de la cobertura (cobertura inicial del follaje, cantidad de residuos y espaciado entre los regueros) (Maione et al., 2000). Los archivos de manejo, con extensión .ROT, se componen de alrededor de 60 parámetros y son generados en el software WEPP versión 2012.800 (Bonilla et al., 2013).

Los archivos de manejo que se utilizaron para representar coberturas de suelo en condiciones sin incendio y con incendio, para un periodo de modelación de 9 años, fueron seleccionados desde la base de datos del software WEPP y se detallan en el Apéndice 10 y Apéndice 11 respectivamente. A estos archivos de manejo se les modificó la información referente a fechas y tipo de manejo vegetacionales, nombre de la especie vegetal a la cual se le realizó el manejo y Altura Máxima de la canopia, para representar de manera aproximada las condiciones vegetacionales y cambios paisajísticos ocurridos en la subcuenca.

Imágenes satelitales históricas de Google Earth. La cuenca de Purapel, y a su vez la Subcuenca de Santa Olga presentan altas dinámicas espaciales provocado por los cortos periodos de rotación de las plantaciones forestales industriales (Sotomayor, 2017), 10 a 22 años según el programa de manejo y las especies utilizadas (Cornejo, 1983). En esta cuenca, durante el periodo 2000-2014 se registraron tasas de pérdida de bosque nativo de 1,48% y durante estos 14 años la superficie de las plantaciones forestales se redujo a la mitad debido a la cosecha de las plantaciones adultas y a la ocupación de éstas por matorrales propios de una sucesión temprana que se desarrolla en conjunto con las plantaciones jóvenes. También, las plantaciones forestales establecidas durante este periodo tienden a ser ubicadas en zonas cubiertas por matorral, zonas agrícolas y praderas abandonadas (Sotomayor, 2017).

Para la creación de estos archivos y caracterizar el manejo vegetacional que ocurre en el área de modelación, se recomienda la utilización de información procedente de planes de manejo y/o planillas de actividades de cultivo, cosecha y plantación que se desarrollen en los predios (Gabiella et al., 2015). Para esta investigación no fue posible obtener registros de fechas ni de las actividades de manejo que ocurrieron en el periodo de modelación, por lo que se utilizaron otras fuentes de datos para la completar la información de manejo vegetacional en la Subcuenca de Santa Olga.

Se hizo uso del software Google Earth Pro (GEP) para observar distintas imágenes satelitales históricas de la Subcuenca de Santa Olga entre el 07/08/2009 y el 05/29/2018. De este modo fue posible detectar cambios en la estructura del paisaje tales como cosechas y fechas de plantación. Para esto, se realizaron fotointerpretaciones y digitalizaciones de estas imágenes en GEP, evaluando y extrapolando formas, patrones, colores y asociaciones espaciales de las distintas coberturas de suelo (Morrisey, 2016), junto a la identificación de las distintas fechas en que ocurrieron actividades de manejo dentro de la subcuenca. Cabe destacar que en cada archivo de manejo que se debe crear, se debe especificar una fecha dentro del periodo de modelación, la especie vegetal a la cual se le aplica el manejo junto a sus parámetros específicos y un solo tipo de operación de manejo (plantación anual o perenne, corta o muerte de vegetación, cosecha, adición o remoción de residuos, cosecha, aplicación de herbicida o la ocurrencia de un incendio) (Flanagan y Nearing, 1995). El primer paso fue utilizar la capa ráster de Clasificación Supervisada de Sotomayor, a 20 m de resolución y disgregar, en el software SIG, cada cobertura de suelo y utilizarlas como una referencia “visual” de sus patrones paisajísticos. Luego, se realizó la fotointerpretación, digitalización y análisis de imágenes aéreas obtenidas de GEP. Cabe señalar que cuando ocurría un tipo de manejo específico en una fecha dada, ya sea plantación, cosecha o incendio, estos cambios del paisaje ocurrían en áreas específicas de la subcuenca y no en el 100% del área de modelación. Es por esto, que se consideró como criterio experto que, si un manejo ocurría y éste abarcaba un 20% o más del área de la subcuenca, este cambio paisajístico se asumía para toda su superficie en una fecha dada.

Finalmente, cada una de las 6 coberturas de suelo fue ingresada con fecha 01/01/2015 en los archivos ROT, utilizando para esto como referencia la Clasificación Supervisada 2015 de Sotomayor (2017) para ambas modelaciones (sin incendio y con incendio).

En el Apéndice 12 se detallan las imágenes satelitales utilizadas desde GEP, sus fechas y fuente de obtención de éstas, manejo detectado según la nomenclatura de WEPP, resolución espacial de los sensores que detectaron estas imágenes y porcentaje de cambio de las superficies. En el Apéndice 13 se detalla y ejemplifica la metodología mencionada en el párrafo anterior.

Datos de Altura de la canopia. Para complementar la información de los archivos de manejo creados, se ajustó el crecimiento en altura de las coberturas de suelo plantación adulta, plantación joven, bosque nativo, matorral, agro pradera y suelo desnudo gracias a la información obtenida de tres campañas de terreno realizadas en enero y diciembre de 2015 en la Cuenca de Purapel (Ceballos y Galleguillos 2018). En estas campañas se realizaron muestreos en sectores específicos de esta cuenca en parcelas cuadradas de 225 m², en las que se evaluó el estrato arbóreo (individuos leñosos mayores a 2 metros de altura) y parcelas de 225 m², en las cuales se evaluó el estrato arbustivo (individuos leñosos iguales o menores a 2 m de altura) (Ceballos y Galleguillos 2018).

Archivos de cobertura de suelo WEPP. Una vez creadas las capas espaciales ráster de cobertura de suelo (primer escenario) y cobertura de suelo intersectada con severidad de incendio (segundo escenario), estas fueron combinadas con los archivos ROT con información de la base de datos de WEPP, las fechas de rotación y altura de la canopia. A partir de estos datos se crearon 4 archivos de textos necesarios para ser ingresados en GeoWEPP: Landcov.txt y Landusedb.txt, en que cada par de estos archivos fueron creados para cada ambos escenarios. La idea básica del archivo landcov.txt es proporcionar un número y una descripción, en que el número es el valor que se encuentra en la capa ráster de cobertura de suelo y cobertura de suelo intersectada con severidad de incendio, y la descripción es un texto que describe lo que representa el valor de las celdas del raster (Minkowski y Renschler, 2013). Una vez que se vincularon los valores de las celdas raster con una descripción de cobertura de suelo y cobertura de suelo intersectada con severidad de incendio, se necesita vincular esa descripción a un archivo de parámetros de vegetación (archivos ROT), y esto se realizó mediante un archivo llamado landusedb.txt. Este archivo solamente considera los archivos de la descripción de cobertura de suelo y cobertura de suelo intersectada con severidad, y las rutas de los archivos de manejo y parámetros de vegetación (Minkowski y Renschler, 2013).

En los Apéndices 14 y 15 se detallan dos flujos metodológicos que explican, de manera gráfica, los datos de entrada del modelo WEPP e interfaz geoespacial GeoWEPP que fueron necesarios para la simulación sin incendio y con incendio.

Datos diarios de escorrentía y sedimentos suspendidos. Se hizo uso de la información diaria disponible de escorrentía (m³ s⁻¹) y de concentración instantánea de sedimentos suspendidos (mg l⁻¹) de la estación Quebrada Pasitos ubicada en la Subcuenca de Santa Olga (173 hectáreas de área drenada), desde el 03/15/2018 al 30/09/2018, información levantada por el proyecto FONDECYT 3160843 en colaboración con la Dirección General de Aguas (DGA) a partir de abril de 2017. Estos datos fueron utilizados para la calibración de los datos generados por el modelo.

Evaluar y cuantificar espacialmente la erosión post incendio utilizando un modelo de procesos en la región de estudio

Generación de escenarios

Para esta investigación, se realizaron dos simulaciones en GeoWEPP, con un mismo periodo de 9 años de modelación para cuantificar y analizar espacial y temporalmente la erosión. Los escenarios representados fueron:

-Escenario sin incendio “Las Máquinas”: este escenario consideró que la pérdida de suelo que ocurre en la subcuenca es consecuencia únicamente de las condiciones de manejo (plantación, crecimiento y cosecha de la vegetación). Estas condiciones hipotéticas se mantuvieron invariables en el tiempo. También, esta simulación considera que el evento de incendio “Las Máquinas” no ocurre durante el verano 2017 y que sus efectos de severidad no son expresados en el suelo ni en el manejo vegetacional de la subcuenca.

-Escenario con incendio “Las Máquinas”: esta modelación considera la ocurrencia del incendio “Las Maquinas” durante el verano 2017, que las distintas coberturas de suelos existentes en la subcuenca (matorral, agro pradera, bosque nativo, suelo desnudo, plantación forestal joven y madura) experimentaron distintos efectos del fuego, expresado mediante la severidad de incendio (Valencia et al. 2018). Además, este escenario considera que los efectos del incendio abarcaron hasta el fin del periodo de modelación, 31 de diciembre de 2018.

El objetivo fue realizar dos simulaciones y escenarios en GeoWEPP, de tal manera que el primer escenario sin incendio (el cual es una situación ficticia puesto que la subcuenca fue afectada por un incendio) permitió parametrizar el modelo WEPP y GeoWEPP en el periodo de modelación de 9 años y analizar sólo el comportamiento espacial y temporal de los resultados de salida del modelo (producción diaria de sedimentos). Una vez realizado lo anterior, comprendido y analizado el funcionamiento del modelo y de sus resultados, en el segundo escenario (con ocurrencia de incendio) también se procedió a su parametrización, se calibraron los parámetros sensibles relacionados a la producción de sedimentos, aplicando una función objetivo (Coeficiente de Correlación) entre los datos simulados de este escenario versus los observados por la estación Quebrada Pasitos.

Funcionamiento de GeoWEPP y productos del modelo. Para la primera modelación, escenario sin incendio, se ingresó en la interfaz GeoWEPP el DEM LIDAR, las capas raster de suelos, cobertura de suelos (a 20 m de resolución espacial, misma proyección geográfica, extensión geográfica y formato de archivo Esri ASCII) y los respectivos archivos “puente” entre la información SIG de suelos y cobertura con los archivos de parámetros WEPP (Minkowski y Renschler, 2013).

El siguiente procedimiento fue especificar en la interfaz cuales serían los parámetros de *Critical Source Area* y *Minimum Source Channel Length* (Minkowski y Renschler, 2013). Según González (2013), la disminución y utilización de valores bajos de los

parámetros CSA y MSCL ocasiona que TOPAZ genere redes hidrográficas más densas, y esto implica que se aumentan la cantidad de laderas y canales en la discretización. Esto se debe principalmente a que TOPAZ utiliza el método D8 para la discretización, y al haber utilizado un DEM con resolución espacial más fina, se pudieron obtener más direcciones de flujo y subcuencas, respecto a si se hubiese utilizado un DEM de resolución espacial más gruesa (ejemplo, a 30 m.) (González, 2013). En base a lo anterior, los valores utilizados de CSA y MSCL para ambos escenarios fue de 2 ha y 10 m respectivamente. Posteriormente, se seleccionó el punto de salida de la subcuenca el cual se hizo coincidir con la ubicación espacial de la estación Quebrada Pasitos y detallar la Zona UTM en la que se ubica la subcuenca a modelar (18 Sur) (Minkowski y Renschler, 2013). Los siguientes procedimientos son seleccionar el archivo climático creado (en formato CLI), comparar y comprobar si las capas raster de suelo y de su cobertura corresponden mutuamente a los archivos de parámetros WEPP de suelo y de manejo vegetacional (Minkowski y Renschler, 2013). Luego, se corrió la simulación con el método *Watershed*, para 9 años de modelación (desde 01/01/2010 al 31/12/2018).

Para la segunda simulación, también se ingresaron como dato de entrada las capas raster DEM LIDAR y suelos, junto a la capa de cobertura de suelo intersectada con severidad de incendio la cual es exclusiva del segundo escenario. Posteriormente, se siguieron los mismos procedimientos del párrafo anterior respecto a los parámetros de *Critical Source Area* y *Minimum Source Channel Length*, punto de salida de la subcuenca y la Zona UTM utilizada, además de utilizar el mismo archivo climático y método de simulación *Watershed* (Minkowski y Renschler, 2013) para 9 años.

GeoWEPP permitió generar 2 capas raster como resultado de la simulación del modelo (una por cada escenario), que especifican por categorías la producción absoluta de sedimentos en cada subcuenca en base al valor T. Este concepto describe la tasa de reemplazo anual de un tipo de suelo para mantener un uso de suelo sostenible (Schertz, 1983). Para efectos de este estudio se ha utilizado el valor T de $1 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para ambos escenarios, que viene por defecto en la interfaz. Esto implica que las tasas tolerables se representan en tonos verdosos, mientras que las no tolerables se simbolizan con tonos de color rojo (Salvador et al., 2014).

Complementariamente a los archivos raster generados, GeoWEPP genera dos archivos de texto después de cada modelación:

- Archivo de resumen (*Summary*, en inglés) de la modelación: incluye el detalle de volumen de escorrentía (en unidades de m^3) y producción de sedimentos (las 3 variables en unidades de kg) para cada ladera y canal de la subcuenca. También se incluye en este archivo la pérdida de suelo media anual en laderas y canales ($\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), descarga de sedimento media anual desde el punto de salida de la subcuenca (ton año^{-1}) y producción de sedimentos media anual por unidad de área de la subcuenca ($\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) (Minkowski y Renschler, 2013).

- Archivo de eventos producidos (*Events*, en inglés): detalla aquellos eventos hidrológicos que generaron producción de sedimentos (kg), ordenados por día, mes y año del periodo de modelación (Minkowski y Renschler, 2013).

Como se mencionó anteriormente, solamente en la modelación sin incendio se realizó un análisis espacio-temporal del producto de salida raster y del archivo de resumen generado; mientras que para el escenario con incendio también se realizó la calibración de parámetros sensibles ajustando una función objetivo entre datos simulados (obtenidos del archivo de eventos) versus observados utilizando la información del archivo de eventos diarios, análisis de los datos simulados del archivo de resumen junto a un análisis espacial de la capa raster (del mejor ajuste estadístico obtenido).

Calibración del modelo para escenario con incendio

El primer procedimiento fue utilizar los reportes diarios de producción de sedimentos (kg/día) del archivo de eventos generado por GeoWEPP considerando 9 años de simulación, para el escenario con ocurrencia de incendio. Paralelamente, se verificó en que días, meses y años el modelo genera resultados diarios de producción de sedimentos que coincidan con la información diaria disponible en la estación Quebrada Pasitos. Cabe mencionar que la información generada por el modelo respecto a la producción de sedimentos (kg día⁻¹) no posee las mismas unidades de medidas que las registradas por la estación (mg l⁻¹), por lo que fue necesario el uso de la Ecuación 7 para homologar las magnitudes observadas

$$Ps = Ci \times Q \times 0.0864 \times 1.000$$

Ecuación 7. Ecuación para transformar flujo diario (caudal x concentración) en producción de sedimentos diarios (kg día⁻¹).

Donde,

Ps: Producción de sedimentos diaria (Kg día⁻¹)

Ci: Concentración instantánea diaria (mg l⁻¹)

Q; Caudal diario (m³ s⁻¹) (EIEI, 2000).

Una vez identificados aquellos eventos generados por el modelo que coincidieron temporalmente con los datos observados, se procedió a verificar la correlación estadística entre ambos, utilizando para ello el Coeficiente de Determinación (R²). Los rangos de R² varían entre 0 y 1, donde uno se refiere a que los valores predichos por el modelo son iguales a los valores observados por la estación, mientras que el valor cero se refiere a que no hay correlación entre los valores observados y los predichos (Krause et al., 2005).

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O_p)(E_i - E_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O_p)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (E_i - E_p)^2}} \right]^2$$

Ecuación 8. Ecuación del Coeficiente de Determinación (R²)

Donde,

n: número de observaciones

O_i: Valores observados de escorrentía ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) y producción de sedimentos (kg día^{-1}).

O_p: Promedio de los valores observados de escorrentía ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) y producción de sedimentos (kg día^{-1}).

E_i: Valores estimados por el modelo.

E_p: Promedio de los valores estimados por el modelo.

i: Contador de la cantidad de valores individuales observados y modelados (Krause et al., 2005).

Si el valor de este estadístico arrojaba valores bajos de correlación, entre 0 y 0,4 (da Rocha Junior et al., 2018), se procede a la calibración y análisis de sensibilidad de los datos modelados que coincidan temporalmente con los datos observados, de tal manera de encontrar valores simulados de producción de sedimentos que se ajusten más a la realidad.

El siguiente procedimiento fue identificar los parámetros más sensibles del modelo WEPP, en relación con la producción de sedimentos. De acuerdo con la bibliografía, los parámetros del modelo más sensibles para la producción de sedimentos son la erosionabilidad entre regueros, erosionabilidad en regueros y esfuerzo de corte crítico (Nearing et al., 1990; Tizcareno-López et al., 1991; Ascough et al., 2013; Demir y oğuz, 2019) y están relacionados a los datos de entrada de suelo en los archivos SOL creados en WEPP, por lo que se pueden modificar manualmente en éstos. En relación con los procesos erosivos y la producción de sedimentos, estos 3 parámetros son considerados dominantes (Fashi y Ejlali, 2015).

Análisis de sensibilidad para escenario con incendio. Una vez identificados los parámetros sensibles de WEPP, se realizó un análisis de sensibilidad de los 3 parámetros de suelo mencionados anteriormente en el escenario con incendio. El análisis de sensibilidad se realiza para identificar qué rangos cuantitativos de los parámetros sensibles de un modelo tienen influencia en la precisión y exactitud de los resultados de éste (Nearing et al., 1990). La variación de estos 3 parámetros fue una modificación de los valores “base” utilizados (los mismos valores de los 3 parámetros de suelos utilizados en el escenario sin incendio), en un aumento y disminución porcentual del $\pm 10, \pm 20, \pm 25, \pm 50, \pm 75$ y $+ 100$ (Fashi y Ejlali, 2015) en ambos escenarios. Los 3 parámetros sensibles del modelo WEPP relacionados a la producción de sedimentos fueron modificados porcentualmente de sus valores “base”, se crearon archivos de texto de parámetros de suelo para cada una de estas variaciones, se realizaron nuevas submodelaciones ingresando a GeoWEPP cada uno de estos archivos considerando la misma parametrización de los datos de entrada del escenario con incendio, tal como se mencionó anteriormente. Una vez que cada submodelación de las variaciones porcentuales generara como resultado estimaciones diarias de producción de sedimentos en los 9 años de modelación, se seleccionaron solo aquellos “Eventos” que coincidieran temporalmente, en fechas, con la información diaria registrada de producción de sedimentos de la estación Quebrada Pasitos.

Luego, se utilizó un procedimiento estadístico para analizar que tan bien los datos simulados seleccionados por fechas coincidían con los datos observados de cada submodelación mediante el estadístico R^2 . Finalmente se seleccionó aquella variación

porcentual de una submodelación, que generó el valor más alto del estadístico R^2 y que representaría la mejor correlación entre los datos modelados y los observados del escenario con ocurrencia de incendio.

Evaluación del desempeño del modelo

Complementariamente, en la situación que generó un mejor valor de R^2 en el escenario con incendio, se utilizaron otros dos procedimientos estadísticos para determinar cuánto fue la precisión y error porcentual entre datos modelados seleccionados por fechas generados por WEPP y los observados por la estación Quebrada Pasitos. Estos estadísticos fueron la Raíz del Error Cuadrático Medio y el Sesgo Porcentual.

La Raíz del Error Cuadrático Medio se utiliza para evaluar la capacidad predictiva de los modelos y representa el error o diferencia entre los valores observados y los predichos por el modelo y puede ser usado para derivar otro tipo de información respecto a la naturaleza del error (Willmott, 1981).

$$RECM = \left[\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Ei - Oi)^2}{n}} \right]$$

Ecuación 9. Ecuación de la Raíz del Error Cuadrático Medio (RECM).

El valor óptimo de Sesgo Porcentual es 0, en que los valores de menor magnitud indican simulaciones precisas del modelo (Gupta et al., 1999).

$$SP = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Oi - Ei) \times 100}{\sum_{i=1}^n (Oi)} \right]$$

Ecuación 10. Ecuación del Sesgo Porcentual (SP).

Simulación espacio-temporal de erosión para ambos escenarios

Utilizando los datos de salida del modelo previamente mencionados, finalmente se describieron y compararon espacialmente las tasas de producción de sedimentos de las capas raster generadas por GeoWEPP, de la modelación sin incendio y de la modelación con incendio que obtuvo el mejor valor de los estadísticos R^2 , RECM y Sesgo Porcentual, además de un análisis de estas 2 capas intersectada cada una (en el software SIG) con información espacial de las pendientes, suelos y cobertura de suelos utilizadas en la parametrización previa.

También, se realizó un análisis detallado de la información generada en los archivos de resumen de ambos escenarios (sin incendio y con incendio con los mejores valores estadísticos encontrados) respecto a volumen medio anual de escorrentía (m^3) y producción de sedimentos (kg) por ladera; identificación espacial y detalle de los valores de producción de sedimentos de aquellas laderas que generaron sobre $5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$

para la modelación sin incendio y sobre $25 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la modelación con ocurrencia de incendio; y finalmente la descripción de los valores de los parámetros de salida de los 2 escenarios, generados por los archivos de resumen después de cada modelación.

RESULTADOS Y DISCUSION

Parametrizar factores relevantes para la erosión post incendio en la región de estudio, que permitan alimentar un modelo de procesos.

A continuación, se presentarán los resultados y análisis de figuras, cuadros correspondientes a los datos de entrada que requirió el modelo WEPP y la interfaz GeoWEPP en ambas modelaciones.

Topografía

En la Figura 3 se presenta el DEM LIDAR de resolución 5m para la subcuenca de Santa Olga, cuya resolución fue la “base” para ser finalmente re muestreada a 20 m de resolución en el modelo. En esta figura se observa que la altitud de esta subcuenca va desde los 280 m hasta los 550 m. Los sectores de menor altitud se encuentran ubicados en los valles noreste de la subcuenca, en las curvas de nivel entre los 300 y 350 m, cercanos y adyacentes a la Quebrada Pasitos. Esta Quebrada fluye por el sector oriental del área de modelación, originándose en los 422 m de elevación y su menor altitud se encuentra en los 280 m aproximadamente. La presencia de arroyos y canales en los sectores de altitud media-alta de la subcuenca, se encuentran en su mayoría en la cota 400 y 340 m. Destaca también un cordón de cerros y lomas en el flanco occidental de la subcuenca, entra las curvas de nivel 500 y 450 m de altitud. La subcuenca de Santa Olga posee una altitud media de 418 m.s.n.m, su pendiente promedio es de 21° (40%) y la orientación promedio de sus laderas es hacia el Sur.

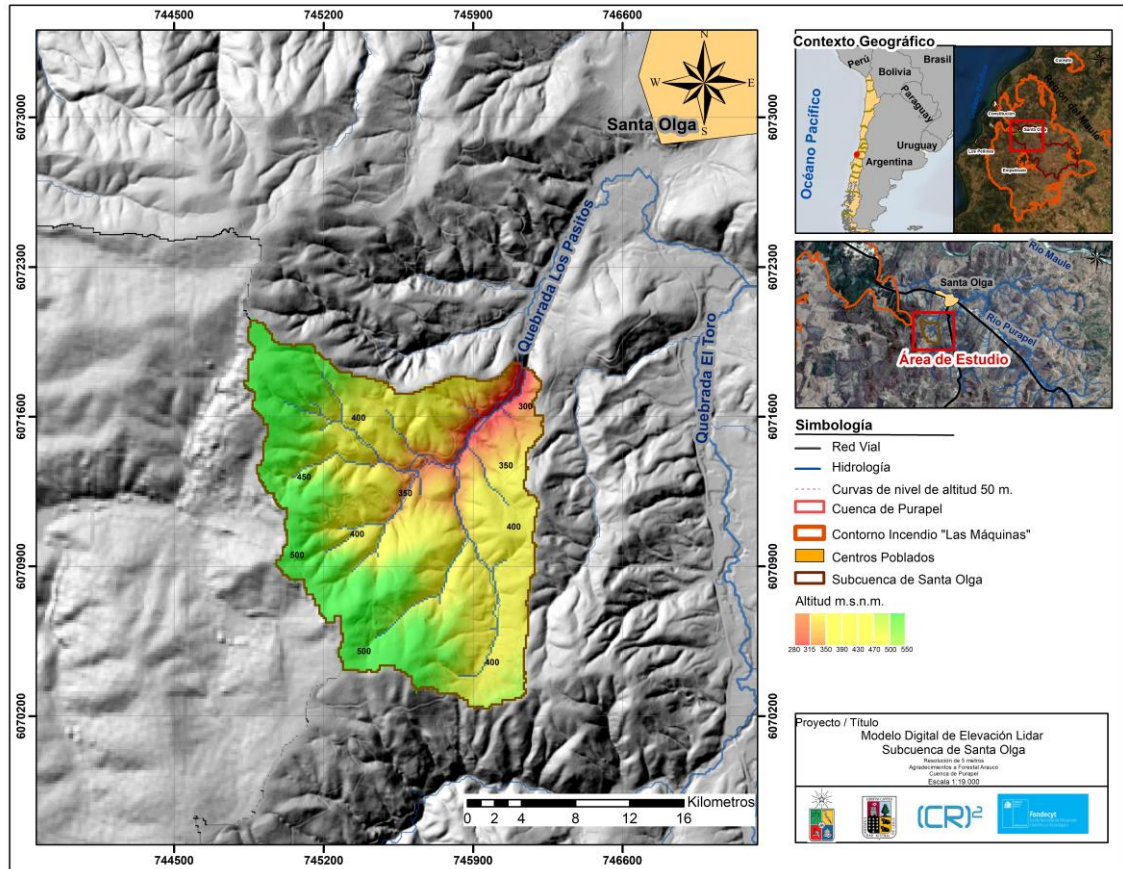


Figura 3. Modelo Digital de Elevación LIDAR, Subcuenca de Santa Olga.

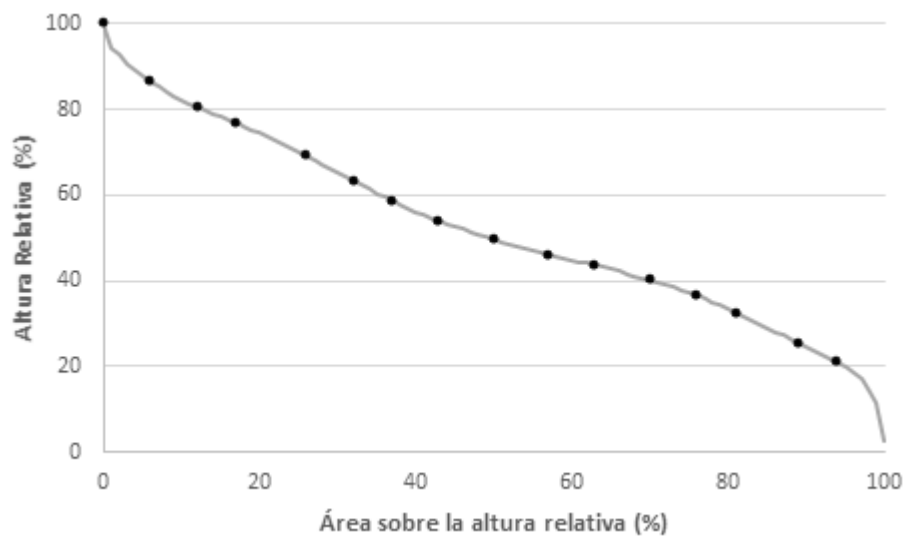


Figura 4. Curva de elevación de la subcuenca Santa Olga.

De acuerdo con la curva de elevación, obtenida a partir del DEM LIDAR, la subcuenca de Santa Olga se encuentra en una etapa geomorfológica juvenil. Esto implica, que en esta subcuenca la mayor parte del área (o el volumen de suelo y rocas) se mantienen y se ubican en altitudes relativamente altas, por lo que es altamente susceptible a procesos erosivos (Sharma et al., 2018), sus suelos pueden verse afectados por procesos erosivos

de salpicaduras de gotas de lluvia, erosión entre surcos y canales y desprendimiento de las capas superficiales del suelo (Willgoose y Hancock, 1998).

Cobertura del suelo

Como se mencionó anteriormente, la capa de cobertura utilizada fue la Clasificación Supervisada año 2015 realizada por Sotomayor (2017). En el Apéndice 10 se detallan las definiciones de las clases de cobertura utilizadas en la Clasificación. Para poder realizar las modelaciones en GeoWEPP y WEPP, fue necesario utilizar esta capa raster a una resolución espacial de 20 m. El mapa de cobertura utilizado para esta investigación y que fue acotado a la subcuenca de Santa Olga, se detalla en la Figura 5. Según ésta, la cobertura de suelo Plantación Forestal Joven se ubica en las zonas entre los distintos canales, arroyos y quebradas desde las cotas altas hasta las más bajas de altitud en la subcuenca, mientras que la cobertura Suelo Desnudo se encuentra en los sectores de lecho fluvial y bordes adyacentes de los canales, arroyos y quebradas. La cobertura Plantación Forestal Adulta se concentra en las altitudes altas noroeste de la subcuenca y la parte central de ésta, donde confluyen la mayoría de estos transportadores de flujo. La cobertura de Bosque Nativo se encuentra asociada a la cobertura Agropradera en elevaciones altas y piedemonte. Cabe destacar, que mediante el análisis de la Figura 5, existen 12 parches de cobertura de suelo Matorral (área aproximada de 19.000 m²), los cuales se encuentran asociados en la mayoría de los casos a la cobertura de suelo Plantación Forestal Joven. Esto se debe a que la cobertura Matorral fue erróneamente clasificada en aquellas zonas donde hubo cosecha de plantaciones, colonización por arbustos y en plantaciones jóvenes debido a que la primera cobertura tiene similar firma espectral y estructura que las coberturas de plantación joven de pino, situación que fue atribuible a la resolución espectral de los sensores de resolución media (TM5, ETM+ y OLI de la plataforma Landsat 5, 7 y 9 respectivamente) utilizados para la realización de esta Clasificación Supervisada (Sotomayor, 2017).

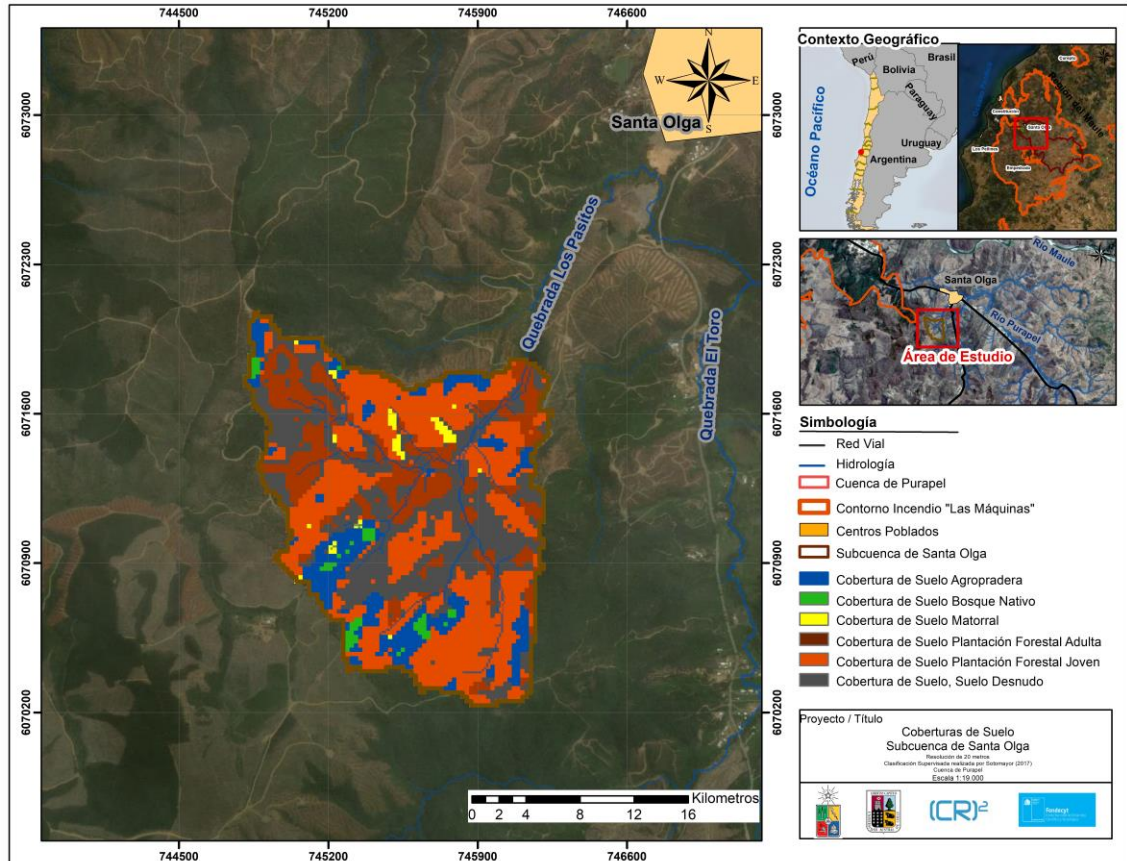


Figura 5. Clasificación Supervisada, Subcuenca de Santa Olga. (Elaboración propia, en base a Sotomayor, 2017).

En la Figura 6 se presentan los porcentajes de cada superficie de estas coberturas. Las mayores superficies de cobertura en la subcuenca corresponden a Plantación Forestal Joven y Suelo Desnudo, las cuales abarcan más del 50% del área de estudio. Las coberturas de suelo con menor superficie, en orden descendiente, son Plantación Forestal Adulta, Agropradera, Bosque Nativo y Matorral, estas dos últimas con los menores porcentaje de área.



Figura 6. Porcentajes de las clases de cobertura de suelo de la Clasificación Supervisada, Subcuenca de Santa Olga. (Sotomayor, 2017).

Severidad de incendio

Una alta severidad de incendio afectó una mayor superficie a la subcuenca, en que los troncos y follajes de la vegetación arbórea fueron carbonizados por éste (Tolorza et al, 2017). Este efecto del incendio abarcó cotas de altitud altas, medias y bajas, y se extendió principalmente en las zonas intermedias de la red hidrográfica de la subcuenca. La Categoría de Severidad Moderada, en que el fuego del incendio dejó al follaje quemado (color negro o café), se encuentra principalmente en aquellos sectores de lecho de canales, arroyos y quebradas, además de zonas contiguas a esta red hidrográfica de la subcuenca. (Tolorza et al, 2017). Por último, la clasificación de Severidad Leve se extendió en los sectores de valle noreste, y también en la boca de salida de la subcuenca. En la Figura 7 se observan las distintas clasificaciones de severidad dentro de la subcuenca de Santa Olga.

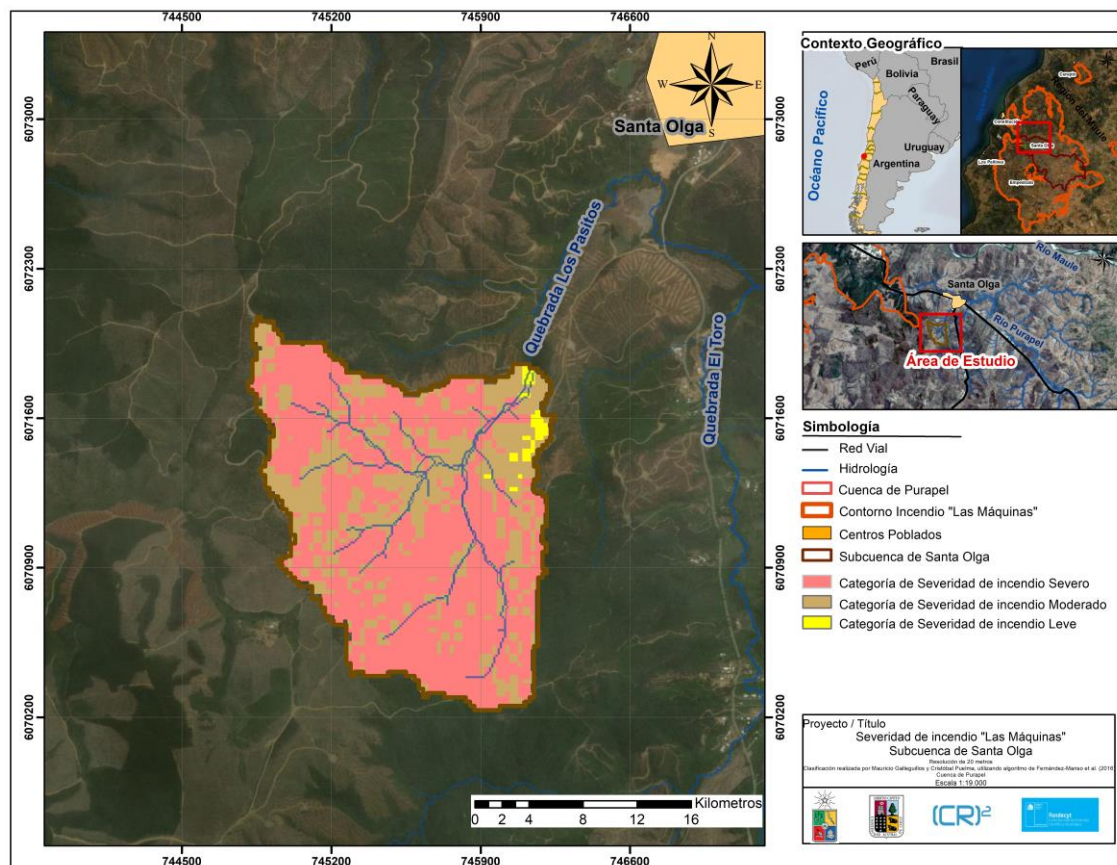


Figura 7. Severidad de incendio, Subcuenca de Santa Olga. (Elaboración propia, en base a Castillo y Galleguillos, 2018).

De un total de 173 ha de superficie que abarca la superficie de la subcuenca, 125 ha poseían Categoría Severa, 46 ha tenían Categoría Moderada y solo 1,85 ha correspondían a Categoría Leve de severidad de incendio.

Cobertura de suelos y Severidad de incendio

Como se mencionó anteriormente, para la modelación en WEPP y GeoWEPP del segundo escenario considerando la ocurrencia del incendio “Las Máquinas”, fue necesaria la utilización de una capa raster de resolución espacial de 20 m, la cual resultó de la intersección espacial de las capas raster de Cobertura de suelos y Severidad de incendio, de la subcuenca Santa Olga.

De la intersección espacial, en el software SIG, de las 2 Categorías de Severidad que fueron consideradas y que abarcan mayor superficie (Moderada y Leve) con las 6 clases de Cobertura de suelo, se obtuvieron 11 nuevas clases que representan la afectación del fuego del incendio en las coberturas biológicas, dentro de la subcuenca. En la Figura 8 se presentan la distribución espacial de estas nuevas clasificaciones.

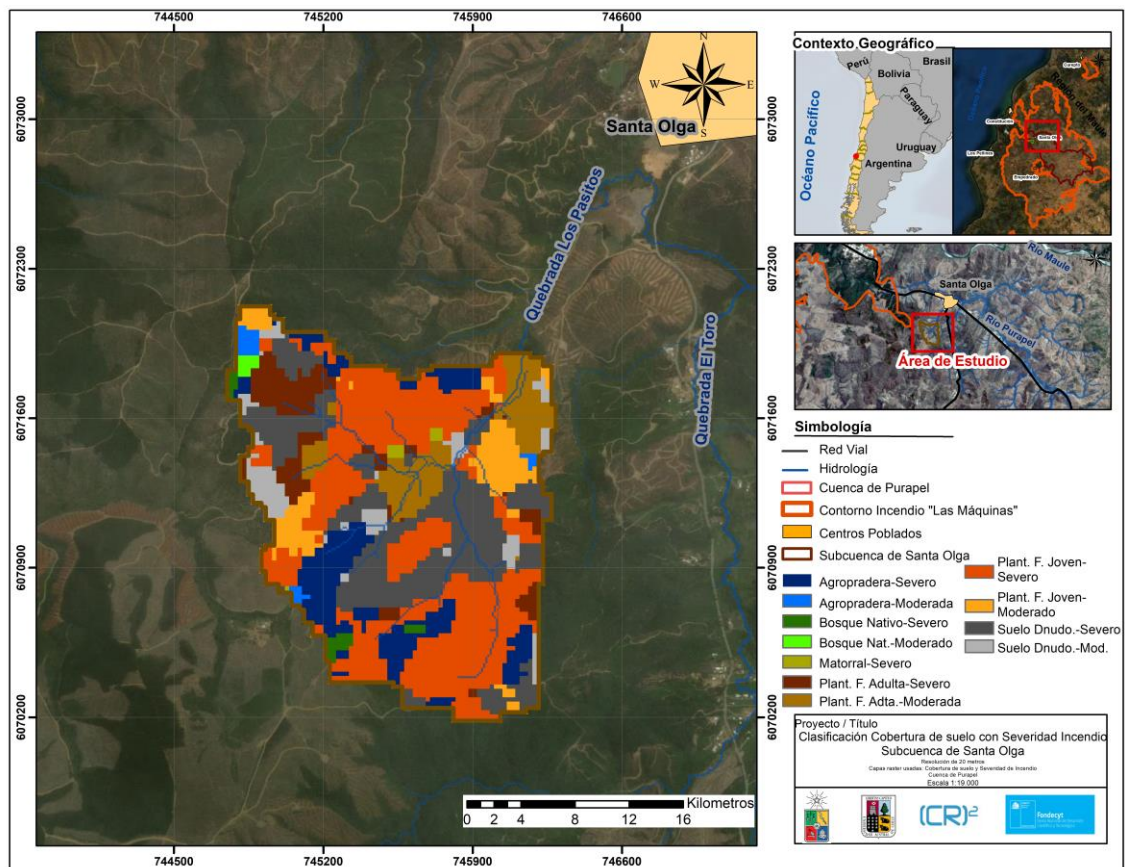


Figura 8. Cobertura de suelos interseccionada con Severidad de incendio, Subcuenca de Santa Olga.

En el Cuadro 1 se detallan las superficies de estas 11 clases de Cobertura de Suelo y Severidad de incendio. Las clases Plantación Forestal Joven – Categoría Severo y Suelo Desnudo – Categoría Severo son las que abarcan más del 50% del total de superficie, mientras que cada una de las 9 clases restantes abarcan menos del 10% de área de la subcuenca.

Cuadro 1. Clases de cobertura de suelos y Severidad de Incendio.

Cobertura	Severidad	Superficie en hectáreas
Agropradera	Categoría Moderada	20,02
Agropradera	Categoría Moderada	2,26
Bosque Nativo	Categoría Severo	2,1
Bosque Nativo	Categoría Moderada	0,76
Matorral	Categoría Severo	0,74
Plantación Forestal Adulta	Categoría Severo	12,23
Plantación Forestal Adulta	Categoría Moderada	14,49
Plantación Forestal Joven	Categoría Severo	59,85
Plantación Forestal Joven	Categoría Moderada	12,33
Suelo Desnudo	Categoría Severo	38,73
Suelo Desnudo	Categoría Moderada	9,53
Total		173,04

Información de Suelos

Información Geoespacial de Suelos

En relación con la Asociación Alto Colorado, cuya distribución en la Figura 9 corresponde a sectores de cerros y lomajes (Cosío et al., 2007) con 20 a 30% de pendiente, son suelos de variable profundidad (40 a 100 cm) y es un suelo que ha sido clasificado susceptible a erosión de manto con zanjas frecuentes y erosión moderada o leve por agua, además de fragilidad moderada (CIREN, 1997). Como se mencionó anteriormente, los suelos del secano costero interior han sido utilizados históricamente para la plantación y cosecha de coberturas forestales, lo que con el tiempo ha generado deterioros importantes en su calidad, y los horizontes superficiales de suelo tienen limitada capacidad de retención de agua y la vegetación ha quedado expuesta a agentes climáticos, como la lluvia (Flores, 2010).

Respecto a la Asociación Constitución, son suelos que ocupan sectores montañosos, valles, sectores planos remanentes y quebradas (Instituto de Investigación de Recursos Naturales CORFO, 1964), con pendientes abruptas (30%), alta pedregosidad, bajos niveles de fósforo, nitrógeno y materia orgánica, la exposición norte de sus laderas tienen fases delgadas y son susceptibles a erosión por viento en invierno y primavera (Peña y Herrera, 1990). También, son suelos que poseen una muy buena aptitud para plantaciones forestales, drenaje regular debido a sus favorables características de perfil, textura,

porosidad y permeabilidad (CIREN, 1997). Además, presentan erosión desde nula a moderada (Espinosa et al., 2006). Por último, la Asociación Trehuaco ocupa zonas de cerros y valles de la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, en que la topografía varía desde 5% hasta 45% en los sectores cercanos a quebradas y la profundidad efectiva del suelo es mayor de 100 cms. El substrato del suelo de esta Asociación se encuentra meteorizado, lo que facilita un buen desarrollo de raíces y el establecimiento de coberturas de bosque nativo y plantaciones forestales. (Arrau Ingeniería, 2012). Son suelos que son susceptibles a la erosión laminar y de manto, y clasificados en categoría de moderada erosión. (CIREN, 1997).

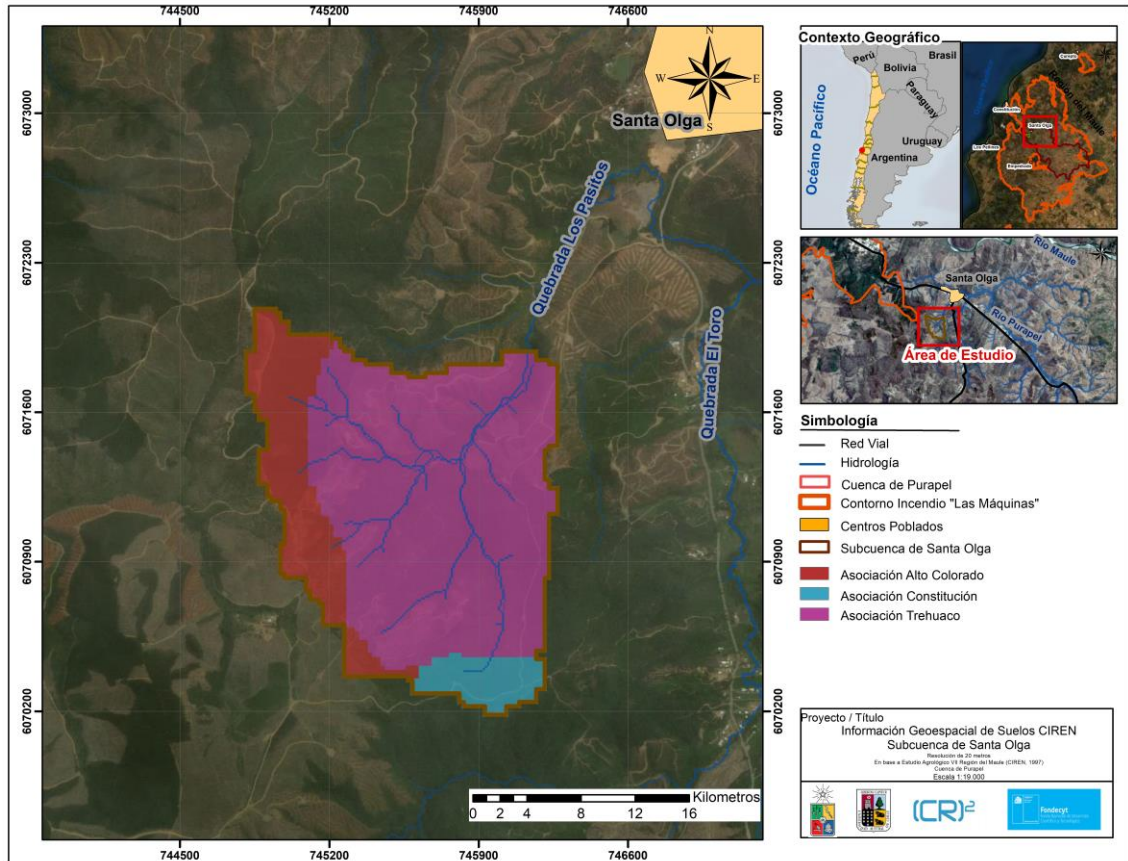


Figura 9. Tipos de suelos, Subcuenca de Santa Olga (CIREN, 1997).

En la Figura 10 se detallan los porcentajes de las superficies de las Asociaciones de suelo, en la subcuenca de Santa Olga. Se destaca que la Asociación Trehuaco abarca aproximadamente el 73% del total de superficie (130 ha).

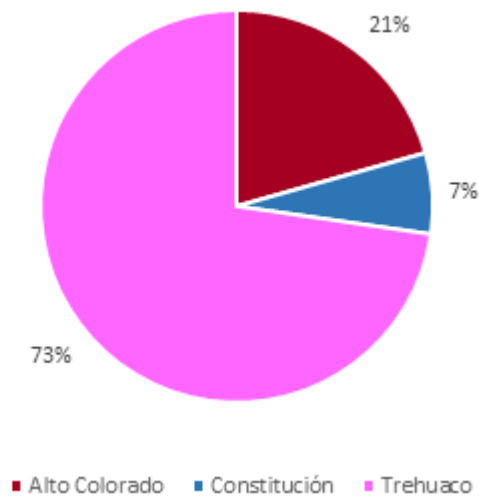


Figura 80. Porcentajes de los tipos de suelos, Subcuenca de Santa Olga. (CIREN, 1997).

Información Geoespacial SOTERLAC

Dada la amplia escala regional que abarcó el catastro geoespacial de la Base de Datos SOTERLAC, de acuerdo con su metodología (Batjes, 2005), los suelos que se ubican en la subcuenca de Santa Olga son clasificados en su mayor parte como orden Alfisoles y textura franco-arcillosa, alto contenido de arcilla (Spectrum Analytic, 2008), en que el valor $20,69 \text{ cmol kg}^{-1}$ está considerado satisfactorio para tierras de cultivo y plantaciones forestales (Batjes et al., 2008).

Cabe destacar, que se utilizó este único valor del parámetro Capacidad de Intercambio Catiónico ($20,69 \text{ cmol kg}^{-1}$) en el horizonte superficial de suelo, para la creación de los 3 archivos de suelo de las 3 Asociaciones, en los 2 escenarios de modelación (sin ocurrencia de incendio y con ocurrencia de éste), dado que no es un parámetro sensible de suelos en el modelo WEPP método *Watershed*, por lo tanto los resultados que arroja la simulación, estimación de suelo y producción de sedimentos, no se ven influenciados ni modificados por haber utilizado un valor fijo de este parámetro de suelo (Tiscareno-López et al., 1991).

En la Figura 11 se presenta la información Geoespacial de la Capacidad de Intercambio Catiónico, obtenido desde la Base de Datos SOTERLAC 2005, a escala 1:5.000.000.

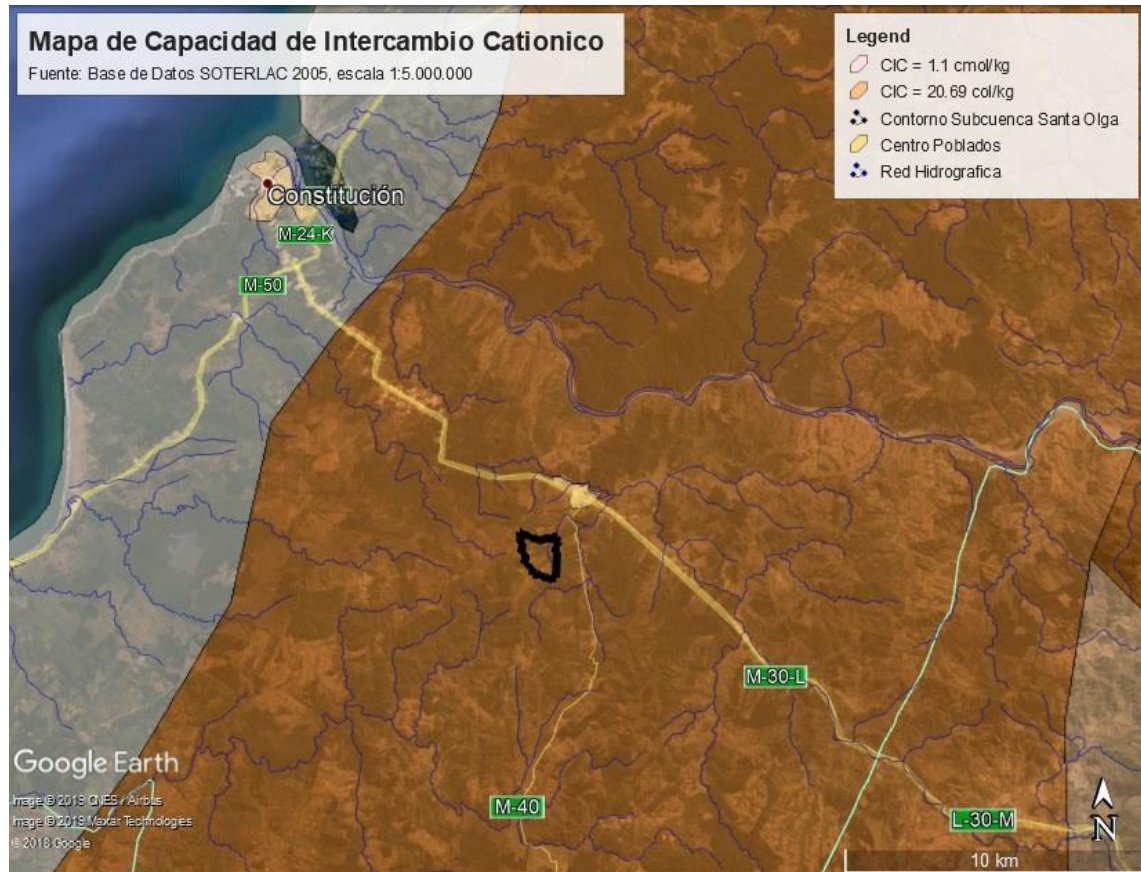


Figura 11. Información Geoespacial SOTERLAC, Subcuenca de Santa Olga (Elaboración propia, en base a SOTERLAC, 2005).

Información de terreno de suelos

En relación con las clases texturales de las Asociaciones de suelo, según la clasificación USDA, la Asociación Alto Colorado presenta textura franco-arcillosa en el perfil 0-25 cm y el perfil 25-55 cm de profundidad. En su primer perfil (0-20 cm), la Asociación Alto Colorado es de textura franco-arcillosa; y su segundo perfil (20-40 cm) y tercer perfil (40-60 cm) son arcillosos. Por último, la Asociación Trehuaco presenta en su primer perfil (0-20 cm) textura franca, y en el segundo (20-40 cm) y tercer perfil (40-60 cm) textura arcillosa (Soil Survey Staff, 1999).

La erodabilidad del suelo es la susceptibilidad que tiene éste a la separación de las partículas y al transporte de éstas debido a agentes erosivos, como el agua. (Lal y Elliot, 1994). La erodabilidad depende de características físicas del suelo (porcentajes de arena, limo y arcilla) y del contenido de materia orgánica. (Singh y Khera, 2008). Una de las maneras de poder evaluar la erodabilidad del suelo, es mediante una fórmula empírica llamada Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE, *Universal Soil Loss Equation* en inglés), la cual considera un factor de erodabilidad (factor K) y representa la vulnerabilidad del suelo a la erosión hídrica y considera sus propiedades texturales (Wischmeier et al., 1971). Abarzúa (2017) estimó el factor K en suelos forestales considerando propiedades físicas del suelo, y en su investigación determinó que el valor de este parámetro para las zonas de la Cordillera de la Costa de la Región del Maule es

de 0.03. En general los suelos que presentan textura franco-arcillosa, franca y arcillosa, descritos en el párrafo anterior para el área de modelación, también presentan rangos de valores del factor K similares al estudio de Abarzúa (2017), 0,0370, 0,0341 y 0,0276 respectivamente (Bouguerra et al., 2017). Esto implica, que de acuerdo con el valor aproximado del factor de erodabilidad que poseen los suelos de la subcuenca de Santa Olga, éstos presentan substratos que son lentamente permeables (Okorafor et al., 2018).

Según el Servicio de Conservación de Recursos Naturales (2004) (*Natural Resources Conservation Service*, en inglés), los suelos pueden ser clasificados en grupos hidrológicos según la tasa a la cual los suelos pueden incorporar cantidad de agua caída por precipitación y escorrentía. Los suelos con clase textural franco arcillosa, franca y arcillosa son clasificados en el Grupo B, es decir, son suelos que poseen tasas de infiltración moderada y/o lenta, en que predomina la escorrentía. (NRCS, 2007).

En el Anexo 2 y Anexo 3 se presentan las propiedades de las físicas de las 3 Asociaciones de suelo que se encuentran en la subcuenca de Santa Olga, respecto al porcentaje de arena, porcentaje de arcilla, porcentaje de materia orgánica y densidad aparente

Clima

La subcuenca de Santa Olga, ubicada en la cuenca de Purapel y en el secano costero interior de la Región del Maule, presenta clima mediterráneo (Little et al., 2009) y durante el periodo 2010-2018 el número de eventos de precipitación promedio por año fue de 111, en que el 2014 hubo más cantidad de eventos (190) y el 2013 hubieron menos (84); el promedio de precipitación acumulada anual fue de 662 mm. Respecto al análisis mensual, las precipitaciones se concentran entre los meses de mayo a agosto y los meses menos lluviosos son desde Noviembre hasta Abril.

Las temperaturas máximas se mantuvieron alrededor de los 22 °C y las mínimas en los 7° en promedio, para todo el periodo de modelación. El mes con la temperatura media más alta corresponde a Enero (20,1 °C) y el mes con la temperatura media más baja fue Junio (8,4 °C).

En el Apéndice 16.a y 16.b se detallan las series de tiempo y boxplots de la información diaria, mensual y anual de la temperatura mínima y máxima (ambas en °C) y en el Apéndice 16.c aparecen las precipitaciones (mm) anuales. De manera complementaria, en el Apéndice 16.d y 16.e se detalla el grafico anual y mensual de las distribuciones de radiación solar, temperatura de rocío y velocidad del viento. Todos los parámetros mencionados anteriormente proceden desde la Base de Datos Climática, del archivo *Custom* y del archivo climático PAR. Como se mencionó anteriormente estas variables fueron obtenidas y conformadas en base a 9 años de información climatológica (desde el 01/01/2010 al 31/12/2018) de la Estación Sauzal.

Información de manejo de la vegetación

A los archivos de manejo ROT creados en ambos escenarios se les modificó la información referente a fechas y Altura Máxima de la canopia, para representar de

manera aproximada las condiciones vegetacionales y cambios paisajísticos ocurridos en la subcuenca, información detallada a continuación.

En el Apéndice 10 se detallan los archivos de manejo de las 6 coberturas de suelo que fueron utilizados para una modelación sin incendio considerando el nombre de archivo ROT guardado y utilizado en WEPP; el nombre del archivo de la base de datos de WEPP utilizado para declarar cada una de las coberturas y vegetación en crecimiento de 1 a 5 años; y el nombre de los archivos *initial plant* de la base de datos de WEPP de cada cobertura que definen las condiciones de la vegetación, plantación y cosecha.

En el Apéndice 11 se detallan los archivos de manejo de las 11 clases de Cobertura y Severidad de Incendio creados y utilizados para la modelación considerando la ocurrencia de incendio, además se detalla que archivos fueron empleados desde la base de datos de manejo de WEPP para describir las condiciones de severidad de incendio moderado y severo. En el Anexo 5 se detallan las descripciones de algunos archivos de manejo de la base de datos, según el equipo técnico y científico detrás del software WEPP.

Imágenes satelitales históricas de Google Earth

En el Apéndice 12 se especifican las imágenes satelitales utilizadas a partir del software Google Earth Pro para ambos escenarios de modelación, sus fechas, fuentes de obtención, manejo de vegetación detectado y porcentaje de cambio de las superficies cuando ocurría un tipo de manejo específico en una fecha dada (plantación, regeneración, o cosecha).

Datos de Altura de la canopia

Para la primera modelación, fueron utilizadas las alturas de vegetación recopiladas en terreno por Ceballos y Galleguillos (2018), mientras que, para la segunda modelación, se consideró que todas las alturas de la vegetación de las coberturas afectadas por severidad alta sería 0 cms., mientras que las alturas de la vegetación de coberturas afectadas por severidad moderada fueron considerando aproximadamente el 10% de las alturas medidas por Ceballos y Galleguillos (2018). Cabe destacar que la altura de canopia de las coberturas de suelo no es un parámetro sensible del modelo WEPP método *Watershed*, por lo que, al ingresar valores manuales en los archivos de manejo de vegetación, respecto a la altura de vegetación medidas en campañas de terreno, consulta bibliográfica o criterio experto, no influirá ni afectaran las estimaciones de pérdida de suelo y producción de sedimentos generadas en las simulaciones (Nearing et al., 1990).

En la Cuadro 2 se presentan los datos de altura de cada cobertura para la modelación sin incendio y para la modelación con incendio.

Cuadro 2. Alturas de canopia utilizadas para simulación sin incendio (Ceballos y Galleguillos, 2018)

Altura de canopia	Cobertura	Altura (cm)
Simulación sin incendio	Agropradera	20
	Bosque Nativo	497
	Matorral	272
	Plantación joven	577
	Plantación adulta	813
	Suelo desnudo	0
Simulación con incendio	Agropradera - Severidad alta	0
	Bosque Nativo - Severidad alta	0
	Matorral - Severidad alta	0
	Plantación joven - Severidad alta	0
	Plantación adulta - Severidad alta	0
	Suelo desnudo - Severidad alta	0
	Agropradera - Severidad moderada	0
	Bosque Nativo - Severidad moderada	50
	Matorral - Severidad moderada	30
	Plantación joven - Severidad moderada	60
Plantación adulta - Severidad moderada	80	
Suelo desnudo - Severidad moderada	0	

Fuente: Elaborado en base a Ceballos y Galleguillos, 2018.

Datos diarios de escorrentía y sedimentos suspendidos

De la información obtenida, no se registraron datos disponibles en la estación antes del 15/03/2018, durante todo abril del 2018 y después del 30/09/2018. A nivel mensual, considerando solos los meses con información diaria completa, el mes de julio que presenta el mayor promedio de sedimentos suspendidos ($68,143 \text{ mg lt}^{-1}$), lo cual es un aumento porcentual de aproximadamente el 70% respecto al mes anterior del mismo año ($18,7 \text{ mg lt}^{-1}$). La acentuación de los sedimentos suspendidos en los meses de invierno es debido a la cantidad de tormentas que se generan en ese periodo, sumado a que también si hubo precipitaciones en los meses lluviosos anteriores al peak, es posible que esa agua haya sido almacenada en el suelo, lo cual permite que se genere escorrentía superficial y arrastre de sedimentos a los canales y cauces (Barría, 2011), lo que favorece la erosión del suelo.

El mes en el cual se registró la menor cantidad de sedimentos suspendidos, dentro del periodo de 5 meses con información diaria completa, fue mayo ($12,9 \text{ mg lt}^{-1}$).

En la Figura 12 se presentan los datos diarios de sedimentos suspendidos obtenidos desde el sitio web de Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea, dependiente de la Dirección General de Aguas (DGA), de la estación Quebrada Pasitos.

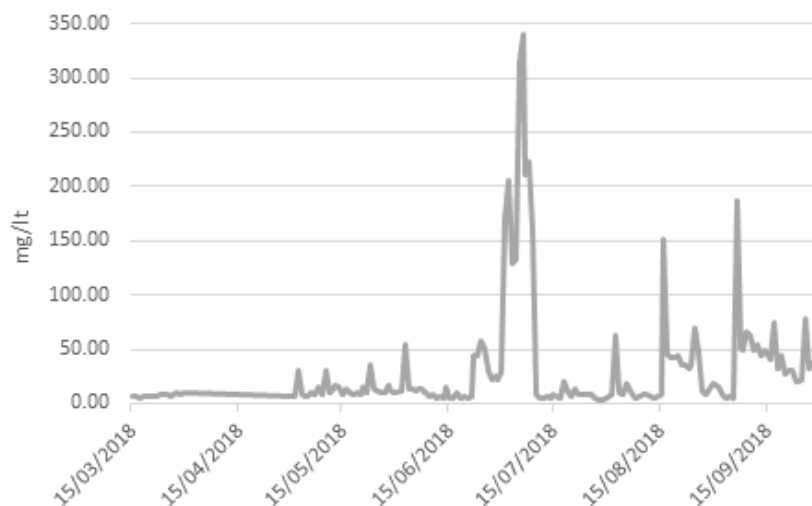


Figura 12. Información diaria de sedimentos suspendidos registrados por estación Quebrada Pasitos entre periodo 15/03/2018 y 30/09/2018, sin considerar abril de ese mismo año.

Respecto a los datos diarios de escorrentía (Figura 13), el régimen de la cuenca es netamente pluvial en que sus mayores caudales ocurren en invierno (Departamento de Estudios y Planificación de los Recursos Hídricos, 2004), en que el mes que presenta mayor caudal en promedio fue julio ($0,02 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) y el mayor peak de la serie de tiempo completa ocurrió el día 7 de ese mes. Nuevamente, no se registraron datos disponibles en la estación antes del 15/03/2018, durante todo abril del 2018 y después del 30/09/2018.

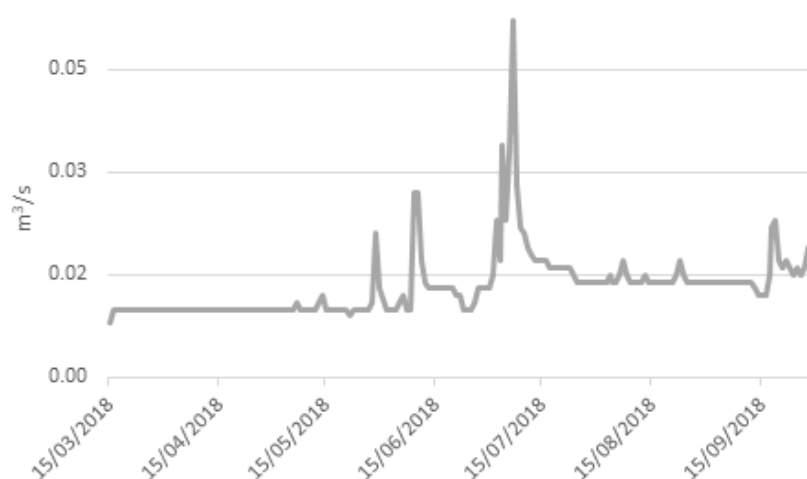


Figura 13. Información diaria de escorrentía registrada por estación Quebrada Pasitos entre periodo 15/03/2018 y 30/09/2018, sin considerar abril de ese mismo año.

Evaluar y cuantificar espacialmente la erosión post incendio utilizando un modelo de procesos en la región de estudio

Funcionamiento de GeoWEPP y productos del modelo

Como resultado de la discretización de la subcuenca, para ambas modelaciones se obtuvieron en total 108 unidades hidrológicas más pequeñas (o subcuenas), 75 laderas y 33 canales en un área de 142,44 ha. Dicha superficie representa el 82% de la extensión total de la subcuenca de Santa Olga (172,52 ha, estimada a partir del DEM LIDAR a 20 m de resolución espacial), quedando un área remanente de 0,30 km² que no fue posible simular por TOPAZ para la discretización.

En la Figura 14 se presenta la distribución espacial de las subcuenas, la red hidrográfica generada por TOPAZ y el punto de descarga de la subcuenca de Santa Olga, para la modelación sin incendio y con la ocurrencia de éste.

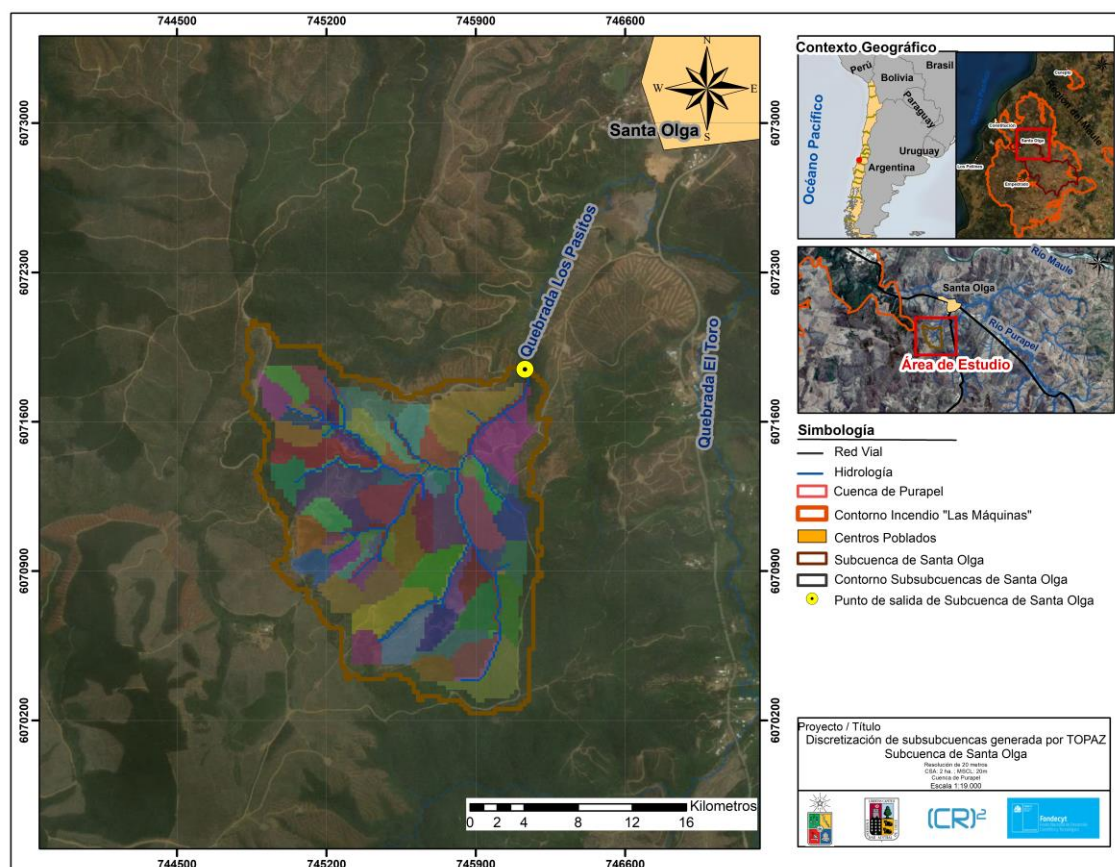


Figura 14. Discretización de subcuenas generada por GeoWEPP para ambos escenarios, Subcuenca de Santa Olga.

La capa raster generada para el escenario sin incendio, junto a la información generada de los archivos de resumen se detalla en la sección de Resultados “Simulación espacio-temporal de erosión para ambos escenarios”, de manera comparativa junto a los resultados obtenidos del escenario con incendio con mejor desempeño estadístico.

Calibración del modelo para escenario con incendio

Los eventos de producción de sedimentos generados por el modelo en este escenario y que coincidieron temporalmente con los registrados observados de producción de sedimentos de la estación Quebrada Pasitos (transformados mediante la Ecuación 7), junto al respectivo valor de R^2 fueron los siguientes:

Cuadro 3. Eventos generados por GeoWEPP y WEPP que coincidieron temporalmente con datos observados de estación Quebrada Pasitos, en modelación con incendio (previo a la calibración).

Fecha	Datos observados (kg día ⁻¹)	Datos modelados (kg día ⁻¹)	Coefficiente de Correlación (R^2)
9/6/2018	17,08	10.855	
10/6/2018	21,70	1.455,10	
6/7/2018	883,30	9.423,50	0,0348
7/7/2018	907,80	3.537,30	
17/9/2018	128,41	1.043,70	

Dado que el valor del estadístico indicó una baja correlación entre los datos modelados versus los observados, se procedió a los siguientes pasos para ajustar los valores generados por el modelo a la realidad.

Análisis de sensibilidad para escenario con incendio

El modelo WEPP tiene parámetros sensibles de suelo que influyen en los cálculos y estimaciones de producción de sedimentos, los cuales son erosionabilidad entre regueros, erosionabilidad en regueros y esfuerzo de corte crítico. Según lo señalado previamente en la metodología, se procedió a la modificación porcentual (± 10 , ± 20 , ± 25 , ± 50 , ± 75 y $+ 100$) de manera manual a los valores “base” de estos 3 parámetros en las 3 series de suelo (series Trehuaco, Alto Colorado y Constitución), obteniendo un total de 33 nuevos archivos de suelo SOL para este escenario con incendio. Finalmente, se procedió al cálculo del estadístico R^2 en cada una de estas 11 situaciones de modificación porcentual. Dado que el periodo de registros de producción de sedimentos de la estación Quebrada Pasitos (6 meses) fue relativamente corto en comparación al periodo de simulación de 9 años (108 meses), en cada una de estas 11 situaciones, de este escenario, se tuvo que distinguir qué datos generados por el modelo coincidían con las fechas con información disponible de producción de sedimentos de la estación.

En la siguiente tabla, se presentan los valores obtenidos del estadístico R^2 para las variaciones porcentuales tanto positivas como negativas de los niveles base de los parámetros sensibles de las series de suelo Trehuaco, Constitución y Alto Colorado.

Cuadro 4. Variación porcentual positiva y negativa de los niveles “base” de parámetros sensibles para 3 series de suelo, con su respectivo R², para modelación con incendio.

	Series de Suelo	Parámetros Sensibles de suelo			Valor Estadístico
		<i>Interrill Erodability</i>	<i>Rill Erodability</i>	<i>Critical Shear</i>	R2
Nivel Base de parámetros sensibles	Trehuaco	3.848.800	0,0069	3,5	0,0348
	Constitución	6.070.540	0,0072	4,03	
	Alto Colorado	4.174.067	0,0071	3,5	
10	Trehuaco	4.233.680	0,00759	3,85	0,9402
	Constitución	6.677.594	0,00792	4,433	
	Alto Colorado	4.591.473,7	0,00781	3,85	
-10	Trehuaco	3.463.920	0,00621	3,15	0,37777
	Constitución	5.463.486	0,00648	3,627	
	Alto Colorado	3.756.660,3	0,00639	3,15	
20	Trehuaco	4.618.560	0,00828	4,2	0,9402
	Constitución	7.284.648	0,1512	4,836	
	Alto Colorado	5.008.880,4	0,00852	4,2	
-20	Trehuaco	3.079.040	0,00552	2,8	0,3357
	Constitución	4.856.432	0,00576	3,224	
	Alto Colorado	3.339.253,6	0,00568	2,8	
25	Trehuaco	4.811.000	0,008625	4,375	0,9402
	Constitución	7.588.175	0,009	5,0375	
	Alto Colorado	5.217.583,75	0,008875	4,375	
-25	Trehuaco	4.811.000	0,008625	4,375	0,22
	Constitución	7.588.175	0,009	5,0375	
	Alto Colorado	5.217.583,75	0,008875	4,375	
50	Trehuaco	5.773.200	0,01035	5,25	0,935
	Constitución	9.105.810	0,0108	6,045	
	Alto Colorado	6.261.100,5	0,01065	5,25	
-50	Trehuaco	1.924.400	0,00345	1,75	0,1003
	Constitución	3.035.270	0,0036	2,015	
	Alto Colorado	2.087.033,5	0,00355	1,75	
75	Trehuaco	6.735.400	0,012075	6,125	0,935
	Constitución	10.623.445	0,0126	7,0525	
	Alto Colorado	6.261.100,5	0,012425	6,125	
-75	Trehuaco	962.200	0,001725	0,875	0,084
	Constitución	1.517.635	0,0018	1,0075	

	Alto Colorado	1.043.516,75	0,001775	0,875	
	Trehuaco	7.697.600	0,0138	7	
100	Constitución	12.141.080	0,0144	8,06	0,9314
	Alto Colorado	8.348.134	0,0142	7	

De la tabla anterior, se observa que la variación porcentual positiva de los parámetros sensibles de suelo, desde los niveles “base” hasta +25 obtuvo el mayor valor del estadístico $R^2 = 0,9402$, lo que implica una buena correlación entre los datos modelados por WEPP y los observados por la estación en la boca de salida de la subcuenca de Santa Olga. En el Apéndice 17.a, 17.b y 17.c se detallan los archivos de suelo WEPP con los parámetros de este componente que generaron este mejor valor del estadístico.

Las variaciones porcentuales +50, +75 y +100 también presentaron R^2 significativos, pero varían levemente en un 0,02 respecto a los mejores valores del estadístico obtenidos. Con relación a las variaciones porcentuales negativas desde los niveles “base” hasta -20, se obtuvo un leve aumento de 0,09 del estadístico, y a medida que se van disminuyendo las variaciones hasta el valor extremo mínimo propuesto, el valor de R^2 sigue descendiendo hasta 0,084.

En la variación porcentual con mejor R^2 de este escenario (0,9402) se obtuvieron un total de 91 eventos generados por WEPP, para los 9 años de modelación; el año 2014 tuvo la mayor cantidad de eventos (23); el año 2013 presentó la menor cantidad de eventos (1) y la cantidad de eventos que ocurrieron después de la fecha de finalización del incendio “Las Máquinas” fueron 24. En este escenario de modelación con incendio, la cantidad de eventos generados por el modelo difiere en algunos periodos, por ejemplo, al comparar el año con mayor cantidad de eventos (2014) y el año con menor ocurrencia de estos (2013). Esta disparidad se debe podría deber principalmente a los montos de precipitación y ocurrencia de eventos de alta intensidad de lluvia, ya que estas situaciones tendrían más probabilidad de generar más escorrentía, lo que a su vez aumentan las tasas de erosión y de producción de sedimentos desde las laderas (Pruski y Nearing, 2002b). Tal como se observa en el Apéndice 16.c, los años 2012 y 2013 fueron los que presentaron menos registros de precipitación en comparación al resto de los años.

Evaluación del desempeño del modelo

El valor de $R^2 = 0,9402$ obtenido en esta presente investigación, es similar en cuanto a buena correlación entre datos modelados y observados, al obtenido por Larsen y McDonald (2017), quienes utilizaron WEPP y utilizaron mediciones de producción de sedimentos mensual en el oeste y suroeste de los Estados Unidos en sectores de cosecha forestal e incendios forestales, en que el valor del estadístico obtenido por estos investigadores fue 0,64.

El resultado del estadístico RECM para este escenario fue de 0,16 ton, valor que se encuentra cercano a cero lo que indica un buen ajuste de los datos modelados por WEPP, los cuales tendrían poca diferencia con los datos observados por la estación. El resultado de este estadístico en este escenario con incendio no difiere en grandes cantidades al

obtenido por Covert (2003) quien utilizó GeoWEPP en una modelación de 4 años con eventos mensuales, obteniendo un RECM de 0,02 ton, en una cuenca pequeña de Idaho, Estados Unidos (2 ha de extensión), con actividades de manejo y corta de *Pinus ponderosa* y la ocurrencia de un incendio de alta severidad en 1993.

El valor obtenido del estadístico Sesgo Porcentual fue de 63%, lo que significa que la exactitud de los datos generados por WEPP en comparación a los observados fue regular. La erosión en laderas estimada por WEPP en áreas con ocurrencia de incendio tiende a ser sobrestimada, ya que en sectores de alta severidad la cobertura de suelo desnudo podría ser variable (Markman, 2004) y no siempre puede tener espesor 0 cm, tal como se asumió para este escenario; también, el espesor de la cobertura de suelo desnudo en los sectores con severidad moderada (criterio de 5 cm para esta modelación) podría no ser representativo, e incluso algunas zonas podrían tener hasta un 40% más de espesor después de un año ocurrido un incendio (USDA, 2005). Este tipo de supuestos en los datos del modelo, e incluso utilizando información de entrada precisa, podría hacer que las modelaciones de WEPP tengan errores porcentuales absolutos medios de aproximadamente un 50% (Elliot et al., 2000).

En el Cuadro 5 se especifican los 5 eventos generados por WEPP para la situación con mejor R^2 obtenido y que coincidieron con los datos observados por la estación. Además, en la Figura 15 se expone el grafico que muestra la línea de tendencia entre los datos observados y modelados.

Cuadro 5. Eventos generados por GeoWEPP y WEPP que coincidieron temporalmente con datos observados de estación Quebrada Pasitos, en modelación con incendio.

Fecha	Datos observados (kg día⁻¹)	Datos modelados (kg día⁻¹)
9/6/2018	17,08	4,60
10/6/2018	21,70	0
6/7/2018	883,30	1.162,70
7/7/2018	907,80	836,20
17/9/2018	128,41	0,20

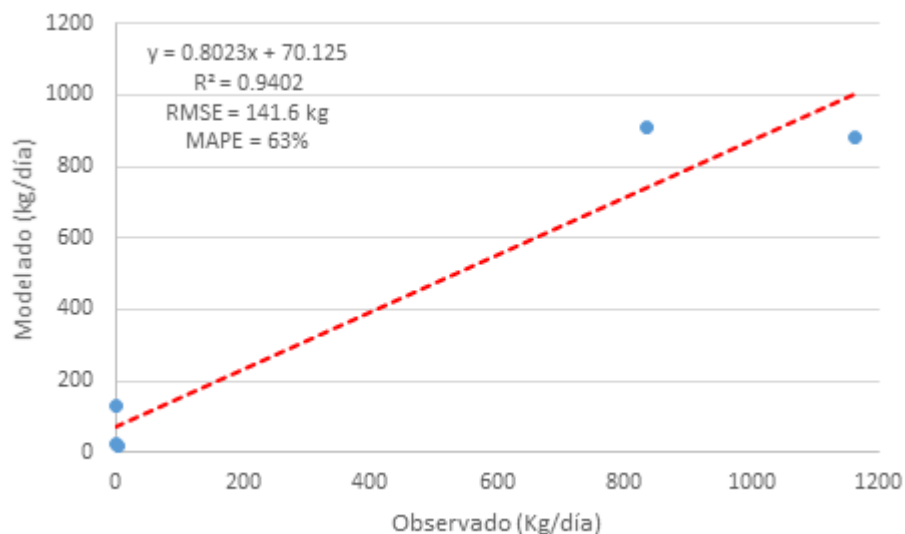


Figura 15. Gráfico de correlación estadística entre datos de producción de sedimentos modelados por WEPP y GeoWEPP versus datos observados de estación Quebrada Pasitos, modelación sin incendio.

Los resultados obtenidos de los estadísticos RECM y Sesgo Porcentual, en este escenario, acusan que sus valores se encuentran en rangos medianamente aceptables estadísticamente, y que por lo tanto existirían ciertos errores en el proceso de la modelación asociados principalmente a los datos de entrada utilizados y a los datos usados para la validación. Por ejemplo, las limitaciones de TOPAZ de generar una red hidrográfica acorde al área de estudio, la incertidumbre de que no exista una estación con información climática junto a los montos de precipitación e intensidad de lluvia dentro de la subcuenca (Sevruck, 1986); no contar con mediciones de terreno de los parámetros sensibles de vegetación y suelo; parametrización con información específica de los manejos realizados y también no poder contar con datos observados suficientes de producción de sedimentos son fuentes potenciales que generan errores en la modelación y valores no aceptables estadísticamente (Pietraszek, 2006).

Simulación espacio-temporal de erosión para ambos escenarios

En base a los resultados de la capa raster generada por GeoWEPP para la modelación sin incendio, la producción de sedimentos oscila entre 0 y 4 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En la simulación sin la ocurrencia de incendio de un área total de 1,42 km^2 de subcuencas discretizadas con TOPAZ, un 87% de esta superficie presenta niveles de erosión menores a 0,25 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, la cual se hallan principalmente localizadas en la parte media y baja de la subcuenca (respecto al punto de salida de ésta), y más del 85% de esta categoría de erosión presenta cobertura de suelo desnudo y plantación industrial adulta. El 3% de la superficie de la subsubcuencas presenta niveles de erosión mayores a 0,25 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y menores a 0,5 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El 5% del área de las subcuencas discretizadas tiene tasas de erosión entre 2 y 3 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. El 5% restante de la superficie de las subsubcuencas presenta categoría de erosión mayores a 3 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y menores a 4 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Se destaca que en los niveles de erosión mayores a 0,25 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y menores a 4 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, se distribuyen en la parte alta de la subcuenca, y más del 95% de sus superficies

se caracterizan por la presencia de cobertura de suelo plantación industrial joven y suelo desnudo.

Según estos resultados expuestos en el párrafo anterior, existe dominancia de las categorías de erosión en la cobertura plantación industrial joven y adulta. Según la investigación realizada por Banfield et al. (2018) en el secano costero de la Región del Ñuble, las plantaciones exóticas jóvenes (árboles de 6 años) tienen más tendencia de presentar erosión hídrica severa respecto a una cobertura de bosque nativo secundario, en que algunos signos significativos de esta condición, vistos en terreno por los autores, fueron acumulación de grava en la superficie del suelo, grietas secas, pedestales, surcos pequeños y capas del suelo endurecidas en condiciones climáticas secas. También, como históricamente las zonas de cobertura de plantación forestal del secano costero interior han presentado un aumento de sus superficies desde mediados de la década de los años 70 (Pizarro et al., 2006), los manejos continuos de corta y plantación con maquinaria pesada genera compactación de los caminos forestales, senderos y canchas de acopio de madera y a lo largo de las hileras de los árboles exóticos (Gayoso e Iroumé, 1991), lo que conduce a menores tasas de infiltración, aumento de escorrentía superficial y por lo tanto mayor erosión hídrica del suelo (Ellies, 1995; Fernández et al., 2004).

En la modelación considerando la ocurrencia del incendio “Las Máquinas”, detallado en la Figura 16, se muestra que la producción de sedimentos oscila entre 0 y estimaciones mayores a $4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Un 67% de la superficie de las subcuencas discretizadas por TOPAZ, presenta niveles de erosión entre 0 y menores a $1 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en la parte baja y media de la subcuenca de Santa Olga; un 5% de la superficie de las subcuencas discretizadas presentan categorías de erosión que son mayores o igual a $1 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y menores a $3 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, zonas ubicadas principalmente en la parte alta y media de la subcuenca de Santa Olga; y el 28% de la superficie discretizada, posee categorías de erosión mayores o iguales a $3 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y mayores a $4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, presentes en la parte alta noroeste y centro de la subcuenca. En todas estas categorías de erosión existió predominancia de cobertura plantación forestal (joven y adulta) afectada por alta severidad de incendio.

Según lo detallado en el párrafo anterior, existe una mayor cantidad de superficie de la subcuenca que presenta erosión en coberturas industriales pero que fueron afectadas por alta severidad. La hidrofobicidad, o repelencia al agua, es una propiedad física de los suelos que puede ser alterada debido a los incendios, y se crea debido a la exposición de acumulaciones de materia orgánica y humus en la superficie del suelo a altas temperaturas (DeBano, 1981). La investigación realizada por García-Chevesich et al. (2010) concluyó que la hidrofobicidad de plantaciones de *Pinus radiata* en Yungay (Región del Ñuble) después de un incendio, ocurre en rodales adultos (con capas de 10 mm. de profundidad) y en rodales jóvenes (capas de 5 mm. de profundidad) versus sitios no quemados con las mismas características de cobertura y suelo que las anteriores. Considerando lo anterior, un aumento de la hidrofobicidad en coberturas forestales exóticas después de un incendio, generará menores tasas de infiltración de las precipitaciones, lo que a su vez generará más escorrentía superficial, aumento de producción de sedimentos en laderas y a nivel del suelo, y un incremento en las tasas de sedimentación y pérdida de suelo (Larsen et al., 2009).

En los resultados obtenidos de ambas modelaciones, se destaca que las mayores tasas de erosión, mayores a $0,5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, ocurrían en suelos de tipo Alfisol (series de suelo Alto Colorado y Constitución). Los resultados de una investigación realizada por Brunel y Seguel (2011) en el secano interior de la Región del Maule, indicaron que si los suelos Alfisoles son afectados por procesos de erosión hídrica, con la consecuente pérdida del suelo superficial, tienden a presentar niveles mas bajos de materia orgánica y micronutrientes, tales como Boro, Zinc y Magnesio, en comparación a un suelo no afectado por este proceso. A medida que disminuye el contenido de materia orgánica el suelo debido a procesos de erosión hídrica, éste estará mas expuesto al impacto de las gotas de lluvia de las precipitaciones, la energía de la velocidad de estas separará las partículas individuales del suelo desde sus horizontes superficiales (Bot y Benites, 2005) y estas serán arrastradas por el flujo superficial de agua hacia quebradas y canales generando sedimentación (Jankauskas et al., 2007). La disminución de los micronutrientes Boro, Zinc y Magnesio en el suelo, causado por procesos erosivos, es perjudicial para la formación de semillas, crecimiento óptimo y rendimientos máximos de la vegetación natural (Mahler y Westermann, 2001).

Respecto a las pendientes y a los resultados encontrados en ambas modelaciones, las mayores tasas de erosión (mayores a $0,5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) ocurrían en pendientes promedio y superiores a 30%. Según la Guía de Índice de Fragilidad de Suelos Forestales realizada por CONAF y utilizando los criterios de Schalatter et al. (2003), aquellas pendientes que presentan porcentajes en rangos desde 30% hasta 58% son clasificadas como muy pronunciadas, por lo cual son suelos que pueden presentar algún grado de erosión moderada a severa, erosión superficial, compactación del suelo y exposición del subsuelo debido al empleo de maquinaria forestal, condicionado por la intensidad de las precipitaciones. Según la bibliografía, existe una relación intrínseca entre las tasas de desprendimiento de sedimentos según el gradiente de pendiente; por ejemplo, en el estudio de Zhang et al. (2008), confirmó un aumento de las tasas de desprendimiento de este componente del suelo cuando el gradiente de pendiente era de aproximadamente un 45%, en donde esta correlación positiva quedó bien representada mediante una función lineal. Otros autores, como Chaplot y Le Bissonais (2000) concluyeron que la pérdida de suelo aumenta significativamente con el aumento de la inclinación de la pendiente, para intensidades de lluvia altas.

En la Figura 16 se presenta la información espacial de las simulaciones para el escenario sin ocurrencia de incendio y con ocurrencia de incendio. La figura muestra las tasas de producción de sedimentos y erosión en cada ladera de la subcuenca, a partir de un promedio de 9 años de modelación.

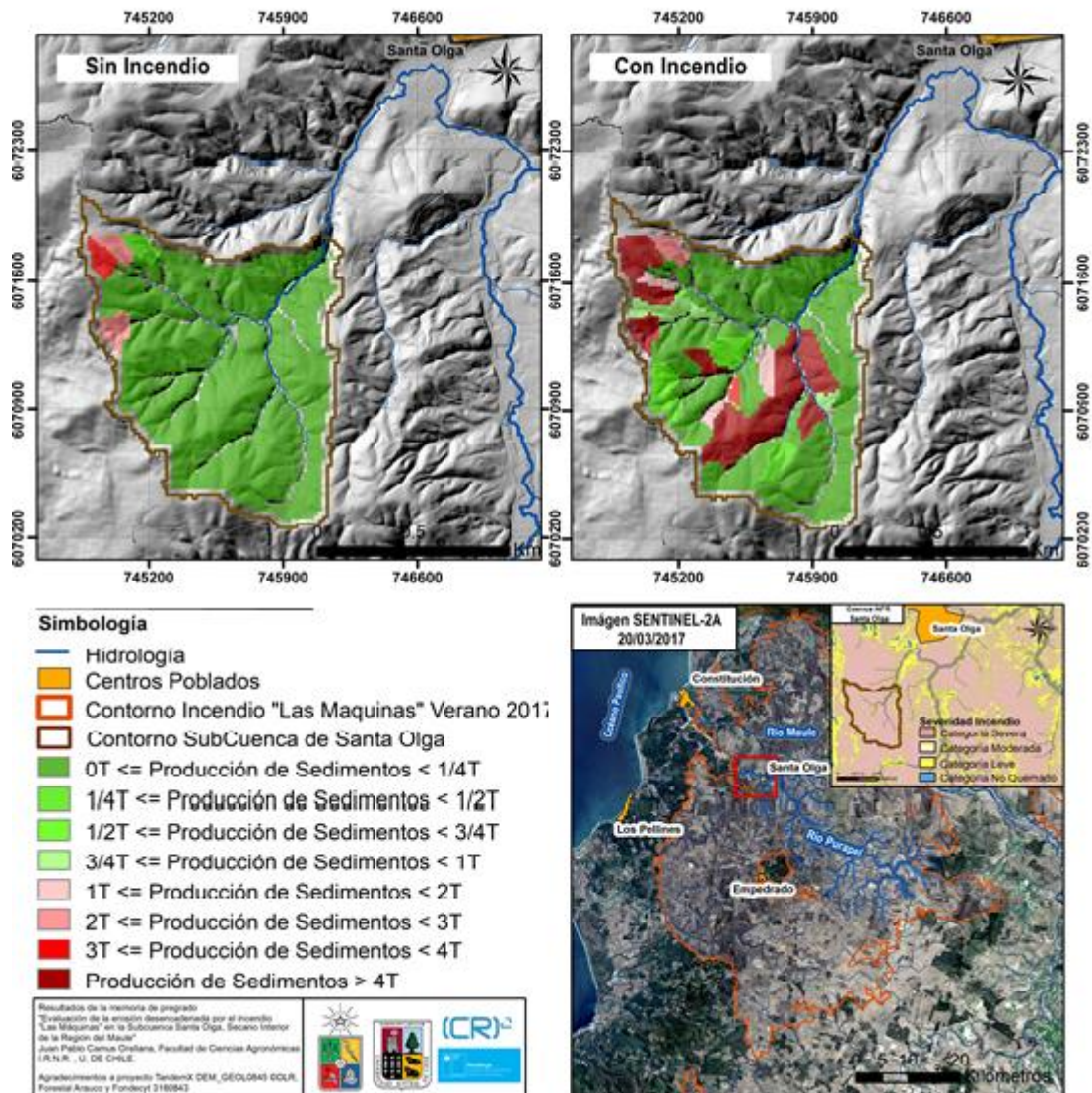


Figura 16. Estimación de producción de sedimentos mediante GeoWEPP y WEPP, en escenario sin incendio y con incendio. Subcuenca de Santa Olga.

El cambio de las tasas de erosión en una situación sin incendio versus la ocurrencia del incendio, implica que del total de superficie de las subcuencas que presentan categoría de erosión desde 0 hasta valores menores a $0,5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ disminuye desde un 88% a un 60%, en sectores de pendiente de inclinación muy pronunciada y suelos de tipo Inceptisol (serie de suelo Treahuaco). Respecto a la categorías de erosión que se encuentran entre valores mayores e iguales a $0,5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ hasta valores menores de $2 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, no se registró en el escenario sin incendio pero si fue posible modelar en el escenario con incendio, en donde la extensión abarcada es de un 10% de las subcuencas discretizadas, en sectores de pendiente muy pronunciada y suelos de tipo Alfisol e Inceptisol. Respecto a los niveles de erosión que se encuentran en valores mayores e igual a $2 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y menores a $4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, su superficie disminuyó desde un 4.5% (modelación sin incendio) a un 2% (modelación con incendio) en zonas de pendiente pronunciada y dominancia de suelo Inceptisol. Finalmente, se debe

mencionar que aquellos niveles de erosión que son mayores a $4 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ solamente se exhibieron en la modelación con ocurrencia de incendio.

Respecto a aquellas laderas discretizadas por TOPAZ en que existían sobre $5 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de pérdida de suelo y producción de sedimentos (ton año^{-1}), en la modelación sin incendio, se destacan las siguientes: la ladera 64 fue en la cual hubo mas pérdida de suelo en todo el periodo de modelación ($6,3 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), en una subcuenca de área pequeña de $0,02 \text{ km}^2$ ubicada en el flanco noroeste del área de modelación con predominancia de suelo desnudo y plantación forestal adulta; y las laderas 55 y 67 aportan con 5,2 y 6,1 $\text{ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de producción de sedimentos, en subcuencas pequeñas de $0,03$ y $0,02 \text{ km}^2$ de extensión en la parte alta occidental de la subcuenca, con un 80% de superficie de cobertura suelo desnudo. Éstas 3 laderas en esta modelación, se encuentran en el inicio o cabecera de las cuencas hidrográficas que fueron discretizadas mediante TOPAZ.

Cuadro 6. Pérdida de suelo y producción de sedimentos de laderas, generadas por GeoWEPP, en escenario sin incendio.

Laderas	Producción de sedimentos (ton año⁻¹)
55	5,20
64	6,33
67	6,10

En relación a las laderas generadas por GeoWEPP en el escenario con incendio, y que presentaron sobre $25 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de pérdida de suelo y producción de sedimentos, se destacaron las siguientes: la ladera 40, que se encuentra ubicada en una subcuenca pequeña de $0,024 \text{ km}^2$ en el sector suroeste del área de modelación, es la que más aporte de sedimentos realizó a los cuerpos de agua (mas de $38 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), en que aproximadamente el 100% de su superficie era de cobertura suelo desnudo afectado por alta severidad; las laderas 21 y 24, ubicadas en subcuencas vecinas de $0,03$ y $0,05 \text{ km}^2$ respectivamente, aportaron en conjunto mas de $60 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, se ubicaban en la parte central y sur de la subcuenca de Santa Olga respectivamente, y en el 80% de estas áreas existió suelo desnudo con categoría de alta severidad; finalmente, la ladera 9 aportó individualmente $39 \text{ ton ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, se ubicó en una subcuenca de $0,05 \text{ km}^2$ en la parte central del área de modelación, con un 100% de superficie de suelo desnudo. Todas las laderas mencionadas anteriormente eran colindantes a las redes hidrográficas discretizadas por TOPAZ.

Cuadro 7. Pérdida de suelo y producción de sedimentos de laderas, generadas por GeoWEPP, en escenario con incendio.

Laderas	Producción de sedimentos (ton año⁻¹)
9	38,45
21	31,17
24	37,90
40	54,95

Los archivos de resúmenes de ambas modelaciones, detallaron también información de cada una de las laderas discretizadas por TOPAZ respecto a valores de volúmenes de escorrentía (m^3), volumen de flujo subsuperficial (m^3), pérdida de suelo (kg), producción de sedimentos (kg) y depositación de sedimentos (kg) en cada una de éstas. Respecto a los valores de estas variables que fueron obtenidos mediante la modelación, en el escenario sin incendio el volumen medio anual de escorrentía por ladera ($771 m^3$) enmascara diferencias notorias entre algunos valores, desde menos de $20 m^3$ hasta más de $3.500 m^3$ en las laderas con valores más extremos de esta variable, en que la desviación estándar fue de $709 m^3$. Respecto a la contribución de sedimentos, el valor promedio por ladera fue de $255 kg año^{-1}$ y algunas de estas presentan valores extremos de más de $6.300 kg año^{-1}$ de aporte de sedimentos y otras que aportan pequeñas cantidades, menores a $30 kg año^{-1}$, con una desviación estándar de $1.163 kg año^{-1}$.

En relación al escenario con ocurrencia de incendio, el volumen medio anual de escorrentía fue de $763 m^3$ y su desviación estándar fue de $701 m^3$. También, hubo más laderas que realizaron aportes de sedimentos (45 de un total de 75) en que la contribución media anual fue de $3.733 kg año^{-1}$ y la desviación estándar fue de $9.912 kg año^{-1}$, por lo que existe dispersión muy significativa entre los resultados obtenidos en este escenario, desde valores bajos a $0.10 kg año^{-1}$ hasta valores extremos superiores a $54.000 kg año^{-1}$. Para más detalle de las otras variables no discutidas, en el Apéndice 18 y Apéndice 19 se detalla el archivo de resumen relacionado a las laderas, para ambos escenarios.

Respecto a los canales en la modelación sin incendio se generaron 33 de éstos, en que el valor promedio de producción de sedimentos fue de $30.527 kg año^{-1}$, en que algunos de éstos presentaron valores extremos, por ejemplo $197.800 kg año^{-1}$ y otros valores mínimos, por ejemplo $100 kg año^{-1}$, con una desviación estándar de $46.929 kg año^{-1}$.

En relación a los canales generados en la modelación con incendio (con mejor ajuste a los datos observados), el valor promedio de producción de sedimentos fue mayor que en el primer escenario, $69.181 kg día^{-1}$, con valores máximos de $413.600 kg año^{-1}$ y mínimos de $400 kg año^{-1}$, con una desviación estándar mayor con respecto al primer escenario, $101.459 kg año^{-1}$. En el Apéndice 20 y Apéndice 21 se detallan los valores de los canales simulados por WEPP y GeoWEPP para ambos escenarios de modelación.

Por último, en la Cuadro 8 se presentan la pérdida de suelo en laderas, canales y descargas de sedimentos (en unidades de $ton ha^{-1} año^{-1}$), promedio anual de entrega de sedimentos

por unidades de área de la cuenca (unidades de $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y la tasa de entrega de sedimentos por unidades de área de la cuenca, variables que son detalladas en los archivos de resúmenes obtenidos después que GeoWEPP realizó las modelaciones

Cuadro 8. Información resumida de las variables de salida de la modelación sin incendio y con incendio, utilizando WEPP y GeoWEPP.

Variables	Modelación WEPP Sin Incendio	Modelación WEPP Con Incendio
Pérdida de suelo media anual en laderas	19,2 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$	280 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$
Pérdida de suelo media anual en canales	285,6 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$	612,7 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$
Descarga de sedimento media anual desde el punto de salida de la subcuenca	197,8 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$	413,6 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$
Producción de sedimentos media anual por unidad de área de la subcuenca	1,5 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$	3,1 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$
Tasa de entrega de sedimentos por unidad de área de la subcuenca	0,649	0,463

Como se mencionó anteriormente, son 3 los parámetros sensibles de suelos que están relacionados a la producción de sedimentos en el modelo WEPP: erodabilidad entre regueros, erodabilidad en regueros y esfuerzo de corte crítico del suelo. De las 3 variables anteriores, la erodabilidad entre regueros es el proceso erosivo más sensible ya que solo la variación porcentual positiva de este parámetro dominante genera mejores estimaciones de producción de sedimentos en cuencas forestales (Saghafian et al., 2014). Este proceso erosivo ocurre cuando la producción de sedimentos se concentra en los canales de flujo y los sedimentos son transportados fuera de la ladera por los flujos en los regueros (Foster et al., 1995). Al analizar los datos de resumen del Cuadro 8, en ambos escenarios en el periodo de modelación de 9 años, efectivamente la producción de sedimentos media anual que ocurre en los canales es superior a la producción de sedimentos media anual que ocurre en las laderas, ya que los flujos concentrados que proceden y fluyen por éstas son efectivamente transportados hacia los canales.

Entendiendo que la producción o rendimiento de sedimentos es un concepto que se utiliza para cuantificar la erosión de los suelos (Jones et al., 1993), el valor obtenido en la presente investigación respecto a la producción de sedimentos por unidad de área en la subcuenca de Santa Olga para el escenario con incendio, fue de 3,1 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ y es un valor similar y consistente, aunque no igual, a los obtenidos por Concha (2004), quién señala valores de erosión de 4,0 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ para una situación de daño leve generado por quemas en rodales naturales y de 5,9 $\text{ton ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ para una situación de daño severo de incendio en parcelas con cobertura de suelo desnudo, cuya metodología se basó en parcelas experimentales y estimaciones de erosión mediante el modelo USLE en vegetación natural dañada por incendios forestales en la Reserva Nacional Malleco, Región de la Araucanía.

De acuerdo a la bibliografía, ha sido demostrado que la producción de sedimentos después de un incendio aumenta al menos dos órdenes de magnitud en comparación a un

escenario con incendio, debido a cuando ocurren estos desastres se genera más erosión en laderas, dado que se pierde sustrato del suelo y queda expuesto a agentes erosivos como las lluvias intensas (Wohlgemuth, 2006), aumenta la hidrofobicidad y la escorrentía con la consecuente producción de sedimentos desde sitios empinados y laderas con suelo desnudo hacia los canales, quebradas y cauces (US Forest Service, 2000). Sin embargo, en esta investigación, los valores obtenidos de media anual de producción de sedimentos por unidad de área con incendio fueron el doble que la modelación sin incendio y aumentaron sólo 1 orden de magnitud.

Lo anterior, puede deberse a una serie de limitaciones de obtención de información de datos de entrada y que repercutió en las estimaciones de erosión; por ejemplo la falta de una estación climatológica en la subcuenca de Santa Olga, que hubiese facilitado la creación de un archivo climático que represente al área de modelación, la obtención de todos los parámetros sensibles de suelo y vegetación mediante datos de terreno y fechas específicas de los manejos de vegetación forestal realizados en los 9 años de modelación.

CONCLUSIONES

El modelo basado en procesos junto a su interfaz geoespacial desarrollada en entorno ArcGIS, GeoWEPP, demostró ser una buena herramienta para la estimación diaria de producción de sedimentos y pérdida de suelos en laderas y canales, de una forma espacialmente distribuida en una pequeña subcuenca del secano costero interior de la Región del Maule, llamada Santa Olga.

La representación cartográfica de la erosión, utilizando datos de entrada geoespaciales de topografía, suelos, cobertura de suelo, severidad de incendio, junto a información de terreno de suelos y climatológica, considerando un periodo de modelación de 9 años en base al método *Watershed* de WEPP permitió identificar áreas críticas de la subcuenca donde hubo más pérdida de suelo y producción de sedimentos en la subcuenca estudiada. Las siguientes conclusiones fueron extraídas de la presente investigación:

- 1) En el escenario sin ocurrencia de incendio, las áreas con mayor riesgo de erosión (tasas entre 2 y 4 ton ha⁻¹ año⁻¹) se ubicaban en el flanco occidental y cotas de elevación altas de la subcuenca; mientras que, en el escenario con incendio, las áreas con mayor riesgo erosivo (tasas mayores a 1 y mayores a 4 ton ha⁻¹ año⁻¹) se encontraban en las zonas altas y medias de la subcuenca. En estas zonas de mayor pérdida de suelo y producción de sedimentos, en ambos escenarios, hubo dominancia de coberturas de suelo desnudo y plantación forestal industrial, suelos Alfisoles y pendientes pronunciadas y con alta inclinación (superiores a 30%)
- 2) Las laderas que generaron sobre 5 ton ha⁻¹ año⁻¹ para la modelación sin incendio y sobre 25 ton ha⁻¹ año⁻¹ para el escenario con incendio, se encuentran en la cabecera y colindantes, respectivamente, a los canales discretizados por TOPAZ.
- 3) El análisis de sensibilidad del escenario con incendio exhibió que las variaciones porcentuales positiva generaron los valores más altos de correlación, concordancia y exactitud entre los datos modelados y los observados.
- 4) De los tres parámetros sensibles de suelo -erodabilidad en regueros, esfuerzo de corte crítico y erodabilidad entre regueros – fue este último el más predominante dado que la producción de sedimentos media anual que ocurre en canales supera con creces a la ocurrida en laderas, en ambos escenarios de modelación.
- 5) Los resultados de producción de sedimentos media anual por unidad de área de la subcuenca del escenario con incendio, solamente aumentó 1 orden de magnitud con respecto al escenario sin incendio, debido posiblemente a la falta de datos climatológicos dentro de la subcuenca, junto a la disponibilidad de información de parámetros sensibles de suelo y vegetación dentro del periodo a modelar

En futuros usos y escenarios de utilización de WEPP y GeoWEPP en cuencas hidrográficas, se hace necesaria la recopilación de amplias, detalladas y continuas series de datos geoespaciales y de terreno de suelo y vegetación, dentro de las áreas a modelar, para obtener información modelada acorde con la realidad. La utilización correcta y exitosa del modelo, también permitirá a los tomadores de decisiones en las cuencas hidrográficas identificar y priorizar aquellas áreas con más riesgo de erosión, e implementar precauciones para prevenir o minimizar la producción de sedimentos.

BIBLIOGRAFÍA

Abarzúa, A. 2017. Evaluación de la erodabilidad de algunos suelos de Chile de uso actual forestal mediante índices basados en propiedades del suelo de fácil medición. Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Chile. 99h.

AGROMET (Red Agrometeorológica de INIA. 2019. Consulta. [en línea]. Santiago, Chile: INIA. Recuperado en: <<http://agromet.inia.cl/estaciones.php>>. Consultado el: 15 de abril de 2018.

Alberts E.; M. Nearing; M. Weltz; L. Risse; F. Pierson; X. Zhang; J. Laflen y J. Simanton. 1995. Soil component. USDA. [en línea]. Washington D. C., Estados Unidos: USDA. 47p. Recuperado en: <<https://www.ars.usda.gov/ARUserFiles/50201000/WEPP/chap7.pdf>>. Consultado el: 12 de diciembre de 2019.

Álvarez-Garretón C.; P. Mendoza; J.P. Boiser; N. Addor; M. Galleguillos; M. Zambrano-Bigiarini; A. Lara; C. Puelma; G. Cortés; R. Garreaud; J. McPhee y A. Ayala. 2018. The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrology and Earth System Sciences*, In review.

Amaru K. y N. Hotta, 2018. Application of GeoWEPP for evaluating sediment yield in a mountain area: Agatsuma watershed, Japan. *International Journal of erosion control engineering*, 11(1): 45-59.

Amore E.; C. Modica; M. Nearing y V. Santoro. 2004. Scale effect in USLE and WEPP application for soil erosion computation from three Sicilian basins. *Journal of Hydrology*, 293(4): 100-114.

Arias M. 2017. Informe de daño potencial del mega incendio. INDAP (Instituto de Desarrollo Agropecuario). [en línea]. Santiago, Chile: Agro Seguros Ministerio de Agricultura. 3 p. Recuperado en: <<https://www.indap.gob.cl/docs/default-source/default-document-library/-ver-minuta-al-01-03-2017.pdf?sfvrsn=0>>. Consultado el: 20 de octubre de 2017.

Arnold G.; D. Moriasi; P. Gassman; K. Abbaspour; M. White; R. Srinivasan; C. Santhi; R. Harmel; A. van Griensvan; M. Van Liew; N. Kannan y M. Jha. 2012. SWAR: Model use, calibration and validation. *Transactions of ASABE*, 55(4): 1491-1508

Aronson J.; A. Del Pozo; C. Ovalle; J. Avendaño; A. Lavin y M. Etienne. 1998. Land use changes and conflicts in Central Chile (cap. 9, pp. 155-168). En: Rundel W.; F. Jaksin y G. Montenegro. Landscape disturbance and biodiversity in Mediterranean-type Ecosystems. New York, Estados Unidos: Springer – Verlag Berlin Heidelberg. 13 p.

Arrau Ingeniería. 2012. Estudio de prefactibilidad proyecto de construcción de embalse de riego Huedque, comuna de Cauquenes. Arrau Ingeniería E.I.R.L. [en línea]. Santiago, Chile: Arrau Ingeniería E.I.R.L. 411P. Recuperado en: <<http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/10142/CNR-0368-V4.pdf?sequence=6&isAllowed=y>>. Consultado el: 19 de agosto de 2018.

Ascough J.; M. Nearing; D. Flanagan y B. Engel. 2013. Sensitivity and first-order Monte Carlo uncertainty analysis of the WEPP Hillslope Erosion model. *Transactions of the ASABE*, 56(2): 437-452.

Bagnold R. 1997. Bedload transport in natural rivers. *Water Resources Research*, 13: 303-312.

Banfield C.; A. Braun; R. Barra; A. Castillo y J. Vogt. 2018. Erosion proxies in an exotic tree plantation question the appropriate land use in Central Chile. *Catena*, (161): 77-84.

Barría, R. 2011. Variación temporal del caudal y transporte de sedimentos en una cuenca con suelo granítico en Cordillera de la Costa en la Región del Bío-Bío. Memoria de pregrado para optar al Título Profesional de Ingeniero Civil en Obras Civiles. Valdivia, Chile: Escuela de Ingeniería Civil en Obras Civiles, Universidad Austral de Chile. 87h.

Batjes, N. 2005. SOTER-based soil parameter estimates for Latin America and the Caribbean (Versión 1.0). World Soil Information. Wageningen, Países Bajos: World Soil Information. 32p.

Batjes N.; K. Dijkshoorn; V. van Engelen; G. Fischer; A. Jones; L. Montanarella; M. Petri; S. Prieler; E. Teixeira; D. Wiberg y X. Shi. 2008. Harmonized World Soil Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO. [en línea]. Laxenburg, Austria: FAO. 42p. Recuperado en: <http://www.fao.org/uploads/media/Harm-World-Soil-DBv7cv_1.pdf>. Consultado el: 15 de noviembre de 2018.

Bonilla C.; P. Pastén; G. Pizarro; V. González; M. Rivera; A. Carkovic y R. Céspedes. 2013. Evaluación cuantitativa del efecto de la intervención del bosque nativo en la pérdida de suelos de la cuenca del río Serrano. Corporación Nacional Forestal. Santiago, Chile: CONAF. 151p.

Bonilla C.; J. Reyes y A. Magri. 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): 159-169

Bot A. y J. Benites. 2005. The importance of soil organic matter. Chapter 5. Creating drought-resistant soil. Food and Agriculture Organization. [en línea]. Roma, Italia: FAO. 7p. Recuperado en: <<http://www.fao.org/3/a0100e/a0100e08.htm>>. Consultado el 13 de enero de 2019.

Bouguerra, H.; K. Khanchoul; A. Bouanani y O. Dedous. 2017. Mapping erosion prone areas in the Bouhandane watershed (Algeria) using the Revised Universal Soil Loss Equation through GIS. *Journal of Water and Land Development*, 32: 13-23.

Brunel, N. y O. Seguel. 2011. Efectos de la erosión en las propiedades del suelo. *Agro Sur*, 39(1): 1-12.

Cade-Idepe Consultores. 2004, dic. Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad. Cade-Idepe Consultores. Santiago, Chile: Dirección General de Aguas. 152p.

Calvo-Cases A.; C. Boix-Fayos; E. Aranau-Rosalen y M. Roxo. 2011. Cárcavas y regueros generados en suelos sódicos Petrer (Alicante, España). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 37(1): 25-40.

Cannon, H.; J. Gartner; M. Rupert; J. Michael; A. Rea y C. Parrett. 2010. Predicting the probability and volume of post wildfire debris flows in the intermountain western United States. *Geological Society of America Bulletin*, 122(1): 127-144.

Castellou M.; A. Rodrigo; J. Almodóvar; F. Martins; P. Mayoral; L. Alfonso y G. Basile. 2017, febrero. Informe técnico de la situación de incendios forestales en Chile entre enero-febrero 2017. European Union Civil Protection Mechanism. [en línea]. Madrid, España: European Union Civil Protection Mechanism. 11p. Recuperado en: <<https://www.camara.cl/pdf.aspx?prmID=98604&prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION>>. Consultado el: 17 de noviembre de 2018.

Castillo, I. y Galleguillos, M. 2018. Proyecto integrativo de incendios: Evaluación de los incendios ocurridos en el periodo enero-febrero 2017 en Chile. [correo electrónico]. Recuperado en: <castillo.ivan.r@gmail.com> Consultado el: 25 de marzo de 2019.

Castillo M.; G. Roberto; G. Julio y L. Correa. 2013. Incendios forestales en Chile. Análisis general de riesgos. [en línea]. Coimbra, Portugal: Departamento de Geografía, Facultad de Letras, Universidad de Coimbra. Recuperado en: <https://www.uc.pt/fluc/depgeotur/publicacoes/Livros/livro_homenagem_FREbelo/667_678>. Consultado el: 24 de octubre de 2017.

Ceballos, A. y Galleguillos, M. 2018. Bases de datos vegetación 2014. [correo electrónico]. Recuperado en: <aceballos@ug.uchile.cl&g> Consultado el: 25 de diciembre de 2018.

Chaplot V. e Y. Le Bissonais. 2000. Field measurements of Interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth surface processes and landforms*, 25: 145-153.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1997. Estudio Agrológico VII Región del Maule. [en línea]. Infraestructura de Datos Espaciales, Ministerio de Agricultura: Santiago, Chile. Recuperado en: <<http://ide2.minagri.gob.cl/publico2/>>. Consultado el: 01 de febrero de 2018.

Climate Change Resource Center. 2004. Watershed erosion prediction project, restriction and limitations. U.S. Forest Service. [en línea]. Washington D.C., Estados Unidos: USDA. Recuperado en: < <https://www.fs.usda.gov/ccrc/tools/watershed-erosion-prediction-project>>. Consultado el: 05 de enero de 2018.

Conacher, A. y M. Sala. 1998. Land degradation in Mediterranean environments of the world. Nature and extent causes and solutions. Wiley, Chichester. 491p.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2017a. Información de Megaincendios Forestales Enero-febrero 2017. [en línea]. Sistema de Información Territorial, Ministerio de Agricultura: Santiago, Chile: Recuperado en: <<https://sit.conaf.cl/>>. Consultado el: 01 de junio de 2017.

CONAF (Corporación Nacional Forestal). 2017b. Análisis de la afectación y severidad de los incendios forestales ocurridos en enero y febrero 2017 sobre los usos de suelo y los ecosistemas naturales presentes entre las regiones de Coquimbo y La Araucanía de Chile. CONAF. [en línea]. Santiago, Chile: CONAF. 56p. Recuperado en: < http://www.conaf.cl/tormenta_de_fuego-2017/INFORME-AFECTACION-Y_SEVERIDAD-DE-INCENDIOS-FORESTALES-VERANO-2017-SOBRE-ECOSISTEMAS-VEGETACIONALES-CONAF.pdf>. Consultado el: 16 de septiembre de 2018.

Concha, J. 2004. Evaluación cuantitativa de la pérdida de suelo en rodales naturales dañados por incendios forestales de magnitud, en la Reserva Nacional Malleco, IX región. Tesis de pregrado para optar al título de Ingeniero Forestal. Temuco, Chile: Universidad de la Frontera. Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales. 78h

Cornejo, E. 1983. Manejo silvopastoral con pino insigne en la Región del Maule. Algunos resultados. En: Actas del encuentro del estado de la investigación sobre manejo silvopastoral en Chile. (3 y 4 de noviembre de 1983, Talca, Chile). Universidad de Talca. 21p.

Cosio, F.; M. Negrón; J. Gastó y J. Villate. 2007. Distritos y sitios de la provincia templada secoestival nubosa o Valparaíso: Secano de la Costa. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 7(1): 38-61.

Covert, S. 2003. Accuracy assessment of WEPP-based erosion models on three small, harvested and burned forest watersheds. Memoria de postgrado para optar al Grado Máster de Ciencia con Mención en Recursos Forestales. Idaho, Estados Unidos: Colegio de Estudios de Postgrado., Universidad de Idaho. 54h.

da Rocha Junior, P.; R. Bhattarai; R. Braganca; A. Fernandes; P. Kumar y F. Andrade. 2018. Runoff sediment and P losses from various soil management practices: modelling in jilly slopes. *Journal of soil science and plant nutrition*, 18(1): 113-128.

DeBano, L. 1981. Water Repellent Soils: A State-of-the Art. USDA Forest Service, (General Technical Report PSW-46). U. S. Forest Service. California, Estados Unidos: USDA. 25p.

DeBano L.; D. Neary y P. Ffolliott. 1998. Fire's Effects on Ecosystems. John Wiley & Sons: Nueva York, Estados Unidos: Wiley & Sons. 352p.

De la Barrera y F. Ruiz. 2017. Evaluación del impacto de los incendios de Chile Centro-Sur en el verano del año 2017. En: Primera entrega Internacional Association of Landscape Ecology (IALE) (Primera Reunión anual, 25 al 26 de mayo de 2017, Valparaíso, Chile). De la Barrera y F. Ruiz. Valparaíso, Chile: IALE. 6p.

De Regoyos Sáinz M.; A.I. García y García; F. Ayuga Téllez y V. Martínez Álvarez. 2003. Validación del modelo de estimación de la erosión "WEPP" como herramienta para la evaluación de estrategias de gestión y control de los recursos naturales a diferentes escalas de actuación. En: Congreso Internacional de Proyectos de Ingeniería (VI versión, 23, 24 y 25 de octubre de 2012, Barcelona, España). Barcelona, España: Asociación Española de Ingeniería de Proyectos. 13p.

Dechen, F.; T. Telles; M. Guimares e I. Maria. 2015. Losses and cost associated with water erosion according to soil cover rate. *Bragantia*, 74(2): 224-233

Demir, S. e I. oğuz. 2019. Sensitivity analysis with WEPP Hillslope model in Tokat province. En: IV International Anatolian Agriculture, Food, Environment and Biology Congress. (IV Versión, 20, 21 y 22 de abril de 2018, Afyonkarahisar, Turkía). Afyonkarahisar, Turkía: Targid. 5p.

Departamento de Estudios y Planificación de los Recursos Hídricos. 2004, septiembre. Modelo de simulación de escorrentía diaria para cuencas pluviales SIMED. Calibración y validación en la cuenca del Río Purapel, VII Región (S.I.T. N° 93). Dirección General de Aguas, DGA. [en línea]. Santiago, Chile: DGA.197p. Recuperado en: <<http://documentos.dga.cl/MET4122.pdf>>. Consultado el: 25 de noviembre de 2018.

DGA (Dirección General de Aguas). 2018. DGA amplía red hidrométrica en la Región del Maule. [en línea]. Santiago, Chile: DGA. Recuperado en: <<https://dga.mop.gob.cl/noticias/Paginas/DetalledeNoticias.aspx?item=533>>. Consultado el: 15 de abril de 2018.

Dijkshoorn K; J. Huting y P. Tempel. 2005. Update of the 1:5 million Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC), Version 2.0. World Soil Information. Wageningen, Países Bajos: World Soil Information. 25p.

Dyrness T. y C. Youngber. 1957. The effects of logging and slash burning on soil structure. *Soil Science Society of America Proceedings*, 21: 444-447.

Ebel B.; J. Moody y D. Martin. 2012. Hydrologic conditions controlling runoff generation immediately after wildfire. *Water Resources Research*, 48: 13-35

Echeverría, C.; D. Coomes; J. Salas; J. Rey-Benayas; A. Lara y A. Newton. 2006. Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests. *Biological Conservation*, 130: 481-494.

EIEI. 2000. Suspended sediment data and sediment transport amount for Surface waters in Turkey. General Directorate of Electrical Power Resources survey and development administration. Ankara, Turkía: EIEI. 15p.

Ellies, A. 1995. Efecto del manejo sobre las propiedades físicas de suelos trumaos y rojo arcillosos. *Bosque (Valdivia)*, 16(2): 101–110.

Elliot, W.; D. Hall y D. Scheele. 2000. Disturbed WEPP, WEPP interface for disturbed forest and range runoff, erosion and sediment delivery. Forest Service Rocky Mountain Research. Washington D. C., Estados Unidos: USDA. 34p.

Espinosa M.; P. Lara; C. Mascayano y R. Castro. 2006. Zonificación de erosión y fragilidad de los suelos del secano costero de las regiones VI y VII. Centro de Información de Recursos Naturales CIREN. [en línea]. Santiago, Chile: CIREN. 65p. Recuperado en: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/bitstream/handle/123456789/2164/PC0612706.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Consultado el: 16 de abril de 2018.

Fan Y.; W. Li; C. Yaning y H. Wang. 2011. Impacts of temperature and precipitation on runoff oin the Tarim River during the past 50 years. *Journal of Arid Land*, 3(3): 220-230.

Fashi F. y F. Ejlali. 2015. Evaluating spatial distribution of soil erosion using WEPP erosion model and GIS tools: a review. *Agricultura – Stiinta si practica*, 3: 95-96.

Fernández-Manso, A.; Fernández-Manso, O. y Quintano, C. 2016. SENTINEL-2A red-edge spectral indices suitability for discriminating burn severity. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 50: 170-175.

Fernández, C.; J. Vega; J. Gras; T. Fonturbel; P. Cuiñas; E. Dambrine y M. Alonso. 2004. Soil erosion after Eucalyptus globulus clearcutting: differences between logging slash disposal treatments. *Forest Ecology and Management*, 195 (1–2): 85–95.

Fernández C. y J. Vega. 2015. Modelling the effect of soil burn severity on soil erosion at hillslope scale in the first year follow wildfire in NW Spain. *Earth surface processes and landforms*, 41: 928-935

Flanagan D. y M. Nearing. 1995. USDA-Water erosion prediction project, hillslope profiles in the WEPP model (NSERL Report N° 10. USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory. Indiana, Estados Unidos: USDA-ARS. 40 p.

Flanagan D. y S. Livingstone. 1995. WEPP User Summary (Report N° 11). Agricultural Research Service, ARS. West Lafayette, Estados Unidos: U.S. Forest Service, USDA. 131p.

Flanagan D. y M. Nearing. 2000. Sediment particle sorting on hillslope profiles in the WEPP model. *Transactions of the Agricultural Society of Agricultural Engineers*, 43(3): 573-583

Flanagan D.; J. Frankenberger y J. Ascough. 2012. WEPP: model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55: 1463-1477

Flanagan D.; A. Srivastava y J. Frankenberger. 2018. Evaluation of WEPP model performance with various climate inputs. En: 2018 ASABE Annual International Meeting. (29, 28, 29, 30, 31 de julio y 01 de agosto de 2018). ASABE Meeting Presentation. ASABE. Detroit, Estados Unidos: ASABE. 12p.

Flores, J.P. 2010. Resultados de Informe Bosque Esclerófilo. CONAF. [en línea]. Santiago, Chile: CONAF. 40p. Recuperado en: <https://investigacion.conaf.cl/archivos/repositorio_documento/2018/10/INFORME_BO_SQUE_ESCLEROFILO011_2010_Juan-Pablo-Flores-CIRENParte2.pdf>. Consultado el: 16 de julio de 2019.

Flores V.; E. Martínez; M. Espinosa; G. Henríquez; P. Avendaño; P. Torres e I. Ahumada. 2010. Determinación de la erosión actual y potencial de los suelos de Chile, Región del Maule. CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). Santiago, Chile: CIREN. 50p.

Foldi L. y R. Kuti. 2016. Characteristics of forest fires and their impact on the environment. *Atlantic Association for Research in the Mathematical Sciences*, 15 (1): 5-17

Foley, J.; R. DeFries; G. Asner; C. Barford; G. Bonan; S. Carpenter; F. Stuart Chapin; M. Coe; C. Daily; H. Gibbs; J. Helkowski; T. Holloway; E. Howard; C. Kucharik; C. Monfreda; J. Patz; C. Prentice; N. Ramankutty y P. Snyder. 2005. Global consequences of Land Use. *American Association for the Advancement of Science*, 309: 570-574.

Foster, G.; D. Flanagan; M. Nearing; L. Lane; L. Risse y S. Finker. 1995. Hillslope erosion component. USDA. [en línea]. Washington D. C., Estados Unidos: USDA. 12P. Recuperado en: <<https://www.ars.usda.gov/ARSUserFiles/50201000/WEPP/chap11.pdf>>. Consultado el: 15 de julio de 2019.

Frankenberger J. 2006. Using climate data in the WEPP Windows interface. En: WEPP Workshop – Shandong University (8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15 de abril de 2013, Taian, China). WEPP Workshop. J. Frankenberger. Taian, China: Shandong Agricultural University. 60p.

Frankenberger, J. 2008. Format of CLIGEN weather station statistics input files. USDA. Washington D. C., Estados Unidos: USDA. 11p.

Gabriella J.; M. Pérez; J. Terra y J. Sawchik. 2015. Ajuste del modelo de erosión WEPP para un Argisol subéutrico y un brunosol éutrico en el Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 19(1): 84-93.

Gallardo L.; G. Lillo; D. Bozkurt y M. Rojas. 2015, noviembre. Informe a la Nación: La mega sequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Centro de Ciencia del Clima y la

Resiliencia (CR)2. [en línea]. Santiago, Chile: Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. 29 p. Recuperado en: <
https://www.researchgate.net/publication/304013805_Informe_a_la_Nacion_La_megas_equia_2010-2015_Una_leccion_para_el_futuro>. Consultado el: 20 de octubre de 2017.

Garbrecht J. y L. Martz. 1999. An Overview of TOPAZ: An automated digital landscape analysis tool for topographic evaluation, drainage identification, watershed segmentation and subcatchment parametrization (Reporte N° GRL 99-1). USDA Forest Service. El Reno, Estados Unidos: USDA. 25p.

García-Chevesich, P.; R. Pizarro; C. Stropki y P. Ramírez de Arellano. 2010. Formation of post-fire water-repellent layers in monterrey pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations in south-central Chile. *Journal of soil science and plant nutrition*, 10(4): 399-406.

Gayoso, J., Iroumé, A., 1991. Compaction and soil disturbances from logging in southern Chile. *Annales des sciences forestieres*, 48(1): 63–71.

GeoWEPP Team. 2017. Versions of GeoWEPP. GeoWEPP Team. [en línea]. Nueva York, Estados Unidos: Universidad de Buffalo. Recuperado en: <
<http://geowebb.geog.buffalo.edu/versions/>>. Consultado el: 25 de octubre de 2018.

GISGeography. 2015. Raster resampling for discrete and continuous data. [en línea]. Atlanta, Estados Unidos: GISGeography. Recuperado en: <
<https://gisgeography.com/raster-resampling/>>. Consultado el: 24 de noviembre de 2019.

González M.; A. Lara; R. Urrutia y J. Bosnich. 2011. Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile. *Bosque*, (32): 215-219.

González V. 2013. Efecto de la discretización de la cuenca y modelo digital de elevaciones en la estimación de la erosión hídrica en cuencas de gran tamaño. Memoria de postgrado para optar al Título Profesional de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Santiago, Chile: Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. 102h.

Goula, B.; B. Konan; Y. Brou; I. Savane; V. Fadika y B. Srohourou, 2007. Estimation of daily extreme rainfall in a tropical zone: Case study of the Ivory Coast by comparison of Gumbel and Lognormal distributions. *Hydrological Sciences Journal*, 52: 49-67.

Gupta H.; S. Sorooshian y P. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *Journal of Hydrology Engineering*, 4(2): 135-143

He T.; C Belcher; B. Lamont y S. Lim. 2015. A 350-million-year legacy of fire adaptation among conifers. *Journal of Ecology*, 104: 352–363.

Instituto de Investigación de Recursos Naturales CORFO. 1964. Suelos, Descripciones Proyecto Aero fotogramétrico. CONAF. [en línea]. Santiago, Chile: CONAF. 389p.

Recuperado en: <http://www.plataformacaldera.cl/biblioteca/589/articles-66458_documento.pdf>. Consultado el: 17 de marzo de 2018.

Keesstra SD; J. Maroulis; E. Argaman; A. Voogt y L. Wittenberg. 2014. Effects of controlled fire on hydrology and erosion under simulated rainfall. *Cuadernos de Investigación Geográfica*. 40: 269–293.

Knoepp J.; L. De Bano y G. Neary. 2005. Soil chemistry. En: Wildlan fire in ecosystems: effects of fire son soils and water. D. G. Neary; L. F. Ryan y L. F. De Bano (eds). Nueva York, Estados Unidos: Forest Service and Rocky Mountain Research, Department of Agriculture. 18p.

Krause P.; D. Boyle y F. Base. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5: 89-97

Jankauskas, B.; G. Jankauskiene y M. Fullen. 2007. Relationships between soil organic matter content and soil erosion severity in Albeluvisols of the Zemaiciai Uplands. *Ekologija*, 53(1): 21-28.

Jian M.; A. Berhe; M. Berli y T. A. Ghezzehei. 2018. Vulnerability of physically protected soil organic carbon to loss under low severity fires. *Frontiers in Environmental Sciences*, 6: 15-27.

Jones, C.; R. Griggs; J. Williams y R. Srinivasan. 1993. Predicción de la erosión de suelos. Food and Agriculture Organization, FAO. [en línea]. Roma, Italia: FAO. 11P. Recuperado en: < <http://www.fao.org/3/t2351s/T2351S03.htm>>. Consultado el: 15 de abril de 2019.

Jordan C. 2002. Análisis de los coeficientes de escorrentía para la cuenca del río Purapel, Estación Nirivilo, periodo 1970-1990. Memoria de pregrado para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal. Talca, Chile: Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Talca. 127h.

Julio G. y J. Bosnich. 2005. Fundamentos del manejo del fuego. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. 285 p.

Lakshmi S. y K. Yarrakula. 2018. Review and critical analysis on digital elevations models. *Geofizika*. 35(2): 129-157.

Lal, R. y W. Elliot, W. 1994. Erodibility and Erosivity (cap. 1). En: Soil and Water Conservation (U.S.). Soil Erosion Reseach Methods. Second Edition. Lal, R. Nueva York, Estados Unidos: Soil and Water Conservation (U.S.). 352p

Lal, R. 2001. Soil degradation by erosion. *Land degradation & development*, 12(6): 519-539.

Lal, R. 2003 Soil erosion and the global carbon budget. *Environment International*, 29(1): 437- 450.

- Larsen I. y L. McDonald. 2007. Predicting postfire sediment yields at the hillslope scale: Testing RUSLE and Disturbed WEPP. *Water Resources Research*. 43: 15-25
- Larsen, J.; L. Mac Donald; E. Brown; D. Rough; M. Welsh y J. Pietraszek. 2009. Causes of post-fire runoff and erosion: Water repellency, cover, or soil sealing? *Soil Science Society of America Journal*, 73(4): 1393-1407
- Little, C.; A. Lara; J. McPhee y R. Urrutia. 2009. Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology*, 374(1-2): 162-170.
- Lobo, G. 2014. Base de datos climática y conformación de archivos climáticos para CLIGEN. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile. 20p.
- López-Díaz M.; L. Rolo y G. Moreno. 2011. Trees' role in nitrogen leaching after organic, mineral fertilization: A greenhouse experiment. *Journal of Environmental Quality*, 40: 853– 859.
- Luebert, F y P. Pliscoff. 2006. Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile. 1ª edición. Editorial Universitaria. 316p.
- Mahler, R. y D. Westermann. 2001. Essential plant micronutrients. Universidad de Idaho. [en línea]. Idaho, Estados Unidos: Universidad de Idaho.6p. Recuperado en: <<https://www.extension.uidaho.edu/publishing/pdf/cis/cis1088.pdf>>. Consultado el: 13 de noviembre de 2018.
- Maione U.; B. Majone-Letho y R. Monti. 2000. New trends in Water and Environmental Engineering for safety and life. CRC Press. Rotterdam, Países Bajos: CRC Press. 184p.
- Markman, S. 2004. Power Fire DEIS Hydrology Sections. U.S. Forest Service. California, Estados Unidos: USDA. 15p.
- Mataix-Solera J; V. Cerdà A, Arcenegui; A. Jordán y L. Zavala. 2011. Fire effects on soil aggregation: a review. *Earth-Science Reviews*, 109: 44–60
- Meyer, C. 2009. General description of the CLIGEN model and its history. USDA-ARS National Soil Erosion Laboratory. Indiana, Estados Unidos: USDA. 21p.
- Minkowski M. y C. Renschler. 2013. GeoWEPP for ArcGIS 9.x Full Version Manual. Departamento de Geografía, Universidad de New York. [en línea]. New York, Estados Unidos: Universidad Estatal de New York. 129 p. Recuperado en: <http://geowepp.geog.buffalo.edu/wp-content/uploads/2013/08/GeoWEPP_for_ArcGIS_9_Manual.pdf>. Consultado el: 24 de enero de 2018.

Moody J. y D. Martin. 2001. Hydrologic and sedimentation response of two burned watersheds in Colorado. *Water Resources Investigations*, 1: 25-42

Moody J. y D. Martin. 2009. Synthesis of sediment yield after wildlands fire in different rainfall regimes in the western United States. *International Journal of Wildfire*, 18: 96-115.

Morrissey, L. 2016. Air photo interpretation with field verification. SWAC. [en línea]. Vermont, Estados Unidos: University of Vermont. 9p. Recuperado en: <https://www.uvm.edu/~swac/docs/mod16/SWAC_PI_fieldlab_Morrissey_final.pdf>. Consultado el: 16 de marzo de 2018.

Moser E.; B. Saxton y M. Pezeshki. 1990. Repeated measures analysis of variance: Application to tree research. *Canadian Journal of Forest Research*, 20: 524–535.

Nearing M.; GR. Foster; LJ. Laney SC.Finkner. 1989. A process-based soil erosion model for USDA water erosion prediction technology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 32: 1587-1593.

Nearing, M.; J. Laflen y L. Deer-Ascough. 1990. Sensitivity Analysis of the WEPP Hillslope profile erosion mode. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 33(3): 839-849.

Nearing M. y D. Nicks. 1998. Evaluation of the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model for hillslopes. National Soil Erosion Research Laboratory. [en línea]. Washington D. C., Estados Unidos: National Soil Erosion Research Laboratory. 15 p. Recuperado en: < https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-58913-3_5>. Consultado el: 15 de enero de 2018.

Nearing M.; F. Pruski y M. O'Neal. 2004. Expected climate change impacts on soil erosion rates: a review. *Journal of soil and water conservation*, 59: 43-50

Neary D.; K. Ryan y L. DeBano. 2005. Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water (Reporte 42, vol. 4). USDA Forest Service. Ogden, Estados Unidos: USDA. 250p.

Nicks, A.; L. Lane y G. Gander. 1999. Weather generator, WEPP Documentation. USDA. Washington D. C., Estados Unidos: USDA. 22p.

Novara A; L. Gristina; M.B. Bodì y A. Cerdà. 2011. The impact of fire on redistribution of soil organic matter on a Mediterranean hillslope under maquia vegetation type. *Land Degradation & Development*, 22: 530–536.

Novara A; L. Gristina; J. Rühl; S. Pasta; G. D'Angelo; T. La Mantia y P. Pereira. 2013. Grassland fire effect on soil organic carbon reservoirs in a semiarid environment. *Solid Earth*, 4: 381–385.

NRCS. 2007, mayo. Hydrologic soil groups. Natural Resources Conservation Service. [en línea]. Washington D. C., Estados Unidos: USDA. 14p. Recuperado en: <<https://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=17757.wba>>. Consultado el: 25 de agosto de 2018.

Okorafor, O.; C. Akinbile y A. Adeyemo. 2018. Determination of soils erodibility factor (K) for selected sites in Imo State, Nigeria. *Resources and Environment*, 8(1):6-13.

O'Neal, R.M.; M. Nearing; R. Vining; J. Southworth y R. Pfeifer. 2005. Climate change impacts on soil erosion in Midwest United States with changes in crop management. *Catena*, 61: 165–184.

Oyarzún C.; C. Aracena; P. Rutherford; R. Godoy y A. Deschrijver. 2006. Effects of land use native forests to exotic plantations on nitrogen and phosphorus retention in catchments of Southern Chile. *Water Air Soil Pollut*, 179: 341-350.

Peña P. y J. Herrera. 1990. Proyecto suelos forestales de la VIII Región Informe Final. Fondo de Investigación Agropecuaria del Ministerio de Agricultura. [en línea]. Chillán, Chile: Fondo de Investigación Agropecuaria. 159p. Recuperado en: <http://bibliotecadigital.fia.cl/bitstream/handle/20.500.11944/145140/FIA-PI-C-1985-1-F-063_IF.pdf?sequence=1>. Consultado el: 18 de agosto de 2018.

Pereira P.; X. Úbeda; J. Mataix-Solera; M. Oliva y A. Novara. 2014. Shortterm changes in soil Munsell colour value, organic matter content and soil water repellency after a spring grassland fire in Lithuania. *Solid Earth*, 5: 209–225.

Pieri, L.; M. Bittelli; J. Q. Wu; S. Dun, D. C. Flanagan; P. Pisa; F. Ventura y F. Salvatorelli. 2007. Using the Water Erosion Prediction Project (WEPP) model to simulate field observed runoff and erosion in the Apennines mountain range, Italy. *Journal of Hydrology*, 336(1–2): 84–97.

Pietraszek, J. 2006. Controls on post-fire erosion at the hillslope scale, Colorado Front Range. Memoria de postgrado para optar al Grado Máster de Ciencias. Colorado, Estados Unidos: Departamento de Bosques, Pastizales y Administración de Cuencas. Universidad Estatal de Colorado. 131h.

Pimentel, D.; C. Harvey; P. Resosudarmo; K. Sinclair; D. Kurz; M. McNair; C. Crist, S.; L. Shpritz; L. Fitton; R. Saffauri y R. Blair. 1995. *Environmental and Economic Costs of Soil Erosion and Conservation Benefits*. *Science*, 267(5201), 1117–1123.

Pizarro, R. 1993. Elementos técnicos de hidrología III: Proyecto regional sobre y conservación de recursos hídricos en áreas rurales de América Latina y El Caribe (Primera Edición). Universidad de Talca. Talca, Chile: Universidad de Talca. 120p

Pizarro, R.; S. Araya; C. Jordán; C. Farías; J.P. Flores y P. Bro. 2006. The effects of changes in vegetative cover on river flows in the Purapel river basin of central Chile. *Journal of Hydrology*, 327(1-2): 249-257.

- Planton, S. 2018. Cambio climático 2013, Bases Físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el Cambio Climático. IPCC. Nueva York, Estados Unidos: IPCC. 22p.
- Pruski, F. y M. Nearing. 2002a. Runoff and Soil-Loss Responses to Changes in Precipitation: A Computer Simulation Study. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57(1): 7-16.
- Pruski, F y M. Nearing. 2002b. Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight U.S. locations. *Water Resources Research*, 38: 1298-1310.
- Ramírez F. y C. Orellana, 2017. Informe técnico de la situación de incendios forestales en Chile entre enero-febrero 2017. European Union Civil Protection Mechanism. [en línea]. Madrid, España: European Union Civil Protection Mechanism. 11p. Recuperado en: <https://www.camara.cl/pdf.aspx?prmID=98604&prmTIPO=DOCUMENTOCOMISION>. Consultado el: 17 de noviembre de 2018
- Rauter C. 2005. Sensitivity analysis of GeoWEPP model regarding DEM's spatial resolution. Memoria de postgrado para optar al Título Profesional Máster of Science. Salzburgo, Austria: Departamento de Ingeniería y Sistemas de Información Geográfica, Universidad de Salzburgo. 81h
- Renschler, C.; D. Flanagan; B. Engel y J. Frankenberger. 2002. GeoWEPP The Geo-spatial interface for the Water Erosion Prediction Project. *Hydrological Processes*, 17: 1005- 1017.
- Renschler, C. 2003. Designing geo-spatial interfaces to scale process models: the GeoWEPP approach. *Hydrological Processes*. 17(5): 1005-1017.
- Rodríguez-Blanco M.; M. Taboada-Castro; L. Palleiro-Suárez; M. Taboada-Castro y J. Oropeza-Mota. 2011. Exportación de sedimentos durante eventos de lluvia: influencia de rüegeros y cárcavas efímeras. *Terra Latinoamericana*, 29: 309-314.
- Roy P. y A. Roy. 2010. Land use and land cover change in India: a remote sensing and GIS prespective. *Journal of the Indian Institute of Science*, 90(4): 489-502
- Rulli M.; L. Offeddu y M. Santini. 2013. Modeling post-fire water erosion mitigation strategies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 2323-2337.
- Saghafian, B.; A. Meghdadi y S. Sima. 2014. Application of the WEPP model to determine sources of run-off and sediment in a forested watershed. *Hydrological processes*, 29(4): 481-497.
- Salvador, M.; C. Conesa García; R. García y P. Pérez. 2014. Estimación de aportes sedimentarios a embalses de pequeñas cuencas mediterráneas mediante GeoWEPP, Ensayo en la cuenca vertiente del río Mula al embalse de la Cierva. *Limnetica*, 34(1): 41-56.

Santin C. y S. Doerr, 2016. Fire effects on soils: the human dimension. *Philosophical transactions of the Royal Society*, 371: 10-44

Satellite Imaging Corporation. 2018. Satellite sensors. [en línea]. Houston, Estados Unidos: Satellite Imaging Corporation. Recuperado en: <<https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/>>. Consultado el: 14 de abril de 2019.

Schalatter, J.; R. Grez y V. Gering. 2003. Manual para el reconocimiento de suelos. Tercera Edición. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Valdivia. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Valdivia. 114p.

Schertz, D. 1983. The basis for soil loss tolerance. *Journal of soil and water conservation*, 38(1): 10-14.

Seguel, O. 24 de marzo de 2019. Cálculos Conductividad Hidráulica del suelo. [correo electrónico]. Recuperado en: <oseguel@uchile.cl> Consultado el: 24 de marzo de 2019.

Sevruk, B. 1986, Correction of precipitation measurements, in ETH/IASH/ WMO. En: Workshop on the Correction of Precipitation Measurements (1, 2 y 3 de abril de 1985, Zurich, Suiza). Workshop on the correction of precipitation measurements. B. Sevruk. Zurich, Suiza. Geographisches Institut, ETH Zurich. 10p.

Shakesby R.A. y S.H. Doerr. 2006. Wildfire as a hydrological and geomorphological agent. *Earth-Science Reviews*, 74: 269–307

Sharma, S.; S. Tignath; S. Gajbhiye y R. Patil. 2018. Hypsometric analysis for assessing erosion status of watershed using Geographical Information System (cap. 5). En: Singh V.; S. Yadav y R. Yadava. Hydrologic Modeling: Springer Nature Singapore. 13p.

Singh, M. y K. Khera. 2008. Soil erodability indices under different land uses in lower Shiwaliks. *International Tropical ecology*, 49 (2): 113-119.

Soil Survey Staff. 1999. Soil taxonomy: a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys (Segunda edición). Natural Resources Conservation Service USDA. [en línea]. Washington, Estados Unidos: USDA. 886p. Recuperado en: <https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051232.pdf>. Consultado el: 25 de noviembre de 2018.

Sonntag D. 1986. Important New Values of the Physical Constants of 1986, Vapour Pressure Formulations based on the IST-90 and Psychrometer Formulae *Meteorologische Zeitschrift*, 70 (5): 340-344.

Soto, L.; O. Seguel; A. Lara; B. Sotomayor and M. Galleguillos. 2019. Assessment of soil physical properties in different land covers within a landscape dominated by industrial plantations in south-central Chile. *Journal of Soil and Water Conservation*. In Discuss.

Sotomayor B. 2017. Análisis de la relación entre dinámica de la configuración del paisaje y la respuesta hidrológica a escala de cuenca en dos cuencas forestales del secano interior de la Región del Maule. Memoria de pregrado para optar al Título Profesional de Ingeniero en Recursos Naturales Renovables. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 102h.

Spectrum Analytic. 2008. Cation exchange capacity. [en línea]. Nueva York, Estados Unidos: Spectrum Analytic. Recuperado en: <https://www.spectrumanalytic.com/support/library/ff/CEC_BpH_and_percent_sat.htm>. Consultado el: 24 de agosto de 2018.

SSL. 1996. Soil Survey Laboratory Methods Manual. Soil Survey Investigations Report (N° 42 Version 3). USDA-SSL Soil Survey Laboratory. Washington D. C., Estados Unidos: NRCS. 736p

Terrence T.; R. George y R. Kenneth. 2002. Soil erosion: processes, prediction, measurement and control. 1ª edición. Wiley. 352p.

Tessler N.; Y. Sapir; L. Wittenberg y N. Greenbaum. 2015. Recovery of Mediterranean vegetation after recurrent forest fires: insight from the 2010 forest fire on Mount Carmel, Israel. *Land Degradation & Development*, 27(5): 24-32.

Tiedemann A.; C. Conrad; J. Dieterich; J. Hornbeck y W. Megahan. 1979. Effects of fire on water, a state of knowledge, a review. USDA Forest Service. Washington D. C., Estados Unidos: USDA. 28p.

Tizcareno-López, M.; J. Stone; V. Lopez y L. Lane. 1991. Sensitivity analysis of the WEPP Watershed model for rangeland applications I: Hillslope processes. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 36(6): 1659-1672.

Tolorza V.; M Galleguillos; C. Little; R. Guiñez; C. Ramírez-Bravo; Y. Roco; B. Sotomayor; A. Jopia; A. Ruiz y E. Navarro. 2017, octubre. Monitoreo de la erosión desencadenada por el mega-incendio de 2017 en la Región del Maule. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile. 73p.

Toma L.; R. Wickremesinghe; L. Arge; J. Chase; J. Vitter; P. Halpin y D. Urban. 2001. Flow computation on massive grids. ACM Press. Nueva York, Estados Unidos: ACM. 82 p.

Uribe H.; J. Arumi; L. González y L. Salgado. 2003. Balances hidrológicos para estimar recarga de acuíferos en el secano interior, Chile. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XVIII. N° 3: 17-28.

US Forest Service. 2000. Post fire erosion. U.S. Forest Service. [en línea]. California, Estados Unidos: USDA. 1p. Recuperado en: <https://www.fs.fed.us/psw/topics/fire_science/ecosystems/erosion.shtml>. Consultado el: 14 de abril de 2019.

USDA. 2005. Final Environmental impact statement freds fire restoration. U.S. Forest Service. California, Estados Unidos: USDA. 466p.

Valencia, D.; J. Saavedra; J. Brull y R. Santelices. 2018. Severidad del daño causado por los incendios forestales en los bosques remanentes de *Nothofagus alessandrii* Espinosa en la Región del Maule, Chile. *Gayana Botanica*, 75(1): 531-534.

Van Dijk A. y C. Rosewell. 2002. Rainfall intensity-kinetic energy relationship: A critical literature appraisal. *Journal of Hydrology*, 261: 1-23

van Genuchten , M.; F. Leji y S. Yates. 1991. The RETC Code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils, version 1.0 (EPA Report 600/2-91/065). Sanity Laboratory, USDA. California, Estados Unidos: USDA. 93p.

Wagenbrenner J. y P. Robichaud. 2014. Post-fire bedload sediment delivery across spatial scales in the interior western United States. *Earth surface processes and landforms*, 39: 865- 876.

Ward, A. y S. Trimble. 2004. Soil conservation and sediment budgets. (cap 9, pp. 255-290). En: Environmental hydrology. Segunda Edición. Florida, Estados Unidos: Lewis Publishers. 295p.

Warrick J.; J. Xu; M. Noble y J. Lee. 2008. Rapid formation of hyperpycnal sediment gravity currents offshore of a semi-arid California river. *Continental Shelf Research*, 29: 991-1009.

Wijitkosum S. 2012. Impact of land use changes on soil erosion in Pa Deng Sub-district, adjacent area of Kaeng Krachan National Park, Thailand. *Soil & Water Resources*, 7(1): 10-17

Willgoose, G. y G. Hancock. 1998. Revisiting the hypsometric curve as an indicator of form and process in transport-limited catchment. *Earth surface process landforms*, 23(7): 611-623.

Willmott C. 1981. On the validation of models. *Physical Geography*. 2(2): 184-194.

Wischmeier, W.; C. Johnson y B. Cross. 1971. A Soil Erodibility Nomograph for Farmland and Construction Sites. *Journal of Soil and Water Conservation*, 26: 189-193

Wischmeier W. y D. Smith. 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. *Transactions American Geophysical Union*, 39: 285-291

Wohlgemuth, P. 2006. Hillslope erosion and small Watershed sediment yield following a wildfire on the San Dimas Experimental Forest, Southern California. En: Proceedings of the Eight Federal Interagency sedimentation conference. (Octava versión, 2, 3, 4, 5 y 6 de abril de 2006, Reno, Estados Unidos. Eight Federal Interagency sedimentation conference. P. Wohlgemuth. Reno, Estados Unidos: Advisory Committee on Water Information. 8p.

Wood, L. 1970. The use of dew-point temperature in humidity calculations. *Journal of Research of the National Bureau of Standards – C. Engineering and Instrumentation*, 74: 117–122

Yu, B. 2000. Improvement and evaluation of CLIGEN for storm generation. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 43(2): 301–307.

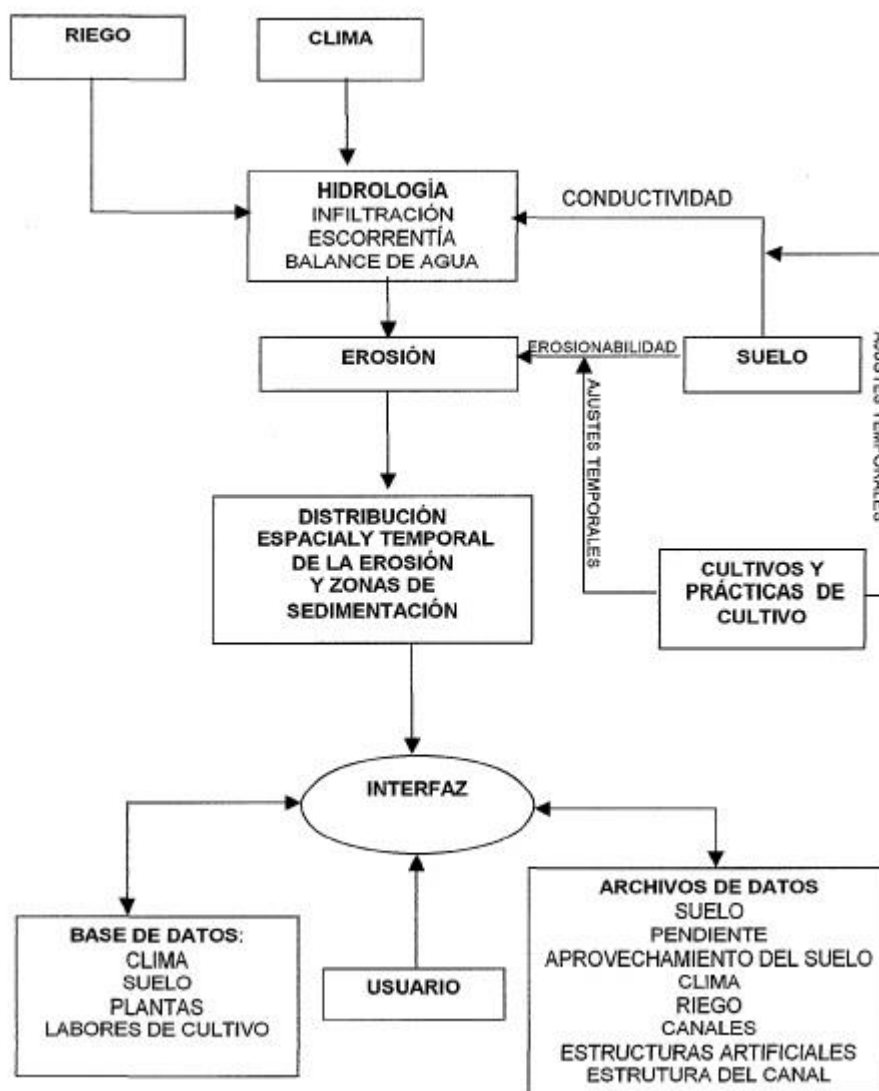
Yuksel A.; A. Akay; R. Gundogan; M. Reis y M. Cetiner. 2008. Application of GeoWEPP for Determining sediment yield and runoff of the Orcan Creek watershed in Kahramanmaras, Turkey. *Sensors (Basel)*, 8(2): 1222-1236

Zhang Z.; J. Yang; L. Sheng y X. 2008. Chen. Effects of land use and slope gradient on soil erosion in a red soil hilly watershed of Souther China. *Sustainability*, 7(10): 14309-14325.

Zhao, S. and Liu, S., 2014. Scale criticality in estimating ecosystem carbon dynamics. *Global change biology*, 20(7): 2240-2251.

ANEXOS

Anexo 1. Diagrama de estructura del modelo basado en procesos, WEPP.



Fuente: Adaptado de Flanagan y Nearing (1995).

Anexo 2. Información de terreno de suelos de series de suelo Constitución y Trehuaco.

Asociación de Suelo	Profundidad (cm)	Arena (%)	Arcilla (%)	M.O (%)
Constitución	20	36,9	36,5	10,87
	40	18,8	54,1	6,42
	60	36,7	51,6	4,72
Trehuaco	20	27,7	26,7	9,79
	40	39,7	43,6	4,75
	60	20,8	51,8	3,56

Fuente: Soto et al., 2019.

Anexo 3. Información bibliográfica de suelos de series de suelo Alto Colorado.

Asociación de Suelo	Profundidad (cm)	Arena (%)	Arcilla (%)	M.O (%)
Alto Colorado	25	24,8	30	4,4
	55	20,5	38,2	1,17

Fuente: CIREN, 1997.

Anexo 4. Información bibliográfica de distribución de partículas de arena muy fina (VFS, *Very fine sand* en inglés) de la serie de suelo Constitución en perfil 0-25 cms de profundidad (CIREN, 1997).

Distribución de partículas por tamaño	Profundidad 0 - 25 cm.
1-0,5	4,7
0,5-0,25	3,6
0,25-0,10	4,1
0,10-0,05	5
Suma total	17,4

Fuente: CIREN, 1997.

Anexo 5. Información de terreno de suelos de series de suelo Trehuaco respecto al porcentaje de arcilla presente en el perfil 0-60 cms. de profundidad.

Profundidad (cm)	Porcentaje de arcilla (%)
0-20	26,68
20-40	43,60
40-60	51,81
Promedio	40,70

Fuente: Soto et al., 2019.

APÉNDICES

Apéndice 1.a. Archivos de parámetros de suelo WEPP (archivos SOL) de la serie de suelo Alto Colorado para representar el escenario sin incendio y con incendio (previo a la calibración).

Soil File Name:	Soil Texture:	Albedo:	Initial Sat. Level: (%)
Alto_Colorado	sandy clay loam	0.1034	25
Interrill Erodibility:	4.17407e+006 (Kg*s/m**4)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Rill Erodibility:	0.0071 (s/m)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Critical Shear:	3.5 (Pa)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Eff. Hydr. Conductivity:	5.05 (mm/h)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/1)	Rock(%)
1	250	24.8	30.0	4.400	20.7	2.0
2	550	20.5	38.2	1.170	0.0	0.0
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

Use Restricting Layer

Anisotropy Ratio: 25 Ksat (mm/h): 0

English Units

Print Save As Save Cancel Help

Apéndice 1.b. Archivos de parámetros de suelo WEPP (archivos SOL) de la serie de suelo Constitución para representar el escenario sin incendio y con incendio (previo a la calibración).

Soil File Name:	Soil Texture:	Albedo:	Initial Sat. Level: (%)
Constitucion	sandy clay loam	0.01	25
Interrill Erodibility:	6.071e+006 (Kg*s/m**4)	<input type="checkbox"/> Have Model Calculate	
Rill Erodibility:	0.0072 (s/m)	<input type="checkbox"/> Have Model Calculate	
Critical Shear:	4.03 (Pa)	<input type="checkbox"/> Have Model Calculate	
Eff. Hydr. Conductivity:	1.135 (mm/h)	<input type="checkbox"/> Have Model Calculate	

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/1)	Rock(%)
1	200	36.9	36.5	10.872	20.7	2.0
2	400	18.8	54.1	6.426	0.0	0.0
3	600	36.7	51.6	4.724	0.0	0.0
4						
5						
6						
7						
8						
9						

Use Restricting Layer

Anisotropy Ratio: 25 Ksat (mm/h): 0

English Units

Print Save As Save Cancel Help

Apéndice 1.c. Archivos de parámetros de suelo WEPP (archivos SOL) de la serie de suelo Trehuaco para representar el escenario sin incendio y con incendio (previo a la calibración).

Soil File Name:	Soil Texture:	Albedo:	Initial Sat. Level: (%)
Trehuaco	loam silty clay	0.012	25
Interrill Erodibility:	3.8488e+006 (Kg*s/m**4)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Rill Erodibility:	0.0069 (s/m)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Critical Shear:	3.5 (Pa)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Eff. Hydr. Conductivity:	2.1 (mm/h)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/1)	Rock(%)
1	200	27.7	26.7	9.790	20.7	2.0
2	400	39.7	43.6	4.750	0.0	0.0
3	599.9	20.8	51.8	3.560	0.0	0.0
4						
5						
6						
7						
8						
9						

Use Restricting Layer

Anisotropy Ratio: 25 Ksat (mm/h): 0

English Units

Print Save As Save Cancel Help

Apéndice 2. Procedimientos de obtención y cálculos de parámetros de archivos de suelo WEPP para ambos escenarios de modelación.

1) Albedo:

Este concepto se refiere al porcentaje de radiación solar reflejado a la atmósfera (Planton, 2018). Este parámetro es utilizado internamente por WEPP para calcular la radiación neta que se acumula en la superficie del suelo y los valores posibles van de 0 a 100%. (Flanagan y Livingstone, 1995).

Para el cálculo de esta variable en la serie de suelo Alto Colorado, se utilizó como fuente de información el Estudio Agrológico VII Región del Maule (CIREN, 1997) en la cual se detalla que la cantidad de carbono orgánico es de 2.55% en el perfil superficial de 0 a 25 cm. de profundidad. Se utilizó la Ecuación 11, asumiendo que la materia orgánica tiene un 58% de carbono orgánico (SSL, 1996).

$$\mathbf{MOS = CO \times 1,724}$$

Ecuación 11. Ecuación para obtención de materia orgánica del suelo (%) a partir de carbono orgánico del suelo (%)

Donde,

MOS: Materia Orgánica del suelo (%)

CO: Carbono Orgánico del suelo (%) (SSL, 1996).

Para obtener finalmente el valor de albedo, se utilizó la Ecuación 12, propuesta por Baumer (Flanagan y Livingstone, 1995)

$$\mathbf{Alb = \frac{0,6}{e^{(0,4 \times MOS)}}$$

Ecuación 12. Ecuación para obtención de Albedo (%)

Donde,

Alb: Albedo del suelo (%)

MOS: Materia Orgánica del suelo (%) (Flanagan y Livingstone, 1995).

Para las series de suelo Trehuaco y Constitución, dado que hubo mediciones de terreno de la materia orgánica del suelo en el estudio de Soto et al. (2019), se utilizaron los valores superficiales (perfil 0-20 cm. de profundidad) de esta variable para el cálculo del albedo, utilizando para ellos la Ecuación 12.

2) Porcentaje de saturación inicial

Este parámetro se relaciona al porcentaje de porosidad relleno por agua, en el día 1 de la simulación, y en el caso de esta investigación fue el 01/01/2010. El rango de valores va de 0 a 100% (Flanagan y Livingstone, 1995).

Para esta investigación no fue posible obtener este parámetro a partir de los datos de CIREN ni mediante los datos de Soto et al. (2019) para las series de suelo Trehuaco, Constitución y Alto Colorado en ambas modelaciones, por lo cual se recurrió a la consulta experta. De acuerdo con Oscar Seguel (comunicación personal, 2019), el porcentaje de saturación inicial del suelo para el secano costero interior, considerando el valor para el primer día de la simulación, es de un 25% aproximadamente.

3) Erosionabilidad entre regueros (*Interrill erodibility* en inglés)

Este parámetro refleja la susceptibilidad del suelo a ser arrancado por el efecto de las gotas de lluvia y el flujo superficial (Flanagan y Livingstone, 1995).

3.a.) Serie de suelo Alto Colorado.

Considerando que, si el suelo posee menos del 30% de arena, la ecuación a utilizar es la siguiente:

$$IE = 6054000 - 55130 \times \text{Arcilla}$$

Ecuación 13. Ecuación para obtención de erosionabilidad entre regueros.

Donde,

IE: Erosionabilidad entre regueros ($\text{kg} \times \text{s} (\text{m}^4)^{-1}$)

Arcilla: porcentaje de arcilla (%), considerando el promedio de 55 cms. de profundidad, según los datos de CIREN (1997) (Flanagan y Livingstone, 1995) (Anexo 3).

3.b.) Serie de suelo Constitución.

Considerando que, si el suelo es cultivado y posee más del 30% de arena, la ecuación a utilizar es la siguiente:

$$IE = 2728000 + 192100 \times \text{VAF}$$

Ecuación 14. Ecuación para obtención de erosionabilidad entre regueros.

Donde,

IE: Erosionabilidad entre regueros ($\text{kg} \times \text{s} (\text{m}^4)^{-1}$)

VAF: porcentaje de arena muy fina (%), considerando la suma total de las partículas de arcilla en los perfiles de suelo (0 a 25 cm. de profundidad, según los datos de CIREN (1997) (Flanagan y Livingstone, 1995) (Anexo 4).

3.c.) Serie de suelo Trehuaco.

Para el cálculo de la variable Erosionabilidad entre regueros de esta serie de suelo, también se utilizó la Ecuación 13, considerando la suma total del porcentaje de partículas de arcilla presente entre 0-60 cm. de profundidad según los datos de terreno de Soto et al. (2019) (Anexo 5).

4) Erosionabilidad en los regueros (*Rill erodibility*, en inglés)

Este parámetro refleja la susceptibilidad del suelo a ser afectado y desprendido debido al agua que corre por los regueros y canales (Flanagan y Livingstone, 1995).

4.a.) Serie de suelo Alto Colorado.

La ecuación utilizada es utilizada en aquellos suelos que contengan menos del 30% de arena.

$$ER = 0.0069 + 0.134 \times e^{(-0.20 \times Arcilla)}$$

Ecuación 15. Ecuación para obtención de erosionabilidad en los regueros.

Donde,

ER: Erosionabilidad en los regueros ($s\ m^{-1}$)

Arcilla: Porcentaje de arcilla (%), considerando el promedio de 55 cms. de profundidad, según los datos de CIREN (1997) (Flanagan y Livingstone, 1995) (Anexo 3).

4.b.) Serie de suelo Constitución.

La ecuación utilizada en aquellos suelos que contengan un 30% o más porcentaje de arena es:

$$ER = 0.00197 + 0.00030 \times VAF \times e^{(-1.84 \times MOS)}$$

Ecuación 16. Ecuación para obtención de erosionabilidad en los regueros.

Donde,

ER: Erosionabilidad en los regueros ($s\ m^{-1}$)

VAF: porcentaje de arena muy fina (%), considerando la suma total de los porcentajes de las partículas en los primeros 25 cm de profundidad, según los datos de CIREN (1997) (Anexo 4).

MOS: porcentaje de materia orgánica del suelo, en los primeros 20 cm de profundidad según datos de Soto et al., (2019) (Flanagan y Livingstone, 1995). (Anexo 2)

4.c.) Serie de suelo Trehuaco

Para el cálculo de la variable Erosionabilidad en los regueros de esta serie de suelo, también se utilizó la Ecuación 15, considerando el promedio del porcentaje de arcilla en el perfil 0-60 cm según los datos de Soto et al. (2019) (Flanagan y Livingstone, 1995) (Anexo 2).

5) Esfuerzo cortante (*Critical Shear*, en inglés)

Se refiere a un valor umbral, por debajo del cual no se produce desprendimiento del suelo (Flanagan y Livingstone, 1995).

5.a.) Serie de suelo Alto Colorado.

Para suelos que contengan menos del 30% de arena, la fórmula utilizada fue:

$$EC = 3,5$$

Ecuación 17. Ecuación para obtención de Esfuerzo Cortante

Donde,

EC: Esfuerzo cortante ($N (m^2)^{-1}$) (Flanagan y Livingstone, 1995).

5.b.) Serie de suelo Constitución.

Para suelos cultivados con un 30% o más de arena, la fórmula utilizada fue:

$$EC = 2,67 + 0,065 \times \text{Arcilla} - 0.058 \times \text{VAF}$$

Ecuación 18. Ecuación para obtención de Esfuerzo de corte

Donde,

EC: Esfuerzo de corte ($N (m^2)^{-1}$)

Arcilla: porcentaje de arcilla del suelo, en los primeros 20 cm de profundidad según datos de Soto et al., (2019) (Flanagan y Livingstone, 1995) (Anexo 2)

VAF: porcentaje de arena muy fina (%), considerando la suma total de los porcentajes de las partículas en los primeros 25 cm de profundidad, según los datos de CIREN (1997) (Anexo 4).

5.c.) Serie de suelo Trehuaco.

Para suelos que contengan menos del 30% de arena, la fórmula utilizada fue la Ecuación 18 nuevamente.

6) Conductividad hidráulica efectiva.

Este parámetro se asocia con la conductividad saturada del suelo y es el parámetro sensible del suelo relacionado a la generación de escorrentía. Este término puede ser calculado internamente por las ecuaciones y algoritmos de WEPP, como una función del tipo de suelo, mezcla de suelos y densidad de éste o ingresar un valor manualmente (Flanagan y Livingstone, 1995).

6.a.) Serie de suelo Alto Colorado.

Mediante el uso de los datos de terreno de Soto et al., (2019) de textura del suelo (Anexo 3), fue posible calcular el valor de este parámetro mediante el software RETC Versión 1.0 (van Genuchten et al, 1991).

6.b.) Serie de suelo Constitución.

Para aquellos suelos que posean un 40% o menos de contenido de arcilla, la fórmula recomendada es

$$\text{CHE} = 0,0066 \times e^{\left(\frac{2.44}{\text{Arcilla}}\right)}$$

Ecuación 19. Ecuación para de Conductividad Hidráulica Efectiva

Donde,

CHE: Conductividad Hidráulica Efectiva (mm h⁻¹)

Arcilla: Porcentaje de arcilla (%), considerando el promedio de todo el perfil (0- 60 cm) de los datos de Soto et al., (2019) para esta serie de suelo (Flanagan y Livingstone, 1995) (Anexo 2)

6.c.) Serie de suelo Trehuaco.

Se utilizaron los mismos procedimientos mencionados en el punto 6.a de este Apéndice.

7) Porcentaje de Arena (%), Arcilla (%) y Materia Orgánica (%)

Estos porcentajes pueden ser introducidos manualmente en el archivo de parámetros de suelo de WEPP, con la posibilidad de agregar capas de profundidad, en mm. La información utilizada fue gracias a los datos de Soto et al., (2019), considerando profundidades de 20, 40 y 60 cm (Anexo 2) y los datos bibliográficos de CIREN (1997) (Anexo 3).

8) Capacidad de intercambio catiónico (CEC)

Este parámetro se relaciona a la cantidad de cationes que son absorbidos en las partículas del suelo por unidad de masa del suelo, en condiciones químicas neutras ($\text{meq } 100\text{g}^{-1}$ de suelo). Internamente, WEPP utiliza la CEC para la estimación paramétrica de la ecuación de la conductividad hidráulica y el rango de esta variable va de 1 hasta 150 (Alberts et al., 1995). El valor de esta variable fue obtenido gracias a la información geoespacial de la Base de Datos SOTERLAC 2005 y fue utilizado en las 3 series de suelo, en ambas modelaciones.

9) Pedregosidad

En el modelo WEPP, la pedregosidad, o porcentaje de fragmentos de rocas, reducen el área de la sección del perfil del suelo, por lo que se reduce la conductividad hidráulica del suelo, contenido volumétrico de agua y la porosidad (Flanagan y Livingstone, 1995). De acuerdo con Oscar Seguel (comunicación personal, 2019) el porcentaje de pedregosidad promedio, para esta serie de suelo es de un 2% en el primer perfil del suelo, en las 3 series de suelo en ambas modelaciones.

Apéndice 3. Estaciones Meteorológicas ubicadas dentro de la Cuenca de Purapel y cercanas al punto de salida de ésta que registraron la variable precipitación, en milímetros.

Estación	Rio Purapel en Sauzal	Rio Maule En Forel	Chanco
Fuente de Información	DGA	DGA	AGROMET
Dentro/Fuera de la cuenca	Dentro	Fuera	Fuera (a 30 kms. al SO de la cuenca)
Este	765.812	740.936	725.144
Norte	6.054.172	6.061.163	6.045.754
Variable	Precipitación	Precipitación	Precipitación
Unidad	mm	mm	mm
Temporalidad	Diario	Diario	Subhorario (cada 15 min)
Status	Suspendida	Vigente	Vigente
Inicio de medición	6/6/1985	1/5/2001	2/5/2010
Final de medición	31/03/2017	9/3/2018	12/3/2019

Estación	Sauzal	Jbouchon	Torres
Fuente de Información	AGROMET	METEOVID	METEOVID
Dentro/Fuera de la cuenca	Dentro	Dentro	Fuera (a 4.7 kms. al SO de la cuenca)
Este	761.320	771.699	745.603
Norte	6.043.827	6.059.706	6.060.671
Variable	Precipitación	Precipitación	Precipitación
Unidad	mm	mm	mm
Temporalidad	Subhorario (cada 15 min)	Diario	Diario
Status	Vigente	Vigente	Vigente
Inicio de medición	1/9/2009	1/1/2012	1/1/2013
Final de medición	3/12/2019	3/12/2019	3/12/2019

Apéndice 4. Ejemplificación de archivo de texto “*Custom*”.

MONTH	DAY	YEAR	PRCP	TMAX	TMIN
1	1	2010	0	28	11.2
1	2	2010	0	34.4	12.1
1	3	2010	0	22.9	12.8
1	4	2010	0	24.6	14.1
1	5	2010	0	23.1	10.4
1	6	2010	0	28.8	9.9
1	7	2010	0	29.7	10.8
1	8	2010	0	29.8	10.8
1	9	2010	0	30.6	13.6
1	10	2010	0	30.2	12.5
1	11	2010	2.1	24	7.8
1	12	2010	0.2	24.7	8.1
1	13	2010	0	28.2	11.6
1	14	2010	0	33	12.2
1	15	2010	0	29.7	14.3
1	16	2010	0	31.1	10.4
1	17	2010	0	30.5	13.7
1	18	2010	0	28.9	12.8
1	19	2010	0	32.1	9.2
1	20	2010	0	34.5	18.4
1	21	2010	0	34.7	19.7
1	22	2010	0	34.2	17.7
1	23	2010	0	33.2	16.2
1	24	2010	0	35.5	17.3
1	25	2010	0	31.6	14.1
1	26	2010	0	34.1	11.5
1	27	2010	0	36.5	14.9
1	28	2010	0	34.4	15
1	29	2010	0	28.4	11.9
1	30	2010	0	29.5	10.7
1	31	2010	0	31.5	12.7

Este archivo *Custom* fue utilizado para la creación del archivo climático CLI. La columna *Month*, *Day* y *Year* representan meses, días y años respectivamente, del periodo considerado para la modelación en WEPP. La columna *Prcp* representa la precipitación diaria, en mm; columna *Tmax* representa la temperatura máxima, en °C; y *Tmin* representa la temperatura mínima, en °C (Frankenberger, 2006). La información obtenida de estas 3 variables fue mediante la recopilación de datos diarios de la Estación Sauzal, monitoreada por AGROMET-INIA, entre 01/01/2010 y el 31/12/2018. Este anexo detalla solo las 43 primeras líneas de texto, ya que en total son 3288.

Apéndice 5. Procedimientos para calcular y obtener las variables de la Base de Datos Climática.

La Base de Datos Climática es un conjunto de variables climatológicas en un tiempo definido, tales como precipitación horaria, precipitación diaria, temperaturas máximas y mínimas, radiación solar, temperatura del punto de rocío, velocidad y dirección de los vientos. Esta Base de Datos implica una serie de procedimientos y cálculos de cada variable, de tal manera que los valores obtenidos se utilizaron para la creación del archivo de texto PAR. A continuación, se detalla el procesamiento de la información, formulas y consideración para el relleno de datos de cada variable.

1) Precipitación horaria: se obtuvo esta información desde el sitio web de AGROMET-INIA, con registros entre la fecha 01/01/2010 y 10/24/2018, con mediciones de la variable, en milímetros, cada 15 min. No fue posible conseguir datos horarios después de esta fecha final, debido a que la estación fue sacada de línea por problemas técnicos del pluviómetro. No fueron considerados los registros de lluvia con un solo dato con valores iguales y menores a 0,2 mm, ya que no serían representativos para los futuros cálculos.

2) Precipitación diaria: se obtuvo a partir de la agregación de los registros de precipitación horaria. La información obtenida abarca desde el 01/01/2010 al 31/10/2017 y del 06/06/2018 al 31/12/2018. A pesar de que la estación fue dada de baja en registros horarios a finales de octubre del 2017, ésta fue puesta nuevamente en línea proporcionando mediciones diarias de precipitación. Para los días en que no se registraron mediciones en la estación Sauzal, se rellenaron los datos faltantes utilizando información diaria de estaciones cercanas.

Para este último procedimiento mencionado, se utilizó la metodología de completación de datos pluviométricos por razones de distancia, propuesta por Pizarro (1993), utilizando la Ecuación 20:

$$P_x = PA + a \times \frac{(PB - PA)}{a + b}$$

Ecuación 20. Ecuación para completación de datos pluviométricos

Donde,

Px: Precipitación diaria (en mm) a completar en estación Sauzal

PA: Precipitación diaria registrada (en mm) en estación Chanco, de AGROMET (35° 7' S – 72° 51' O)

PB: Precipitación diaria registrada (en mm) en estación Miraflores, de AGROMET (35° 81' S – 71° 77' O)

a: distancia (en m) entre la estación Sauzal y Chanco (valor de 36.24 km)

b: distancia (en m) entre la estación Sauzal y Miraflores (valor de 32.5 km)

3) Temperaturas máximas y mínimas: mediante consulta web al sitio de AGROMET-INIA, se obtuvieron registros horarios de la variable medida en grados Celsius (°C). Los datos obtenidos abarcan desde el 01/01/2010 al 17/01/2018 y del 06/06/2018 al 31/12/2018. Para completar los registros faltantes de temperaturas, los datos se rellenaron utilizando la información correspondiente al mismo periodo de tiempo, pero del año anterior.

4) Radiación solar: se utilizaron registros diarios de la estación Sauzal, mediante consulta web. Los registros de esta variable fueron entre las fechas 19/04/2010 al 17/01/2018 y entre el 07/09/2018 al 31/12/2018. La información obtenida desde AGROMET-INIA es medida en *Megajoule* (m²)⁻¹ y fue necesario multiplicar los datos por un factor de 23.900 para que los datos queden expresados en *Langleys*, unidad de medición de radiación requerida para la creación del archivo PAR. No hubo relleno de datos faltantes, ya que el modelo climático CLIGEN solo requiere de datos estadísticos de radiación (desviación estándar diaria y media), por lo que la completación de datos podría afectar el comportamiento de éstos (Lobo, 2014). En los días en que la estación no registró datos de esta variable, éstos no fueron considerados para el cálculo de los estadígrafos.

5) Temperatura del punto de rocío: el punto de rocío es la temperatura a la cual el vapor de agua contenido en un volumen de aire, a una presión atmosférica determinada, alcanza la saturación y se condensa para formar rocío (Wood, 1970).

Para obtener valores de esta variable, en primer lugar, fue necesario obtener información diaria de temperatura del aire (°C) y humedad relativa (medida en %). Los registros obtenidos de estas variables abarcan entre las fechas 19/04/2010 al 17/01/2018 y 06/06/2018 al 31/12/2018. El relleno de datos faltantes de temperaturas y humedad relativa fue considerando el mismo criterio descrito en el punto 3 de este Apéndice

Una manera simplificada para calcular la temperatura del punto de rocío, considerando datos de temperatura del aire y humedad relativa, es la fórmula de Magnus. La ecuación utilizada fue:

$$T_{pr} = \frac{b \times \left(\ln \left(\frac{HR}{100} \right) + \frac{a \times T}{b + T} \right)}{a - \ln \left(\frac{HR}{100} \right) - \frac{a \times T}{b + T}}$$

Ecuación 21. Ecuación de la temperatura de punto de rocío (°C)

Donde,

T_{pr}: Temperatura de punto de rocío en °C

Rh: Humedad relativa medida en porcentaje (%)

T: Temperatura del aire medida en °C

a: valor constante equivalente a 17.271

b: valor constante equivalente a 237.7 (Sonntag, 1986)

Una vez obtenidos los valores de temperatura de rocío en °C, fue necesaria su transformación a grados Fahrenheit (°F), ya que es la unidad requerida de esta variable para la generación del archivo climático. La ecuación utilizada fue:

$$T_{pr} (^{\circ}F) = (1.8 \times T_{pr}) + 32$$

Ecuación 22. Ecuación de la temperatura de punto de rocío (°F)

Donde,

$T_{pr} (^{\circ}F)$: Temperatura de punto de rocío en °F

T_{pr} : Temperatura de punto de rocío en °C (Sonntag, 1986).

6) Velocidad y dirección de vientos: se utilizaron registros diarios de velocidad del viento (metros/segundo) y dirección del viento (8 direcciones en grados sexagesimales), variables obtenidas mediante consulta web a la red de AGROMET-INIA. La información obtenida abarca desde el 01/01/2010 al 17/01/2018 y entre 06/06/2018 y el 31/12/2018. La información faltante no fue considerada para el cálculo de los estadígrafos.

Apéndice 6. Procedimientos para calcular y obtener las variables del archivo PAR

Una vez que se calcularon y se recopilaron todas las variables climatológicas descritas en el Apéndice 5, se procedió a la obtención de la información climatológica específica de cada variable requerida por el archivo PAR, detallado a continuación.

1) Cantidad máxima de agua caída en 30 minutos (TP5) y en 6 horas (TP6) para un periodo de retorno de 100 años:

Para la obtención de ambas variables se utilizaron solamente los datos de precipitaciones mayores a 0.2 mm y considerando que una tormenta contendría como mínimo un registro de lluvia y como máximo ningún límite de éstos.

Una vez identificadas las tormentas, cada uno de los datos de precipitaciones (medidas cada 15 min) fueron sumadas con los registros de los 15 min siguientes, cada uno de estos totales dividirlos en 0.5 e identificar el valor máximo obtenido de cada tormenta, y este resultado es la cantidad de agua caída en media hora. Una vez identificados todos los valores extremos de esta variable en la serie de tiempo, junto a sus respectivas fechas, se utilizó un *script* de Python 3.3 en el software Jupyter Notebook 6.0 el cual permitió generar histogramas y ajustar distintas distribuciones de probabilidad a los datos graficados (Distribución Normal, Lognormal, Weibull y Chi Cuadrado). La función de probabilidad que más se ajustó a los datos graficados fue la Distribución Lognormal, ya que según la bibliografía (Goula et al., 2007), es la más adecuada para ajustar variables hidrológicas con valores extremos tales como la precipitación máxima en 6 h y 30 min. Finalmente, el valor obtenido de la cantidad máxima de agua caída en 30 min para un periodo de retorno de 100 años, considerando 9 años de registros, fue de 12,192 mm (0,48 pulg, unidad de medida requerida para el archivo PAR).

Para obtener la cantidad máxima de agua caída en 6 h (TP6), en cada una de las tormentas se sumaron los datos de lluvia de 15 min con la respectiva lluvia consecutiva hasta las 6 h de registros, cada uno de estos totales obtenidos dividirlos en 6 y finalmente identificar el valor máximo de cada tormenta. Nuevamente, se aplicó el algoritmo de Phyton a la información de estos valores extremos, considerando las fechas en los cuales ocurren éstos, se generó un hidrograma, se graficaron las distintas distribuciones de probabilidad mencionadas y finalmente la función que más se ajustó a esta serie de tiempo fue la Distribución Lognormal. El valor obtenido para un periodo de retorno de 100 años fue de 4,318 mm. (0,17 pulg).

2) Media, desviación estándar y coeficiente de asimetría de las precipitaciones (MEAN P, S DEV P, SKEW P respectivamente), probabilidades de lluvia (P(W/W), P(W/D)) y medias y desviaciones estándar de las temperaturas máximas (TMAX AV, SD TMAX respectivamente) y mínimas (TMIN AV, SD TMIN respectivamente):

Se construyó un archivo de texto *Custom*, con datos diarios de lluvias (en mm) y temperatura mínima y máxima (en °C) (Apéndice 4), cuyos datos abarcan desde el 01/01/2010 al 31/12/2018. El archivo creado fue ingresado a WEPP siguiendo el proceso para la creación de estaciones meteorológicas fuera de Estados Unidos, de tal manera que el software pueda calcular estos parámetros estadísticos para cada uno de los meses de la

serie de tiempo climatológica (Frankenberger, 2006). Una vez que el software calculó estos parámetros de precipitaciones y temperaturas es necesario extraerlos del archivo de texto creado y utilizarlos en el archivo PAR que será creado, ya que los demás parámetros estadísticos computados son generados por CLIGEN, considerando datos históricos de estaciones climatológicas dentro de Estados Unidos.

3) Media y desviación estándar de radiación solar por mes (SOL.RAD y SD SOL respectivamente):

La información mensual de estas variables fue calculada mediante el compendio y agrupamiento de los datos diarios de radiación solar, con ayuda del software Microsoft Excel 2019.

4) Intensidad de precipitación máxima mensual en 30 minutos (MX. 0.5P):

El cálculo de este parámetro fue utilizando la serie temporal de la cantidad máxima de agua caída en 30 min. Se catalogaron todas las precipitaciones extremas según el mes en que ocurrieron y se calcularon promedios desde enero hasta diciembre para los 9 años de registros. Posteriormente, los 12 valores mensuales obtenidos fueron transformados desde milímetros de precipitación a unidades de pulgadas.

5) Temperatura de punto de rocío media mensual (DEW PT):

Una vez que se calculó la temperatura de punto de rocío diaria (en °F) de los 9 años de información se procedió a agrupar los datos de manera mensual y obtener un valor promedio desde enero hasta diciembre.

6) Tiempo para la intensidad máxima de precipitación (TIME PK):

A partir de la Base de Datos Climática de las precipitaciones horarias y representativas, se calculó para cada tormenta el tiempo relativo en el que ocurre la intensidad máxima de lluvia. Luego, cada uno de estos valores de intensidad fueron catalogados en 12 intervalos de tiempo relativo sucesivos, definidos por el Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos (National Weather Service, en inglés) en base a mediciones de datos históricos de precipitación en 15 min en ese país (Nicks et al., 1999). Una vez contabilizadas las tormentas en cada clase de intensidad, se procedió a calcular la distribución de frecuencia acumulada de cada intervalo de tiempo y cada uno de estos valores obtenidos dividirlos por la cantidad total de tormentas ocurridas entre 01/01/2010 y 10/24/2018, cuyo valor fue 6303. Finalmente, se obtuvieron 12 valores diferentes de intensidad máxima de precipitación por cada clase de intervalo de tiempo.

7) Porcentaje de ocurrencia, media, desviación estándar y coeficiente de asimetría del viento en 16 direcciones y calmas (% D, MEAN, STD DEV, SKEW y CALM respectivamente. D representa cada una de las 16 direcciones de viento)

Utilizando la Base de Datos Climática previamente construida, se procedió a separar cada dirección del viento registrada por la estación Sauzal (Norte, NorEste, Este, SurEste, Sur, SurOeste, Oeste y NorOeste), para luego calcular a cada una de estas los

porcentajes de ocurrencia en cada dirección, sus medias, desviaciones estándar y coeficientes de asimetría para cada uno de los meses del año. Como la estación Sauzal no mide las direcciones de viento Nornoreste, Estenoreste, Estesureste, Sursureste, Sursuroeste, Oestesuroeste, Oestenoroeste y Nornoroeste, fue necesario promediar los parámetros calculados anteriormente cada 45° antes y después de las direcciones de viento sin registro, para finalmente obtener todos los parámetros calculados en 16 direcciones.

Para las calmas de viento se calcula el porcentaje de veces, por cada mes de toda la serie de tiempo, en que la velocidad del viento es 0 m s^{-1} .

Apéndice 7. Archivo de parámetros climáticos PAR.

SAUZAL2 CHL		999999 0										
LATT= -35.71 LONG= -72.11 YEARS= 10. TYPE= 2												
ELEVATION = 532. TP5 = 0.48 TP6= 0.17												
MEAN P	0.05	0.12	0.06	0.08	0.09	0.16	0.21	0.15	0.14	0.14	0.07	0.13
S DEV P	0.07	0.24	0.13	0.15	0.23	0.37	0.36	0.25	0.28	0.24	0.11	0.22
SKEW P	1.60	2.41	3.45	3.10	3.48	2.86	2.35	2.34	2.99	2.91	2.11	2.22
P(W W)	0.50	0.60	0.52	0.57	0.68	0.81	0.74	0.79	0.66	0.56	0.48	0.27
P(W D)	0.03	0.03	0.05	0.12	0.40	0.43	0.44	0.22	0.18	0.15	0.07	0.04
TMAX AV	87.70	86.31	82.71	72.89	62.75	56.75	55.77	59.55	64.93	69.44	76.57	82.52
TMIN AV	54.68	52.94	49.41	43.80	42.22	40.12	38.67	39.64	40.97	43.33	46.69	49.99
SD TMAX	6.34	6.30	6.47	6.75	6.51	5.15	5.15	5.80	6.30	6.90	7.21	7.11
SD TMIN	4.93	5.20	4.68	5.20	5.92	5.73	4.95	5.22	5.02	4.57	4.47	4.23
SOL.RAD	558.8	462.5	364.7	260.4	174.0	131.9	151.8	212.6	325.1	424.7	553.6	601.1
SD SOL	263.6	259.9	213.9	148.2	98.8	82.1	92.5	125.7	157.9	201.4	232.7	246.0
MX .5 P	0.07	0.11	0.10	0.10	0.13	0.14	0.11	0.12	0.11	0.11	0.10	0.08
DEW PT	51.41	50.71	48.57	46.01	45.62	42.83	41.07	42.21	43.55	45.45	47.46	49.19
Time Pk	0.005	0.026	0.091	0.189	0.242	0.472	0.517	0.582	0.729	0.789	0.826	1.000
% N	0.28	0.32	0.25	0.60	1.17	1.80	2.24	1.90	1.14	0.79	0.44	0.44
MEAN	0.20	0.72	0.37	0.54	0.61	1.07	1.02	1.16	0.90	0.68	0.50	0.52
STD DEV	0.25	0.54	0.45	0.50	0.72	0.89	0.78	0.84	0.49	0.48	0.52	0.62
SKEW	-1.27	-1.86	-1.24	0.91	0.92	0.89	1.57	0.57	0.58	-0.78	-0.03	-0.17
% NNE	0.28	0.18	0.25	0.32	0.74	1.25	1.36	1.12	0.60	0.41	0.44	0.24
MEAN	0.20	0.92	0.37	0.83	0.85	1.03	0.94	1.14	1.10	0.84	0.50	0.45
STD DEV	0.25	0.54	0.45	0.50	0.66	0.71	0.58	0.70	0.67	0.48	0.52	0.62
SKEW	-1.27	-1.86	-1.24	0.91	0.80	0.85	1.01	0.62	0.29	-0.78	0.00	-0.17
% NE	0.00	0.03	0.00	0.03	0.32	0.70	0.47	0.35	0.06	0.03	0.00	0.03
MEAN	0.00	1.11	0.00	1.11	0.96	0.85	0.81	1.00	1.29	1.00	0.00	0.39
STD DEV	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	0.54	0.38	0.57	0.83	0.00	0.00	0.00
SKEW	0.00	0.00	0.00	0.00	0.68	0.81	0.45	0.67	0.00	0.00	0.00	0.00
% ENE	0.00	0.02	0.11	0.16	0.55	0.79	0.52	0.30	0.09	0.08	0.03	0.02
MEAN	0.00	0.56	0.00	0.85	0.76	0.75	0.70	0.81	0.97	1.06	0.00	0.19
STD DEV	0.00	0.00	0.43	0.00	0.39	0.37	0.37	0.41	0.58	0.21	0.57	0.00

STD DEV	0.84	0.87	0.51	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84
SKEW	-1.53	0.96	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
% SSE	1.55	1.04	1.37	1.39	1.14	0.96	1.22	1.25	1.55	1.45	1.61	1.50
MEAN	1.18	1.05	0.80	0.66	0.27	0.31	0.33	0.51	0.44	1.07	0.50	0.95
STD DEV	0.77	0.69	0.50	0.26	0.20	0.19	0.26	0.30	0.31	0.33	0.34	0.72
SKEW	-1.13	0.84	1.21	0.71	1.65	1.03	1.60	1.05	0.91	1.15	0.86	0.59
% S	3.00	1.96	2.65	2.72	2.28	1.93	2.43	2.47	3.10	2.88	3.22	2.94
MEAN	1.10	0.81	0.66	0.67	0.53	0.63	0.67	0.71	0.88	0.94	1.00	1.01
STD DEV	0.70	0.50	0.49	0.47	0.41	0.37	0.52	0.61	0.61	0.65	0.68	0.59
SKEW	1.27	0.72	1.66	1.41	1.65	1.03	1.60	1.05	0.91	1.15	0.86	0.59
% SSW	2.01	1.37	2.05	1.99	1.47	1.63	1.68	1.60	2.01	1.96	2.21	1.96
MEAN	1.34	1.13	0.94	0.87	0.64	0.63	0.81	0.91	1.11	1.11	1.16	1.24
STD DEV	0.60	0.49	0.46	0.42	0.42	0.38	0.48	0.51	0.50	0.54	0.55	0.53
SKEW	0.53	0.17	1.04	0.53	1.04	1.37	0.64	0.91	-1.17	0.20	0.22	0.21
% SW	1.01	0.79	1.45	1.26	0.66	1.33	0.92	0.73	0.92	1.04	1.20	0.98
MEAN	1.58	1.44	1.21	1.07	0.76	0.62	0.95	1.11	1.34	1.28	1.33	1.47
STD DEV	0.49	0.49	0.42	0.37	0.43	0.38	0.44	0.42	0.39	0.43	0.43	0.46
SKEW	-1.20	-1.38	0.42	-1.36	0.43	1.71	-1.32	0.78	-1.26	-1.75	-1.42	-1.17
% WSW	1.04	0.90	1.12	0.74	0.38	0.76	0.54	0.52	0.71	0.85	1.12	1.15
MEAN	1.37	1.31	1.12	0.84	0.67	0.73	0.73	0.95	1.11	1.21	1.28	1.28
STD DEV	0.45	0.43	0.38	0.31	0.39	0.51	0.27	0.43	0.36	0.37	0.37	0.49
SKEW	-1.63	-1.67	-1.12	0.50	1.08	1.17	-1.16	1.01	-1.88	-1.24	-1.06	-1.40
% W	1.07	1.01	0.79	0.22	0.09	0.19	0.16	0.32	0.51	0.66	1.04	1.33
MEAN	1.17	1.19	1.04	0.61	0.59	0.83	0.50	0.79	0.89	1.14	1.22	1.09
STD DEV	0.40	0.37	0.34	0.24	0.35	0.64	0.11	0.44	0.34	0.31	0.31	0.52
SKEW	-1.06	-1.96	-1.65	1.36	1.73	0.63	0.00	1.24	-1.50	0.26	0.30	-1.62
% WNW	1.99	1.96	1.58	1.31	1.31	0.87	1.09	1.55	1.85	1.96	1.80	2.18
MEAN	1.25	1.19	1.08	0.75	0.67	0.73	0.60	0.81	0.97	1.13	1.20	1.21
STD DEV	0.42	0.38	0.36	0.30	0.31	0.45	0.17	0.36	0.35	0.31	0.37	0.49
SKEW	-1.07	-1.89	-1.28	0.68	1.13	0.48	0.03	0.74	-1.54	0.17	-1.34	-1.50
% NW	2.91	2.91	2.37	2.40	2.53	1.55	2.02	2.78	3.19	3.26	2.56	3.03
MEAN	1.34	1.20	1.12	0.89	0.74	0.64	0.70	0.83	1.04	1.12	1.17	1.33
STD DEV	0.44	0.40	0.39	0.36	0.26	0.25	0.23	0.29	0.35	0.32	0.43	0.45
SKEW	-1.08	-1.82	0.09	0.00	0.53	0.32	0.06	0.24	-1.58	0.07	-1.98	-1.37
% NNW	1.59	1.61	1.31	1.50	1.85	1.67	2.13	2.34	2.17	2.02	1.50	1.74
MEAN	0.77	0.96	0.75	0.71	0.68	0.85	0.86	0.99	0.97	0.90	0.83	0.93
STD DEV	0.34	0.47	0.42	0.43	0.49	0.57	0.51	0.56	0.42	0.40	0.47	0.53
SKEW	-1.18	-1.34	-1.57	0.45	0.73	0.61	0.81	0.40	0.00	-1.36	-1.49	-1.27
CALM	0.09	0.13	0.06	0.13	0.41	0.54	0.63	0.19	0.32	0.09	0.28	0.13

Apéndice 8. Variables climáticas del archivo PAR.

Variable	Significado
LATT	Latitud en grados decimales
LONG	Longitud en grados decimales
YEARS	Años de modelación
TYPE	Numero entero y parámetro interno de CLIGEN para definir los parámetros de tormentas
ELEVATION	Elevación sobre nivel del mar. Unidad de medida: pies
TP5	Precipitación máxima en 30 minutos. Unidad de medida: pulg.
TP6	Precipitación máxima en 6 horas. Unidad de medida: pulg.
MEAN P	Precipitación media en los días que ocurre la lluvia al mes. Unidad de medida: pulg.
S DEV P	Desviación estándar de los valores diarios de precipitación, agrupados por mes. Unidad de medida: pul.
SKEW P	Coficiente de asimetría de los valores diarios de precipitación, agrupados por mes. Unidad de medida: pulg.
P(W W)	Probabilidad de un día húmedo ocurrido después de un día húmedo, por mes
P(W D)	Probabilidad de un día húmedo ocurrido después de un día seco, por mes
TMAX AV	Temperatura media máxima diaria, agrupada por mes. Unidad de medida: °F
TMIN AV	Temperatura media mínima diaria, agrupada por mes. Unidad de medida: °F
SD TMAX	Desviación estándar de la temperatura máxima diaria, agrupada por mes. Unidad de medida: °F
SD TMIN	Desviación estándar de la temperatura mínima diaria, agrupada por mes. Unidad de medida: °F
SOL.RAD	Radiación solar diaria, agrupada por mes. Unidad de medida: Langleys.
SD SOL	Desviación estándar de la radiación solar diaria, agrupada por mes. Unidad de medida: Langleys.
MX .5 P	Intensidad de precipitación media diaria ocurrida en 30 minutos. Unidad de medida: pulg h ⁻¹
DEW PT	Temperatura de punto de rocío media diaria, agrupada por mes. Unidad de medida: °F
Time Pk	Tiempo al <i>peak</i> de la intensidad de precipitación, basado en 12 clases que representan 12 intervalos de tiempo relativo sucesivos, los que fueron determinados por el Servicio Meteorológico Nacional de los Estados Unidos
% N	Porcentaje de tiempo de viento desde el Norte, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Norte, por mes. Unidad de medida: m s ⁻¹
STD DEV	Desviación estándar de viento norte, por mes. Unidad de medida: m s ⁻¹
SKEW	Coficiente de asimetría de viento Norte, por mes.
% NNE	Porcentaje de tiempo de viento desde el Nornoreste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Nornoreste, por mes. Unidad de medida: m s ⁻¹

STD DEV	Desviación estándar de viento Nornoreste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Nornoreste, por mes
% NE	Porcentaje de tiempo de viento desde el Noreste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Noreste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Noreste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Noreste, por mes
% ENE	Porcentaje de tiempo de viento desde el Estenoreste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Estenoreste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Estenoreste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Estenoreste, por mes
% E	Porcentaje de tiempo de viento desde el Este, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Este, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Este, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Este, por mes
% ESE	Porcentaje de tiempo de viento desde el Estesureste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Estesureste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Estesureste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Estesureste, por mes
% SE	Porcentaje de tiempo de viento desde el Sureste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Sureste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Sureste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Sureste, por mes
% SSE	Porcentaje de tiempo de viento desde el Sursureste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Sursureste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Sursureste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Sursureste, por mes
% S	Porcentaje de tiempo de viento desde el Sur, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Sur, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Sur, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Sur, por mes
% SSW	Porcentaje de tiempo de viento desde el Sursuroeste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Sursuroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Sursuroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Sursuroeste, por mes
% SW	Porcentaje de tiempo de viento desde el Suroeste, por mes.

MEAN	Promedio de velocidad de viento Suroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Suroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Suroeste, por mes
% WSW	Porcentaje de tiempo de viento desde el Oestesuroeste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Oestesuroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Oestesuroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Oestesuroeste, por mes
% W	Porcentaje de tiempo de viento desde el Oeste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Oeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Oeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Oeste, por mes
% WNW	Porcentaje de tiempo de viento desde el Oestenoroeste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Oestenoroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Oestenoroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Oestenoroeste, por mes
% NW	Porcentaje de tiempo de viento desde el Noroeste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Noroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Noroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Noroeste, por mes
% NNW	Porcentaje de tiempo de viento desde el Nornoroeste, por mes.
MEAN	Promedio de velocidad de viento Nornoroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
STD DEV	Desviación estándar de viento Nornoroeste, por mes. Unidad de medida: $m s^{-1}$
SKEW	Coefficiente asimetría de viento Nornoroeste, por mes
CALM	Porcentaje de tiempo cuando hay condiciones de calma ($0 m s^{-1}$), por mes

Fuente: Frankenberger, 2008.

Apéndice 9. Ejemplificación de archivo climático CLI.

```

5.30000
1 0 0
Station: SAUZAL2 CHL CLIGEN VER. 5.30000 -r: 0 -I: 0
Latitude Longitude Elevation (m) Obs. Years Beginning year Years simulated Command Line:
-35.71 -72.11 162 10 2010 9
Observed monthly ave max temperature (C)
30.9 30.2 28.2 22.7 17.1 13.8 13.2 15.3 18.3 20.8 24.8 28.1
Observed monthly ave min temperature (C)
12.6 11.6 9.7 6.6 5.7 4.5 3.7 4.2 5.0 6.3 8.2 10.0
Observed monthly ave solar radiation (Langleys/day)
558.8 462.5 364.7 260.4 174.0 131.9 151.8 212.6 325.1 424.7 553.6 601.1
Observed monthly ave precipitation (mm)
2.2 6.0 4.5 13.3 39.4 84.6 103.9 60.4 36.9 28.0 6.3 5.3
da mo year prcp dur tp ip tmax tmin rad w-vl w-dir tdew
      (mm) (h) (C) (C) (l/d) (m/s) (Deg) (C)
1 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 27.8 11.1 423. 0.0 0. 8.6
2 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 33.9 11.7 653. 0.0 0. 11.0
3 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 22.8 12.8 525. 0.0 0. 8.0
4 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 24.4 13.9 399. 0.0 0. 13.0
5 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 22.8 10.0 370. 0.0 0. 11.0
6 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 28.3 9.4 463. 1.0 309. 7.5
7 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 29.4 10.6 668. 0.0 0. 9.1
8 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 29.4 10.6 636. 1.4 177. 6.0
9 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 30.6 13.3 595. 0.0 0. 12.3
10 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 30.0 12.2 714. 0.0 0. 7.9
11 1 2010 2.0 1.05 0.00 4.43 23.9 7.8 721. 0.0 0. 6.9
12 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 24.4 7.8 537. 0.0 0. 6.7
13 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 27.8 11.1 378. 0.0 0. 9.3
14 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 32.8 11.7 438. 0.0 0. 9.0
15 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 29.4 13.9 454. 0.0 0. 10.2
16 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 30.6 10.0 542. 0.0 0. 9.8
17 1 2010 0.0 0.00 0.00 0.00 30.0 13.3 481. 0.0 0. 15.2

```

La figura anterior corresponde al archivo climático CLI generado por CLIGEN utilizando los archivos *Custom* y *PAR*. Esta figura expone solo los parámetros de la cabecera del archivo, dado que éste tiene aproximadamente 3302 líneas de código.

De los parámetros ubicados en columnas y generados por CLIGEN, destacan:

- prcp* (mm): monto diario de precipitación, en mm.
- dur*: tiempo de duración, en h.
- tp*: fracción de duración del tiempo al *peak* de la intensidad de precipitación.
- ip*: intensidad *peak*, que relaciona la intensidad máxima de lluvia y la intensidad promedio de la lluvia
- tmax* y *tmin*: temperatura diaria máxima y mínima, en °C
- rad*: radiación solar diaria, en Langleys por día
- w-vl*: promedio de velocidad diaria del viento, en $m\ s^{-1}$
- w-dir*: promedio de dirección del viento, en grados sexagesimales desde el Norte
- tdew*: temperatura diaria de punto de rocío, en °C (Flanagan y Livingston, 1995)

Apéndice 10. Archivo de manejo WEPP utilizados para cada cobertura, en escenario sin incendio.

Cobertura	Descripción	Archivos WEPP		
		Manejo (<i>managements</i>) ROT	Condiciones iniciales (User DB) (*)	Planta inicial (User DB)
Agro-praderas	Zonas cultivadas y praderas y antrópicas	\agropradera.rot	<i>Short Grass Prairie</i>	<i>Short Grass Prairie-disturbed WEPP</i>
Bosque Nativo	Formaciones de bosque maulino dominado por especies del género <i>Nothofagus</i>	\Bosquenativo.rot	<i>Tree 20 yr firest – Disturbed WEPP</i>	<i>Low severity fire – Disturbed WEPP</i>
Matorral	Zonas de vegetación dispersa con un máximo de cobertura de copa del 75% y presencia de suelo desnudo o ligeramente cubierto	\Matorral.rot	<i>matorral_semidenso y Shrub perennial</i>	<i>Shrub prairie including sage and Pinyon-Juniper</i>
Plantaciones Industriales jóvenes	Monocultivos jóvenes de <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus</i> spp	\Plant_joven.rot	<i>Tree 5 yr old forest-disturbed Wepp</i>	<i>Tree 5 yr old forest-disturbed Wepp</i>
Plantaciones Industriales adultas	Monocultivos adultos de <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus</i> spp	\Plant_madura.rot	<i>Skid 112rail-Disturbed WEPP</i>	<i>Skid 112rail-Disturbed WEPP</i>
Sin Vegetación	Zonas de suelo desnudo y talas rasas	\suelo_desnudo.rot	descubierto (0)	descubierto (2)
Regeneración año 1	Cobertura herbácea de año 1	Archivo complementario para las 6 coberturas anteriores	<i>Year 1 regeneration</i>	<i>Year 1 regeneration</i>
Regeneración año 4	Cobertura herbácea de año 4	Archivo complementario para las 6 coberturas anteriores	<i>Year 4 regeneration</i>	<i>Year 4 regeneration</i>
Regeneración año 5	Cobertura herbácea de año 5	Archivo complementario para las 6 coberturas anteriores	<i>Year 5 regeneration</i>	<i>Year 5 regeneration</i>

Con relación a las coberturas Agro-praderas, Bosque Nativo, Matorral, Plantaciones Industriales jóvenes, Plantaciones Industriales adultas, y suelo desnudo sin vegetación, su descripción se basa en lo mencionado por Sotomayor (2017).

Respecto a las condiciones iniciales y planta inicial llamadas “descubierto (0)” y “descubierto (2)”, fueron proporcionados por el Proyecto 050/2011 del Fondo de Investigación del Bosque Nativo de la Corporación Nacional Forestal.

*: algunas definiciones de condiciones utilizadas de manejo se detallan en Elliot et al., 2000.

Apéndice 11. Archivo de manejo WEPP utilizados para cada cobertura, en escenario con incendio (previo y después de la calibración).

Cobertura	Descripción	Archivos WEPP		
		Manejo (<i>managements</i>) ROT	Condiciones iniciales (User DB)**	Planta inicial (User DB)
Agropraderas - Severidad moderada	Zonas cultivadas, praderas y antrópicas, afectadas por incendio de severidad alta	\agropradera_severidad_moderada.rot	<i>Short Grass Prairie</i>	<i>Short Grass Prairie-disturbed WEPP</i>
Agropraderas - Severidad Alta	Zonas cultivadas, praderas y antrópicas, afectadas por incendio de severidad moderada	\agropradera_severidad_alta.rot		
Bosque Nativo - Severidad Moderada	Formaciones de bosque maulino dominado por especies del género <i>Nothofagus</i> , afectado por incendio severidad moderada	\Bosquenativo_severidad_moderada.rot	<i>Tree 20 yr firest - Disturbed WEPP</i>	<i>Low severity fire - Distubed WEPP</i>
Bosque Nativo - Severidad Alta	Formaciones de bosque maulino dominado por especies del género <i>Nothofagus</i> , afectado por incendio severidad alta	\Bosquenativo_severidad_alta.rot		
Matorral - Severidad moderada	Zonas de vegetación dispersa con un máximo de cobertura de copa del 75% y presencia de suelo desnudo o ligeramente cubierto, afectado por incendio severidad moderada	\Matorral_severidad_moderada.rot	<i>Matorral semidens o y Shrub perennial</i>	<i>Shrub prairie including sage and Pinyon-Juniper</i>
Matorral - Severidad alta	Zonas de vegetación dispersa con un máximo de cobertura de copa del 75% y presencia de suelo desnudo o ligeramente cubierto, afectado por incendio severidad alta	\Matorral_severidad_alta.rot		
Plantaciones Industriales jóvenes - Severidad moderada	Monocultivos jóvenes de <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus</i> spp, afectados por severidad moderada	\Plant_joven_severidad_moderada.rot	<i>Tree 5 yr old forest-disturbed Wepp</i>	<i>Tree 5 yr old forest-disturbed Wepp</i>
Plantaciones Industriales jóvenes - Severidad alta	Monocultivos jóvenes de <i>Pinus radiata</i> y <i>Eucalyptus</i> spp, afectados por severidad alta	\Plant_joven_severidad_alta.rot		

Plantaciones Industriales adultas - Severidad moderada	Monocultivos adultos de Pinus radiata y Eucalyptus spp, afectados por incendio severidad moderada	\Plant_madura_severidad_moderada.rot	Skid trail-Disturbed WEPP	Skid trail-Disturbed WEPP
Plantaciones Industriales adultas - Severidad alta	Monocultivos adultos de Pinus radiata y Eucalyptus spp, afectados por incendio severidad alta	\Plant_madura_severidad_alta.rot		
Sin Vegetación - Severidad moderada	Zonas de suelo desnudo y talas rasas, afectados por severidad moderada	\suelo_desnudo_severidad_moderada.rot	descubierto (0)	descubierto (2)
Sin Vegetación - Severidad alta	Zonas de suelo desnudo y talas rasas, afectados por severidad alta	\suelo_desnudo_severidad_alta.rot		
Regeneración año 1	Cobertura herbácea de año 1	Archivo complementario para las 6 coberturas anteriores,	Year 1 regeneration	Year 1 regeneration
Regeneración año 4	Cobertura herbácea de año 4	para ambas severidades de incendio	Year 4 regeneration	Year 4 regeneration
Regeneración año 5	Cobertura herbácea de año 5		Year 5 regeneration	Year 5 regeneration
Severidad moderada	Condición que describe un incendio de severidad moderada, con un 45% de cobertura de suelo	Archivo complementario para las 6 coberturas anteriores, para indicar incendio de severidad moderada	45% ground cover - Moderate Burn	45% ground cover - Moderate Burn
Severidad alta	Condición que describe un incendio de severidad alta y los suelos son hidrófobos	Archivo complementario para las 6 coberturas anteriores, para indicar incendio de severidad alta	Hight severity fire - Disturbed WEPP	Hight severity fire - Disturbed WEPP

Apéndice 12. Imágenes satelitales utilizadas, junto a sus principales características.

Cobertura según <i>Land cover</i>	Fecha de captura según GEP	Manejo detectado según WEPP	Fuente de información satelital – Propietarios (*)	Resolución espacial de sensores (**)	Porcentaje de cambio de manejo
Bosque Nativo	25/02/2016	Corte - Perenne	WolrView 4 - DigitalGlobe	0,31 m	53%
	10/7/2016	Plantación - Perenne	SPOT 6/7 -AIRBUS	1,5 m	44%
	3/3/2018	Regeneración de primer año	SPOT 6/7 -AIRBUS	1,5 m	56%
Agro pradera	27/09/2013	Corte - Perenne	SPOT 6/7 -AIRBUS	1,5 m	68%
	29/05/2018	Regeneración de quinto año	WolrView 4 - DigitalGlobe	0,31 m	75%
Matorral	22/03/2011	Corte - Perenne	WolrView 4 - DigitalGlobe	0,31 m	45%
	2/10/2013	Plantación - Anual	SPOT 6/7 -AIRBUS	1,5 m	71%
	3/3/2018	Plantación - Perenne	WolrView 4 - DigitalGlobe	0,31 m	44%
Plantación Forestal Joven	22/03/2011	Corte - Perenne	WolrView 4 - DigitalGlobe	0,31 m	70%
	27/09/2013	Corte - Perenne	SPOT 6/7 -AIRBUS	1,5 m	85%
Plantación Forestal Adulta	19/04/2018	Regeneración de cuarto año	WolrView 4 - DigitalGlobe	0,31 m	66%
Suelo desnudo	22/03/2011	Corte - Perenne	WolrView 4 - DigitalGlobe	0,31 m	74%
	27/09/2013	Corte - Perenne	SPOT 6/7 -AIRBUS	1,5 m	85%

** : información obtenida en *Satellite Imaging Corporation*, 2018.

Apéndice 13. Detalle y ejemplificación de procedimientos para utilizar y extraer información de imágenes aéreas históricas de Google Earth Pro.

A modo de ejemplificar el método de cambio de porcentaje de cobertura, se presentan las Figura 17 y Figura 18. En la primera, se detalla la distribución espacial (en polígonos) de la cobertura Bosque Nativo, obtenida a partir de la Clasificación Supervisada 2015 de Sotomayor (2017). Para cada una de las 6 coberturas de suelo, se hizo uso de las áreas calculadas previamente (Apéndice 12), se consideraron las imágenes satelitales disponibles en GEP para el periodo de modelación en el área de estudio, y se realizó la fotointerpretación para detectar cambios en el paisaje de la subcuenca. Dado que los archivos ROT permiten el ingreso de una sola fecha específica cuando se quiere detallar algún tipo de operación en el manejo de la vegetación, y que además las coberturas de suelo no varían uniformemente en cada periodo y fecha, se asumió el criterio que si la superficie de cada una de las coberturas variaba más del 20% en cada una de las fechas en que se detectaron cambios paisajísticos, mediante fotointerpretación, se aceptaba este cambio y se agregaría como un nuevo tipo de operación, cobertura y fecha de la imagen, en cada uno de los archivos ROT creados. Para el caso de ejemplo, en la cobertura Bosque Nativo se detectó en las imágenes una corta en la fecha 25/02/2016, y siguiendo el criterio mencionado anteriormente, se calcularon las áreas de los polígonos en que sí se detectaron cambios en esa fecha (Área 18.010 m², polígonos de contorno rojo en la Figura 18), y posteriormente se calculó el porcentaje respecto al total de la cobertura. (53% de cambio, de un total de 34.000 m² de superficie de toda la cobertura bosque nativo).

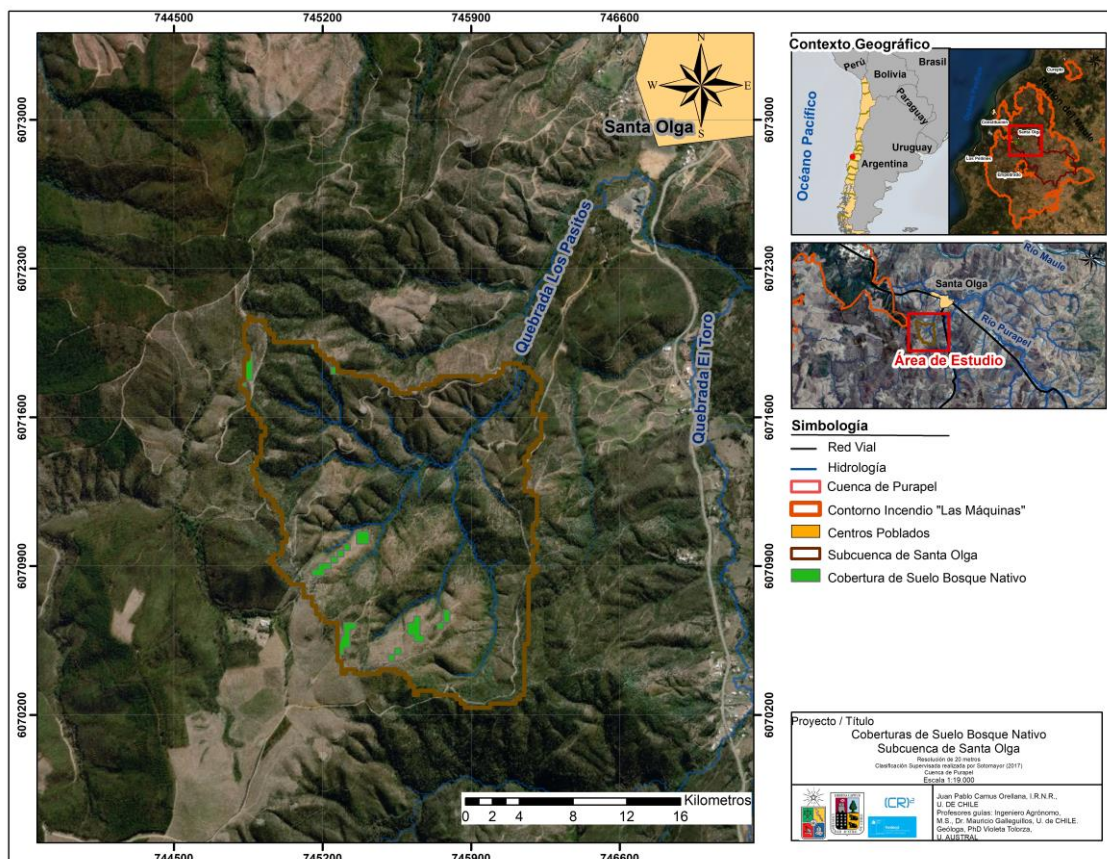


Figura 17. Distribución espacial de cobertura de suelo Bosque Nativo, Subcuenca de Santa Olga, en base a Clasificación Supervisada de Purapel 2015 (Sotomayor, 2017).

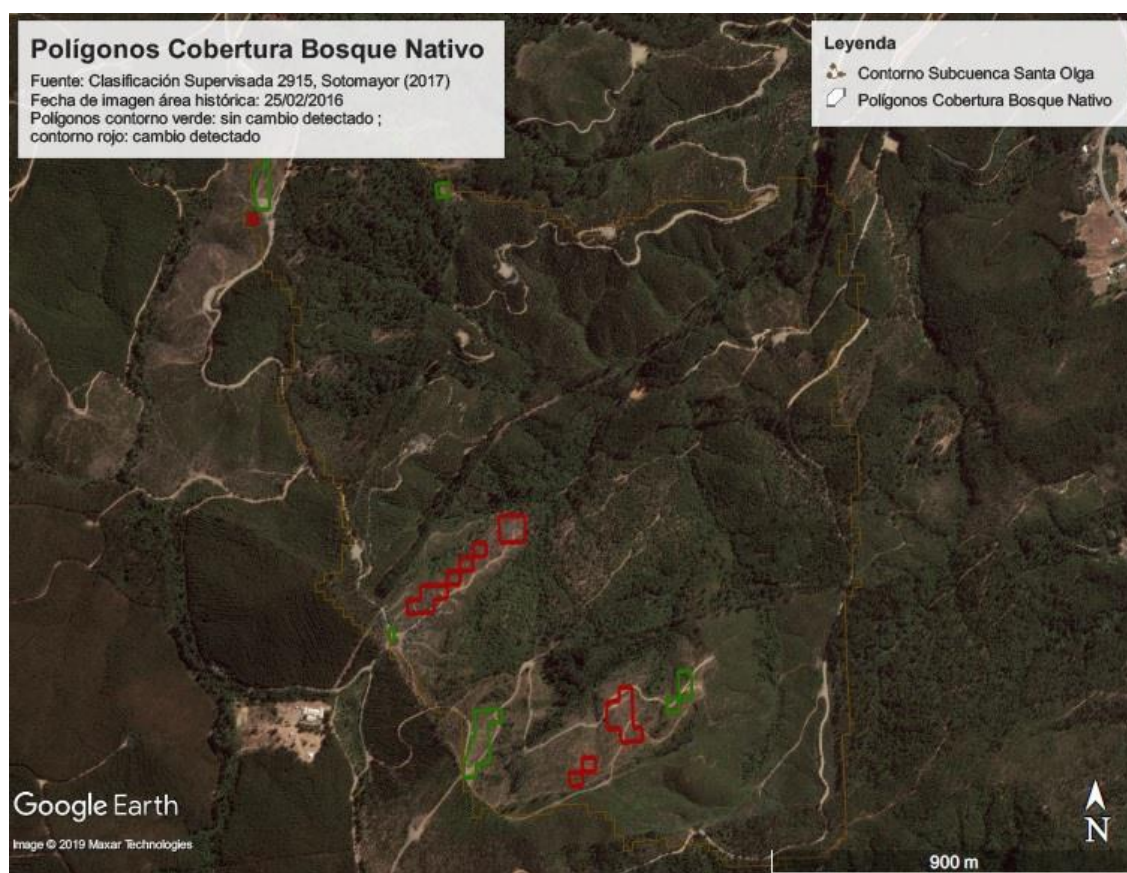
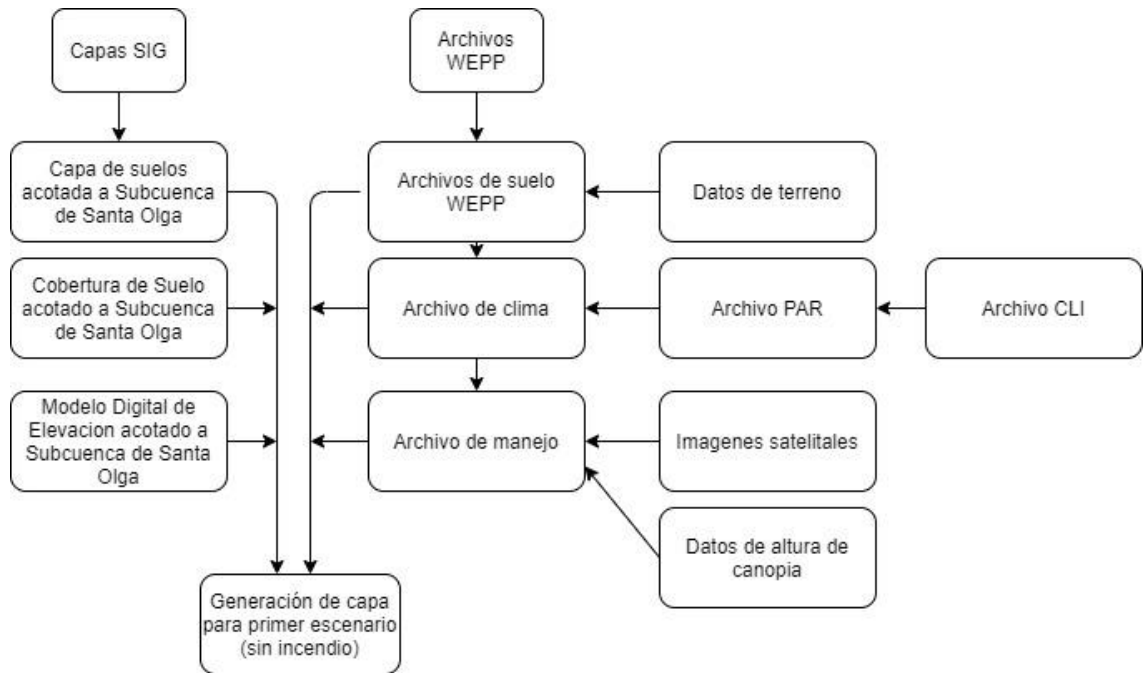


Figura 18. Cambios de manejo detectados para cobertura de suelo Bosque Nativo, en base a imagen de GEP del 25/02/2016.

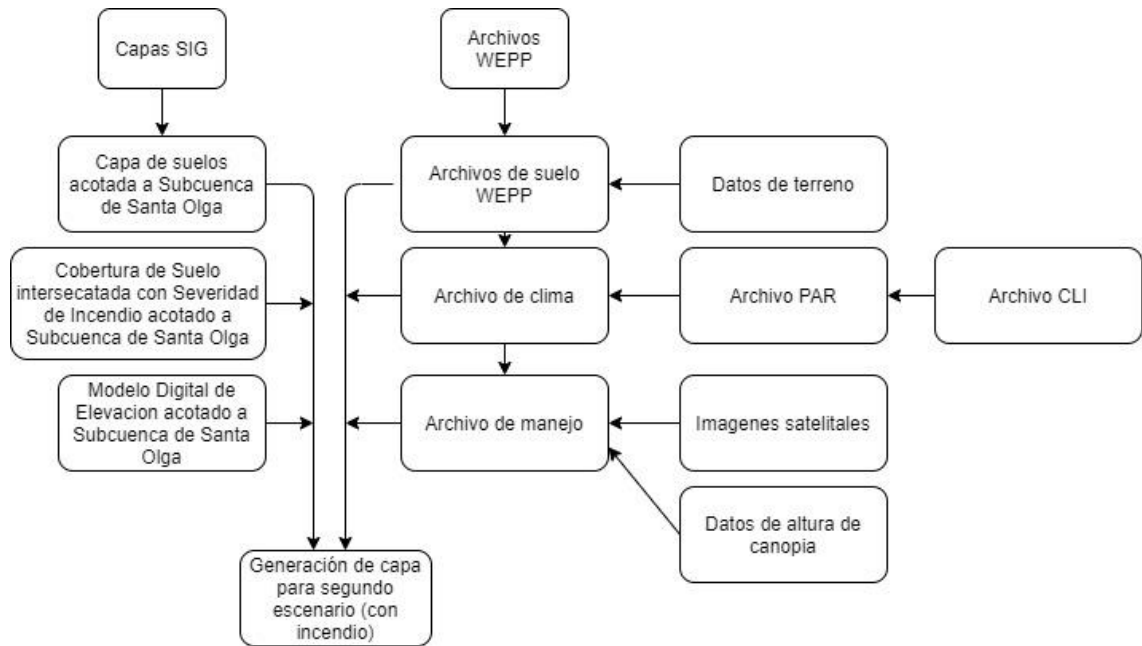
Cabe destacar, y tal como se mencionó en la metodología, se consideró que para un escenario sin incendio la vegetación presente en la subcuenca se mantiene invariable, es decir, ésta siguió un crecimiento natural lo cual se ve expresado en las alturas de éstas (en metros). Por ejemplo, en el archivo ROT de la cobertura Agropadera se detectó mediante fotointerpretación una “pradera de hierba corta” para la fecha 01/01/2015 (20 cm de altura), en la fecha 15/01/2017 (la fecha aproximada de inicio del incendio) se precisó que hubo “regeneración de año 4” (30 cm de altura) y finalmente para la fecha 29/05/2018 se detalló que hubo “regeneración de año 5” (35 cm de altura).

Respecto al escenario con la ocurrencia de incendio, se consideró que la fecha aproximada de su inicio (15/01/2017) fuese declarada en cada archivo ROT, en las 6 coberturas de suelo con severidad de incendio moderada y severa. Lo anterior implica que el incendio fue incorporado como un tipo de operación de Corte -Perenne y Muerte-Perenne, y que por lo tanto no se establecerían nuevas fechas de operación ni vegetación en la subcuenca después de ocurrido el incendio, y poder así modelar un escenario pesimista en que los efectos del incendio abarcaron hasta el fin del periodo de modelación, diciembre del 2018.

Apéndice 14. Diagrama de flujo de procedimientos desarrollados para datos de entrada modelo WEPP e interfaz geoespacial GeoWEPP, simulación sin incendio.

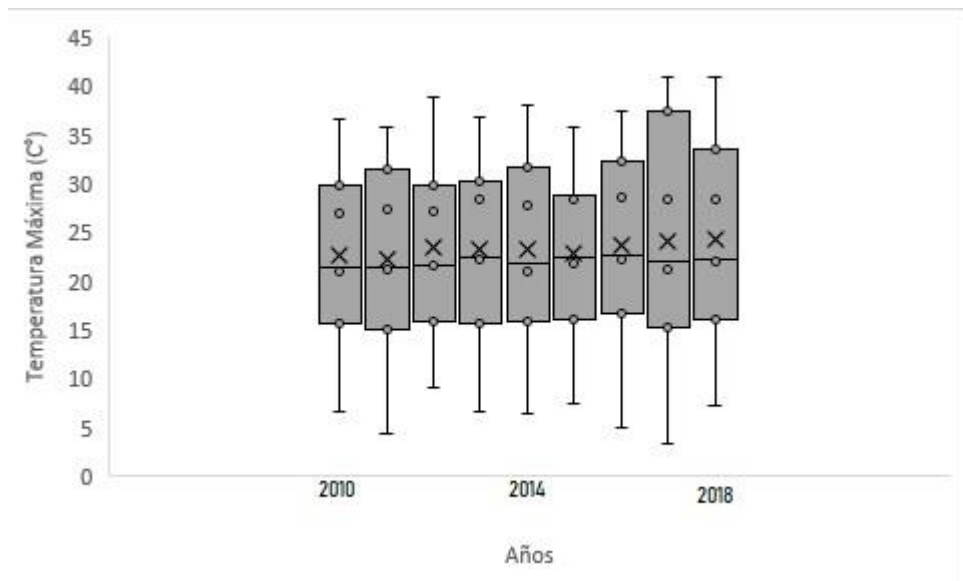
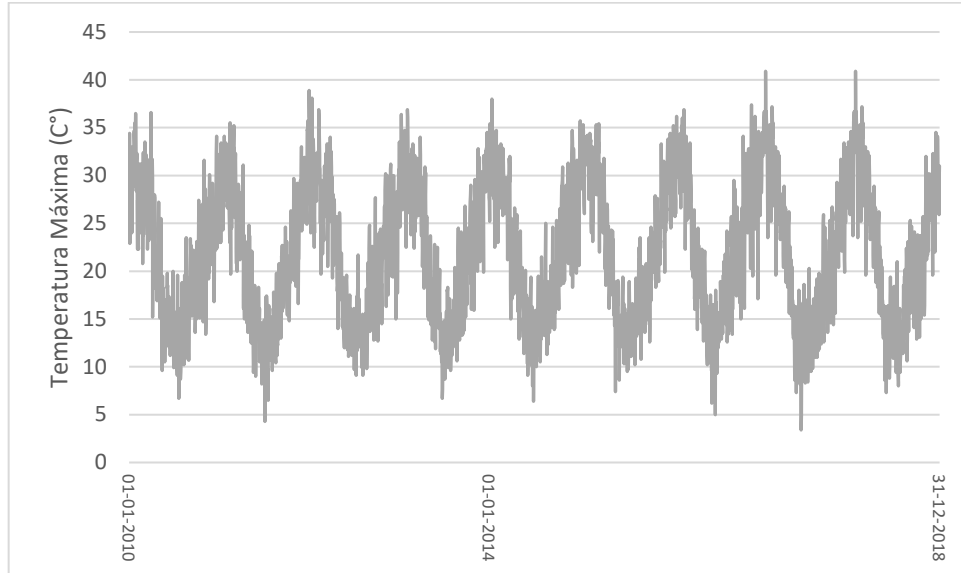


Apéndice 15. Diagrama de flujo de procedimientos desarrollados para datos de entrada modelo WEPP e interfaz geoespacial GeoWEPP, simulación con incendio.

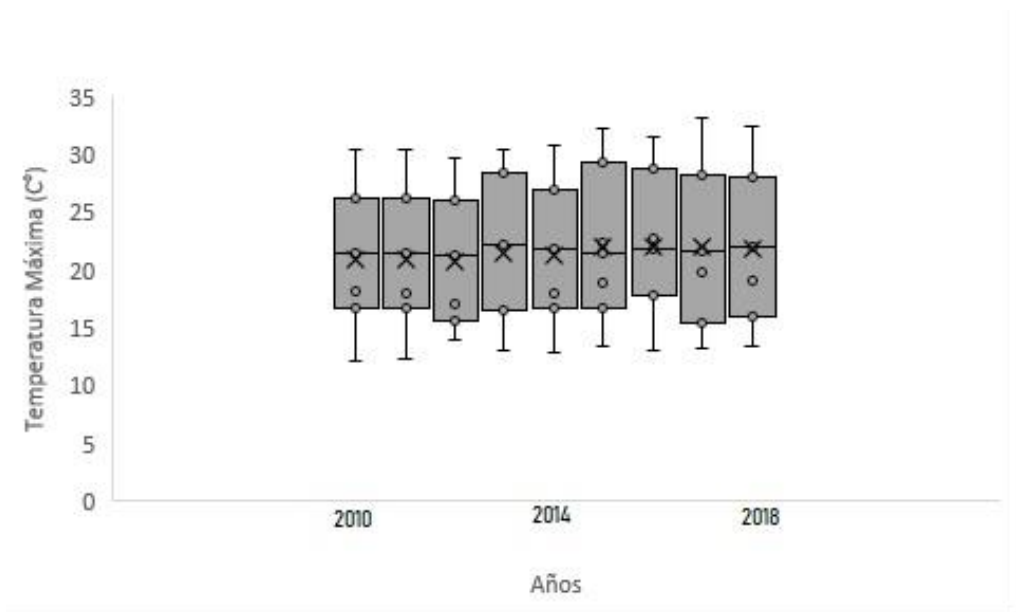
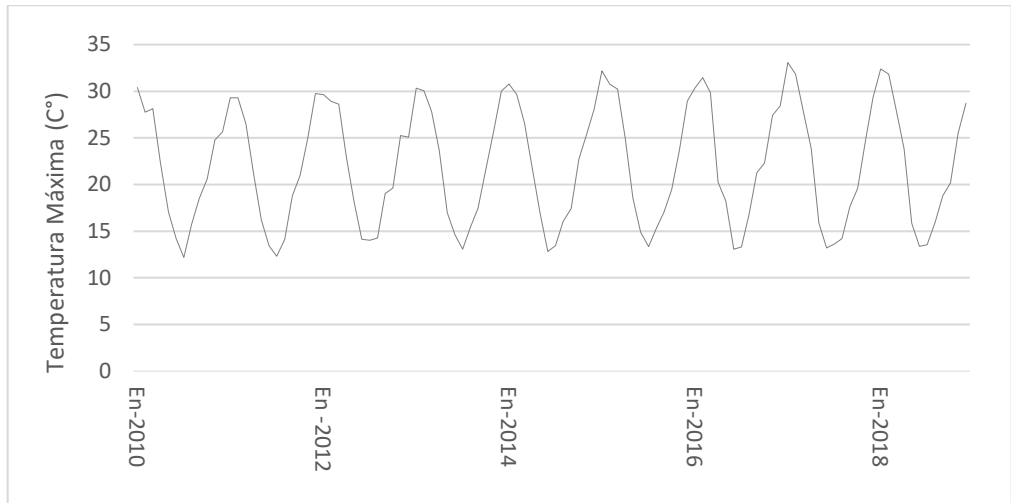


Apéndice 16.a. Serie de tiempo y boxplots anuales, mensuales y diarios de temperatura máxima.

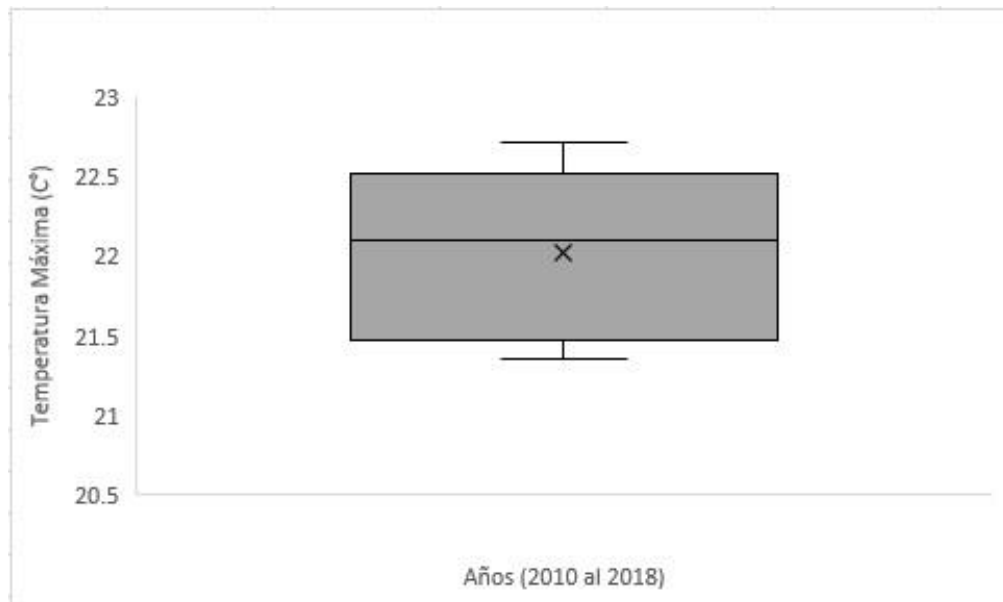
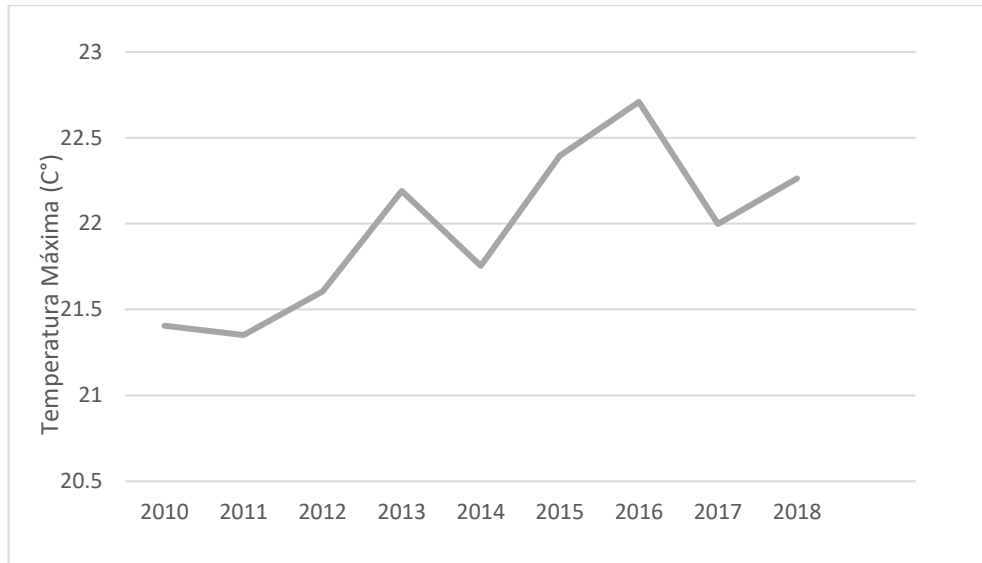
1) Temperatura máxima diaria.



2) Temperatura máxima mensual.

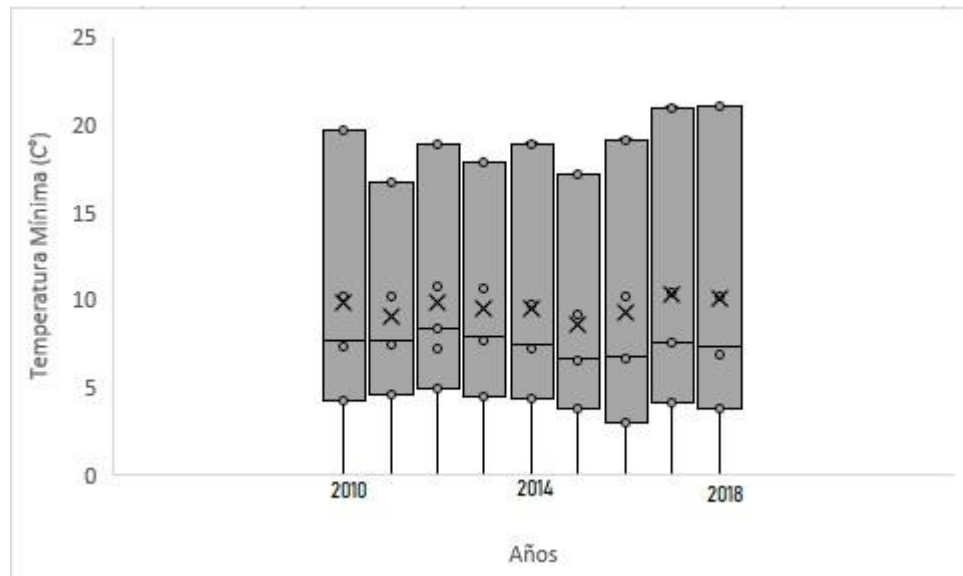
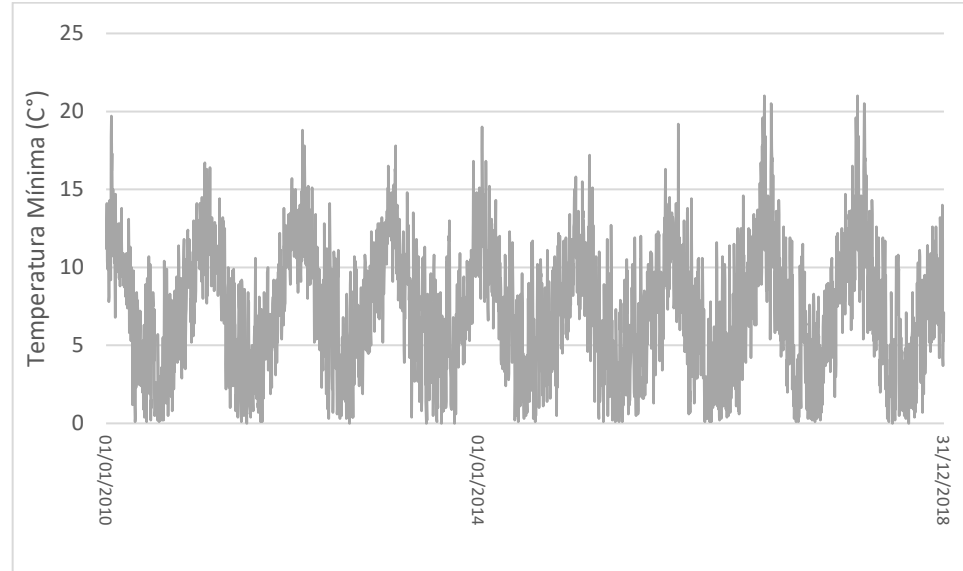


3) Temperatura máxima anual.

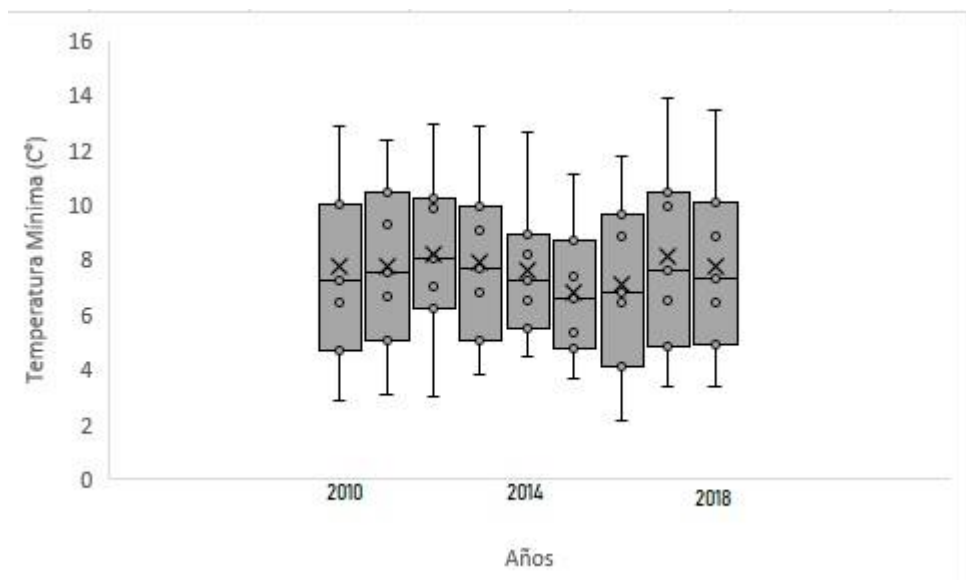
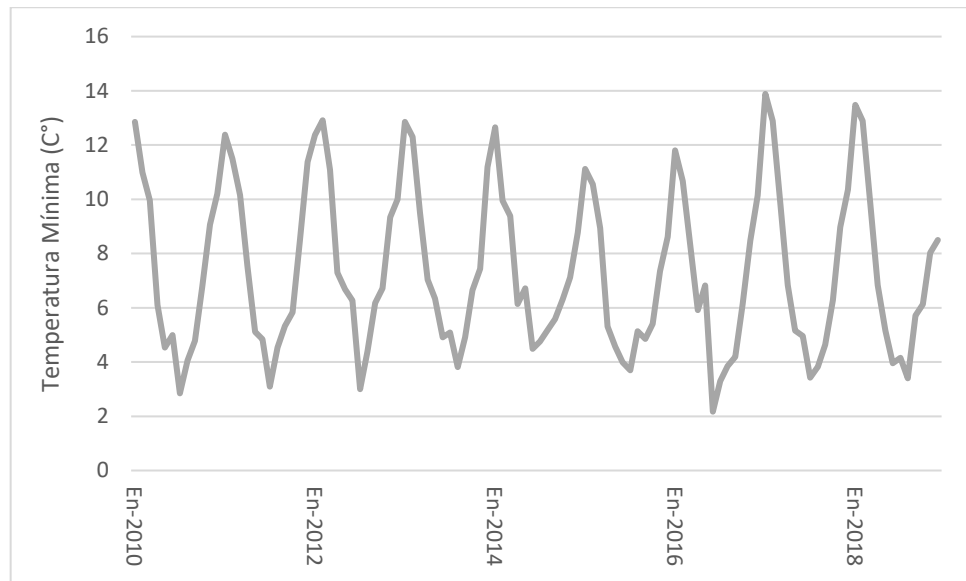


Apéndice 16.b. Serie de tiempo y boxplots anuales, mensuales y diarios de temperatura mínima.

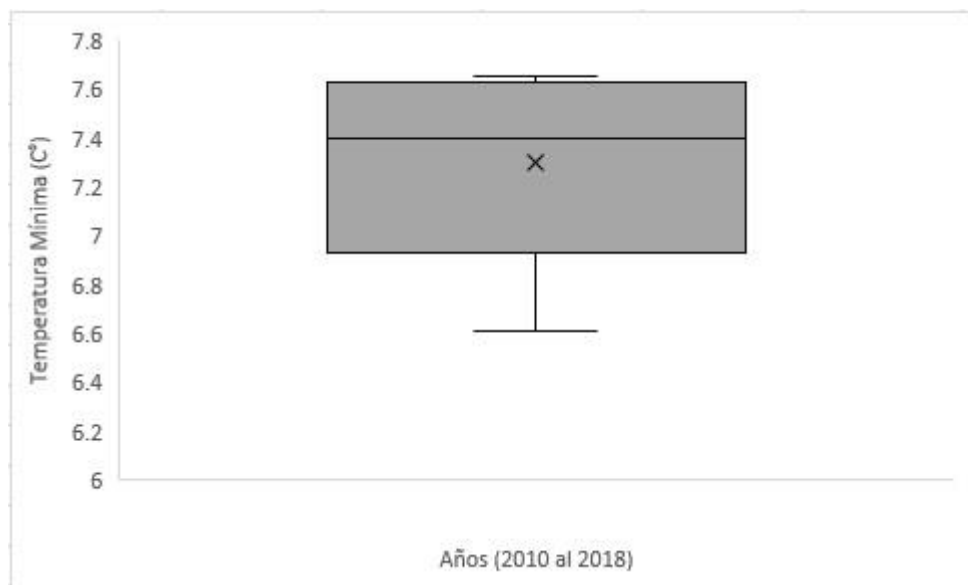
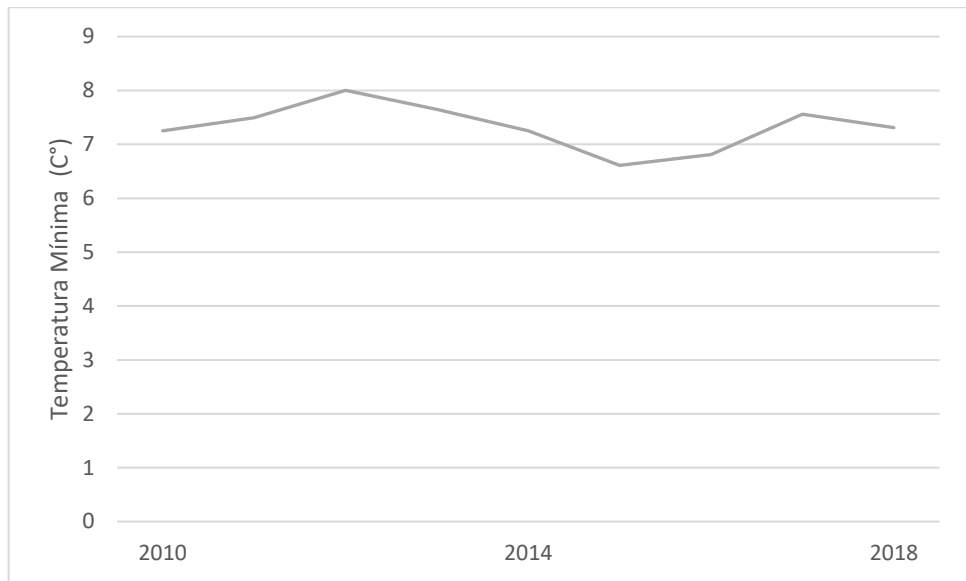
1) Temperatura mínima diaria.



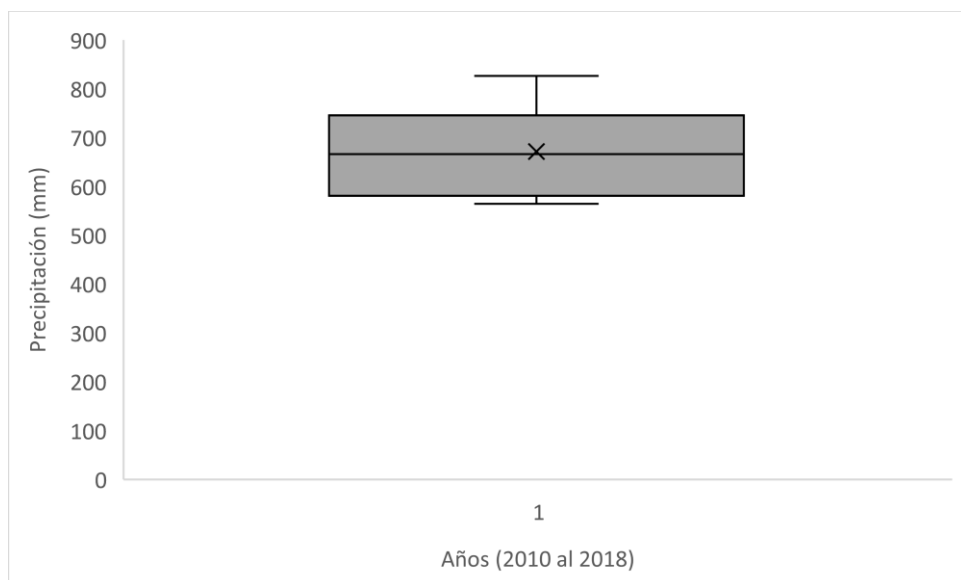
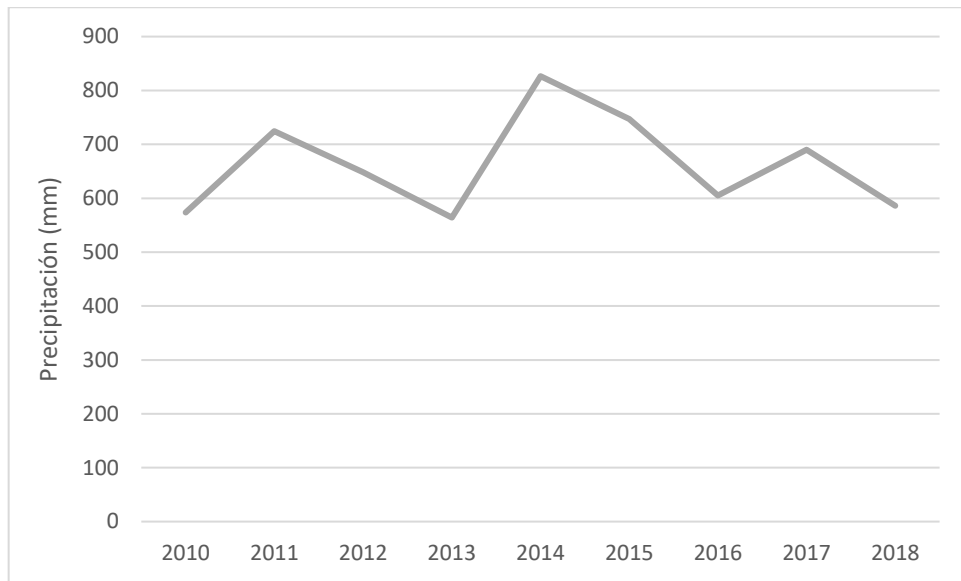
2) Temperatura mínima mensual.



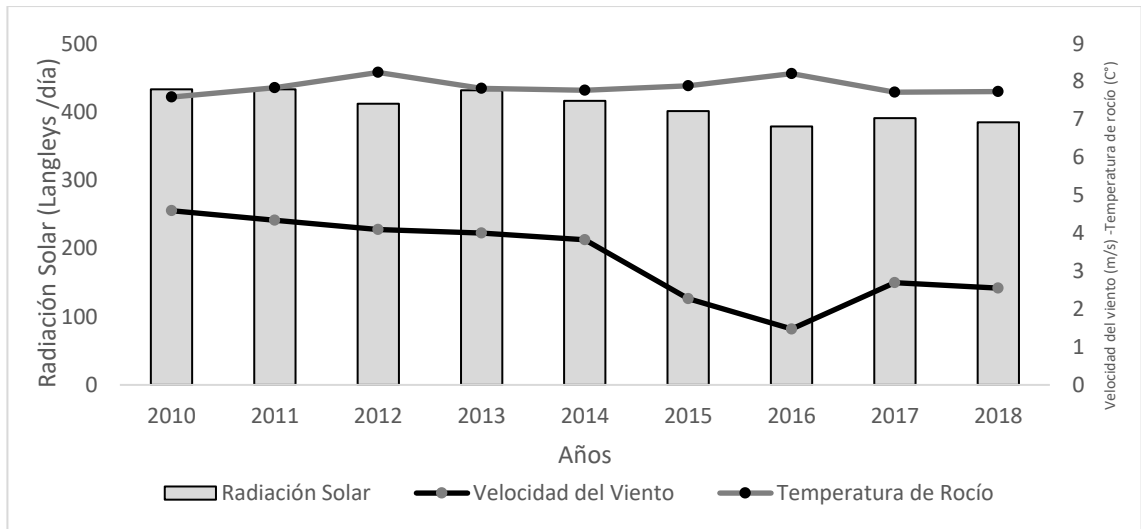
3) Temperatura mínima anual.



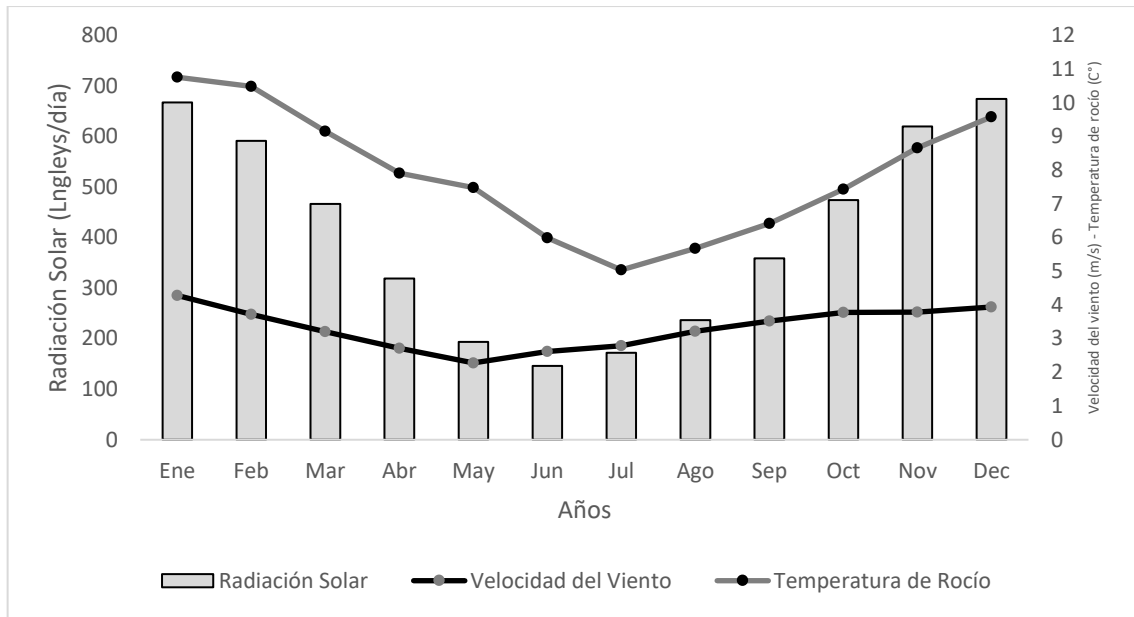
Apéndice 16.c. Serie de tiempo y boxplots anual de precipitaciones.



Apéndice 16.d. Serie de tiempo anual de radiación solar, temperatura de rocío y velocidad del viento, periodo 2010-2018 en estación Sauzal.



Apéndice 16.e. Serie de tiempo mensual de radiación solar, temperatura de rocío y velocidad del viento, periodo 2010-2018 en estación Sauzal.



Apéndice 17.a. Archivo de parámetro de suelo WEPP (archivos SOL) de la serie de suelo Alto Colorado para representar con incendio con mejor valor del estadístico R^2 (variación porcentual de sensibilidad +10).

Soil File Name:	Soil Texture:	Albedo:	Initial Sat. Level: (%)
Alto_Colorado_+1	sandy clay loam	0.1034	25
Interrill Erodibility:	4.59147e+006 (Kg*s/m**4)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Rill Erodibility:	0.0078 (s/m)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Critical Shear:	3.85 (Pa)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Eff. Hydr. Conductivity:	5.05 (mm/h)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/1)	Rock(%)
1	250	24.8	30.0	4.400	20.7	2.0
2	550	20.5	38.2	1.170	0.0	0.0
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						

Use Restricting Layer

Anisotropy Ratio: 25 Ksat (mm/h): 0

English Units

Print Save As Save Cancel Help

Apéndice 17.b. Archivo de parámetro de suelo WEPP (archivos SOL) de la serie de suelo Constitución para representar con incendio con mejor valor del estadístico R^2 (variación porcentual de sensibilidad +10).

Soil File Name:	Soil Texture:	Albedo:	Initial Sat. Level: (%)
Constitucion_+10	sandy clay loam	0.01	25
Interrill Erodibility:	6.67759e+006 (Kg*s/m**4)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Rill Erodibility:	0.0079 (s/m)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Critical Shear:	4.433 (Pa)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Eff. Hydr. Conductivity:	1.135 (mm/h)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/1)	Rock(%)
1	200	36.9	36.5	10.872	20.7	2.0
2	400	18.8	54.1	6.426	0.0	0.0
3	600	36.7	51.6	4.724	0.0	0.0
4						
5						
6						
7						
8						
9						

Use Restricting Layer

Anisotropy Ratio: 25 Ksat (mm/h): 0

English Units

Print Save As Save Cancel Help

Apéndice 17.c. Archivo de parámetro de suelo WEPP (archivos SOL) de la serie de suelo Trehuaco para representar con incendio con mejor valor del estadístico R² (variación porcentual de sensibilidad +10).

Soil File Name:	Soil Texture:	Albedo:	Initial Sat. Level: (%)
Trehuaco_+10	loam silty clay	0.012	25
Interrill Erodibility:	4.23368e+006 (Kg*s/m**4)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Rill Erodibility:	0.0076 (s/m)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Critical Shear:	3.85 (Pa)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate
Eff. Hydr. Conductivity:	2.1 (mm/h)	<input type="checkbox"/>	Have Model Calculate

Layer	Depth(mm)	Sand(%)	Clay(%)	Organic(%)	CEC(meq/1)	Rock(%)
1	200	27.7	26.7	9.790	20.7	2.0
2	400	39.7	43.6	4.750	0.0	0.0
3	599.9	20.8	51.8	3.560	0.0	0.0
4						
5						
6						
7						
8						
9						

Use Restricting Layer

Anisotropy Ratio: 25 Ksat (mm/h): 0

English Units

Print Save As Save Cancel Help

Apéndice 18. Valores de simulación medios anuales, para 9 años de simulación, para el primer escenario (sin incendio), mediante el método *Watershed* de WEPP para las laderas representativas de la subcuenca de Santa Olga.

Laderas	Volumen de escorrentía (m ³)	Volumen flujo subsUPERficial (m ³)	Pérdida		Deposición de sedimentos (kg)
			de suelo (Kg)	Producción de sedimentos (kg)	
1	3.531,34	18,21	0	0	0
2	2.553,88	15,25	0	0	0
3	418,92	6,27	0	0	0
4	485,48	10,08	0	0	0
5	1.017,54	3,05	0	0	0
6	190,39	3,88	0	0	0
7	199,79	3,71	0	0	0
8	1.689,38	13,1	0	0	0
9	2.022,76	13,62	0	0	0
10	328,61	5,08	0	0	0
11	769,61	6	0	0	0
12	771,62	2,2	0	0	0
13	33	1,57	0	0	0
14	1.092,01	6,82	0	0	0
15	1.268,52	10,71	0	0	0
16	1.209,73	13,34	0	0	0
17	2.692,57	5,43	0	0	0
18	878,88	4,22	0	0	0
19	849,63	2,78	0	0	0
20	15,99	1,37	0	0	0
21	1.655,56	11,77	0	0	0
22	716,56	10,52	0	0	0
23	1.050,57	5,17	260,39	260,38	0
24	1.935,37	12,48	0	0	0
25	1.515,85	12,44	0	0	0
26	840,4	5,53	0	0	0
27	768,5	5,57	0	0	0
28	263,1	3,58	0	0	0
29	35,48	1,67	0	0	0
30	235,05	1,48	0	0	0
31	32,52	3,92	0	0	0
32	961,54	3,8	0	0	0
33	16,91	0,66	0	0	0
34	15,25	0,37	0	0	0
35	1.520,85	10,75	0	0	0
36	1.743,92	12,64	0	0	0
37	209,67	5,3	0	0	0

38	344,02	6,17	0	0	0
39	55,66	2,21	0	0	0
40	1.156,97	5,63	0	0	0
41	315,18	7,49	0	0	0
42	399,59	8,52	0	0	0
43	1.093,73	12	0	0	0
44	786,93	6,33	0	0	0
45	340,28	6,97	0	0	0
46	169,68	6,57	0	0	0
47	594,17	9,63	0	0	0
48	865,67	9,3	93,2	93,2	0
49	1.044,27	5,33	0	0	0
50	868,72	11,48	358,89	358,88	0
51	150,01	6,86	0	0	0
52	365,42	5,28	0	0	0
53	296,97	6,2	23,49	23,49	0
54	1.507,48	9,86	0	0	0
55	1.000,89	6,44	5.203,15	5.203,11	0
56	2.313,52	15,44	0	0	0
57	504,37	8,57	0	0	0
58	834,71	9,19	0	0	0
59	73,01	1,71	0	0	0
60	858,19	6,92	0	0	0
61	17,67	2,42	0	0	0
62	114,08	2,55	0	0	0
63	34,76	3,09	0	0	0
64	850,56	5,88	6.331,22	6.331,26	0
65	110,82	8,32	54,28	54,28	0
66	322,9	13,29	0	0	0
67	865,61	4,55	6.100,68	6.100,52	0
68	208,57	5,61	0	0	0
69	43,5	8,24	24,11	24,11	0
70	875,28	4,41	733,23	733,24	0
71	237,59	4,43	0	0	0
72	127,8	4,49	0	0	0
73	963,13	3,64	0	0	0
74	1.019,49	10,22	0	0	0
75	576,48	7,15	0	0	0

Apéndice 19. Valores de simulación medios anuales, para 9 años de simulación, para el primer escenario (con incendio y mejor ajuste a datos observados), mediante el método *Watershed* de WEPP para las laderas representativas de la subcuenca de Santa Olga.

Laderas	Volumen de escorrentía (m ³)	Volumen flujo subsuperficial (m ³)	Pérdida de suelo (Kg)	Producción de sedimentos (kg)	Deposición de sedimentos (kg)
1	3.504,06	17,99	155,7	155,7	0
2	2.448,78	14,22	121,09	121,08	0
3	400,09	5,81	0	0	0
4	465,1	9,27	0	0	0
5	1.004,8	2,92	0	0	0
6	181,7	4,56	0,34	0,34	0
7	198,07	3,59	0	0	0
8	1.641,19	16,98	20.893,29	20.893,33	0
9	1.992,42	15,29	38.452,99	38.452,59	0
10	341,54	6,14	801,57	801,57	0
11	778,65	7,01	8.250,11	8.250,26	0
12	828,41	2,57	379,29	379,29	0
13	32,96	1,87	0,78	0,78	0
14	1.081,53	6,54	0	0	0
15	1.257,07	10,43	0	0	0
16	1.197,49	13,18	0	0	0
17	2.663,77	5,32	0	0	0
18	871,61	4,17	0	0	0
19	841,72	2,69	84,06	84,06	0
20	15,87	1,31	0	0	0
21	1.604,4	15,26	31.179,37	31.179,08	0
22	717,28	10,86	0	0	0
23	1.062,35	5,32	981,4	981,4	0
24	1.939,63	14,44	37.903,22	37.903,31	0
25	1.535,25	12,58	0,7	0,7	0
26	832,81	5,35	0	0	0
27	762,61	5,43	22,95	22,95	0
28	257,57	3,34	0,08	0,08	0
29	33,67	1,78	0	0	0
30	229,79	1,38	5,79	5,79	0
31	32,35	3,69	0	0	0
32	913,88	4,15	4.246,37	4.246,42	0
33	16,06	0,74	0	0	0
34	15,02	0,34	0	0	0
35	1.445,11	12,49	1.814,18	1.814,18	0
36	1.730,37	12,48	394,12	394,12	0

37	212,27	5,33	0	0	0
38	332,21	7,86	2.668,72	2.668,68	0
39	54,47	2,68	86,38	86,38	0
40	1.117,51	7,23	54.953,72	54.953,58	0
41	319,6	7,63	0	0	0
42	386,33	11,04	1.580,21	1.580,22	0
43	1.085,92	10,79	31,67	31,67	0
44	762,64	8,21	8.187,66	8.187,62	0
45	343,73	6,97	0	0	0
46	171,29	6,88	0	0	0
47	600,01	9,67	84,09	84,09	0
48	878,19	9,16	549,39	549,39	0
49	1.036,2	5,26	187,16	187,16	0
50	866,26	11,28	1.332,17	1.332,17	0
51	150,87	7,99	0	0	0
52	362,77	4,84	0	0	0
53	294,32	5,73	66,14	66,14	0
54	1.604,78	11,97	4.013	4.013,06	0
55	992,56	6,48	11.278,66	11.278,75	0
56	2.295,56	15,25	14,05	14,05	0
57	500,55	8,29	0	0	0
58	828,35	8,99	0	0	0
59	73,77	1,82	90,43	90,43	0
60	829,04	6,17	18.735,04	18.734,9	0
61	16,42	3,15	0	0	0
62	110,27	3,32	300,52	300,52	0
63	34,99	3,31	0,08	0,08	0
64	843,48	5,91	11.928,53	11.928,55	0
65	109,81	8,33	47,6	47,6	0
66	307,41	11,1	1.085,54	1.085,54	0
67	858,42	4,58	11.610,33	11.610,32	0
68	198,14	6,84	10,93	10,93	0
69	43,03	8,25	21,29	21,29	0
70	867,98	4,44	5.494,46	5.494,45	0
71	235,81	4,28	0	0	0
72	130,66	5,55	0	0	0
73	950,91	3,49	0	0	0
74	1.010,05	9,89	0	0	0
75	571,05	6,85	0	0	0

Apéndice 20. Valores de simulación medios anuales, para 9 años de simulación, para el primer escenario (sin incendio), mediante el método *Watershed* de WEPP para los canales representativos de la subcuenca de Santa Olga.

Canales	Producción de sedimentos (kg)	Perdida de suelo(kg)
1	4.500	4.462,1
2	2.100	1.358,2
3	8.400	2.316
4	10.100	3.749,1
5	18.100	1.991,3
6	700	681,6
7	18.500	2.498,7
8	32.700	13.727,2
9	16.400	11.228,3
10	55.400	9.158,4
11	3.100	2.769,8
12	3.700	3.573,8
13	13.200	6.361,1
14	5.300	5.277
15	1.000	980,3
16	10.600	4.332,5
17	39.600	15.953,5
18	73.900	30,9
19	200	178
20	76.900	3.494,7
21	92.600	26.609,4
22	8.000	7.990,8
23	600	303
24	22.800	14.235,1
25	300	346,8
26	3.500	3.531,8
27	17.700	13.810,5
28	100	81,9
29	27.100	9.277,2
30	70.400	20.514,6
31	168.400	45.603,2
32	3.700	3.727,5
33	197.800	45.408,5

Apéndice 21. Valores de simulación medios anuales, para 9 años de simulación, para el primer escenario (con incendio y mejor ajuste a datos observados), mediante el método *Watershed* de WEPP para los canales representativos de la subcuenca de Santa Olga.

Canales	Producción de sedimentos (kg)	Perdida de suelo (kg)
1	4.400	4.412,2
2	6.800	1.348,9
3	13.900	2.267
4	16.800	3.687,4
5	26.600	11.946,3
6	19.400	654,5
7	44.200	8.070,7
8	68.500	29.110,6
9	25.200	11.202,6
10	94.100	8.980,8
11	4.300	2.757,6
12	4.200	3.611,6
13	23.200	6.310,4
14	6.900	5.231,6
15	56.000	940,4
16	60.200	52.797,1
17	123.400	72.182,2
18	192.000	3,7
19	4.400	167,4
20	176.900	7.001,3
21	206.900	72.024,1
22	46.100	7.987
23	1.300	305,4
24	60.500	51.177,1
25	400	342,9
26	3.500	3.497,1
27	17.600	13.675,2
28	500	89,8
29	34.600	11.191
30	159.400	31.640,4
31	363.600	9.963,3
32	3.600	3.639,8
33	413.600	174.509,8