

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Forestal

Tesis para optar por el grado de Licenciado en
Ingeniería Forestal

**Efectos del cambio de uso del suelo en el
régimen de caudal de la cuenca del Río
Vergara, Región del Bío-Bío, Chile.**

Sebastián Paz Mora

Concepción, Chile.

2015

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Escuela de Ingeniería Forestal



Tesis para optar por el grado de Licenciado en
Ingeniería Forestal

**Efectos del cambio de uso del suelo en el
régimen de caudal de la cuenca del Río
Vergara, Región del Bío-Bío, Chile.**

Sebastián Paz Mora

Concepción, Chile

2015

Efectos del cambio de uso del suelo en el régimen de caudal de la cuenca del Río Vergara, Región del Bío-Bío, Chile.

Resumen

En los últimos siglos, el ser humano ha transformado gran parte de la superficie del planeta modelando el paisaje. Esto ha provocado la alteración de diferentes procesos ecosistémicos. La deforestación, los incendios forestales, el aumento en la agricultura, el abandono de los cultivos y los procesos de urbanización afectan distintas variables del régimen hídrico. En el centro-sur de Chile las principales causas de los cambios en el paisaje han sido la apertura de tierras agrícolas y el aumento en la actividad forestal de especies exóticas como *Pinus spp.* y *Eucalyptus spp.* las cuales dominan el paisaje. En este estudio se analizaron los patrones de cambio de uso del suelo y cómo han afectado el régimen de caudal de la cuenca del Río Vergara ubicada entre las regiones del Bío-Bío y la Araucanía en Chile. Se realizó una comparación entre los mapas de cobertura del suelo de 1986 y 2011 y se calibró un modelo hidrológico en N-SPECT de caudal y sedimentos en suspensión para la cuenca. Los resultados confirman que el caudal y la erosión se vieron afectados por la transformación de un paisaje agrícola a uno forestal disminuyendo por igual las dos variables. Se concluyó que los cambios del paisaje pueden afectar los componentes hidrológicos a futuro.

Palabras claves: cobertura del suelo, hidrología, modelo hidrológico, servicios ecosistémicos, erosión, paisaje, Bío-Bío, Araucanía, centro-sur Chile.

Efectos del cambio de uso del suelo en el régimen de caudal de la cuenca del Río Vergara, Región del Bío-Bío, Chile.

Abstract

In recent centuries, humans have transformed much of the planet's surface modeling the landscape. In consequence, he has altered the dynamics of the hydrological cycle. Deforestation, forest fires, increased agriculture, abandonment of crops and urbanization are different variables affecting water regimes. In the south-central Chile the main causes of changes in the landscape have been the opening of agricultural land and the increasing of forestry with exotic species such as *Pinus spp.* and *Eucalyptus spp.* which dominate the landscape. In this study the patterns of change in land use were analyzed and how they have affected the flow regime of the Vergara's river basin located between the Bío - Bío and Araucanía in Chile. A comparison between layers of cover in 1986 and 2011 was performed and a hydrological model N -SPECT about water demand and erosion in the basin was created. The results confirm that the flow and erosion were affected by the transformation of an agricultural landscape to one full of forest, decreasing alike the two variables. It was concluded that the changes on the landscape affect directly the hydrological component in the future.

Key words: Landscape, deforestation, wáter regimes, hidrologycal model, erosion, basin, south-central Chile, Bío-Bío, Araucanía, Vergara.

Esta tesis de graduación ha sido aceptada por el Tribunal Evaluador de la Escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica y aprobada por el mismo como requisito parcial para optar por el grado de Licenciado en Ingeniería Forestal

Efectos del cambio de uso del suelo en el régimen de caudal de la cuenca del Río Vergara, Región del Biobío, Chile.

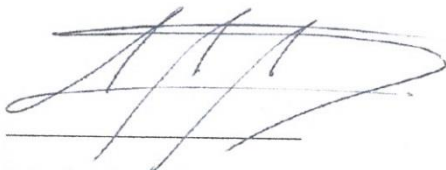
Miembros del Tribunal



Dorian Carvajal Venegas Lic.

Escuela de Ingeniería Forestal

Director de Tesis

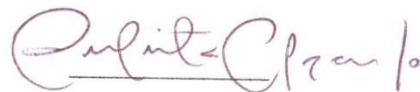


Cristián Echeverría, Ph.D.

Facultad de Ciencias Forestales

Universidad de Concepción, Chile

Lector de Tesis



Ana Julieta Calvo Obando, Lic

Escuela de Ingeniería Forestal

Lector de Tesis

Dedicatoria

*A mi madre Margarita que siempre ha estado ahí
para apoyarme incondicionalmente
y por su ejemplo de lucha
a pesar de las adversidades.
A Dios por darme la capacidad
de buscar oportunidades
para ser un mejor ser humano.*

Agradecimientos

A Dios por su inmenso amor.

A mi madre por su apoyo incondicional y a mi padre por su ayuda
en este viaje.

A Lucía por siempre estar ahí en los momentos difíciles con su
cariño y ayudarme a ser mejor.

A Dorian Carvajal por su guía, correcciones y apoyo durante todo el
proceso y a Ana Julieta Calvo por sus correcciones como Lectora.

A Cristian Echeverría por ser mi guía en mi viaje a Chile y
enseñarme más sobre mi carrera.

A Rodrigo Fuentes y todos los compañeros del LEP que me trataron
como si estuviera en casa.

A mi familia por siempre brindarme su apoyo.

A mis amigos, compañeros y profesores por sus buenos deseos y
compañía durante estos seis años de carrera.

A la Universidad de Concepción por dejarme realizar mi trabajo en
sus instalaciones.

A todas las lindas personas que conocí en Chile por hacer esta
experiencia sumamente agradable y enriquecedora.

A la VIE por el apoyo para realizar mis estudios en el extranjero.

Índice General

Resumen.....	3
Abstract	4
Miembros del Tribunal.....	5
<i>Dedicatoria</i>	6
Agradecimientos	7
Índice de Cuadros.....	10
Índice de Figuras	11
Introducción	12
Objetivos	14
Objetivo General:	14
Objetivos Específicos:.....	14
Materiales y métodos:	14
Área de Estudio	14
Modelación Hidrográfica.....	15
Parametrización de N-SPECT.....	16
Toma de Datos de Control	18
Resultados.....	19
Cambios en la cobertura de uso del suelo	19
Validación del modelo hidrológico.....	21
Cambios en el caudal a nivel de cuenca y subcuenca.....	22
Cambio en la erosión a nivel de sub cuenca	22
Discusión	24
Cambios en la cobertura de uso del suelo	24
Relación espacial entre la cobertura de uso del suelo y el caudal.....	25
Relación espacial entre la cobertura y la erosión	26
Conclusiones	27
Recomendaciones	28
Anexos.....	29
Bibliografía	30

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Superficie de coberturas de los usos del suelo para 1986 y 2011..	20
Cuadro 2. Caudal aforado (1986), modelado (2011) (m ³ /s) y porcentajes de disminución para cuatro estaciones en la cuenca del río Vergara, centro-sur de Chile.	22
Cuadro 3. Erosión y cobertura predominante para cuatro sub cuencas en la cuenca del río Vergara, Chile.	23

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de la cuenca del Río Vergara en el año 2014, Región del Bío-Bío y la Araucanía, Chile. Donde: A. Río Malleco en Collipullí, B. Río Vergara en Tijeral, C. Río Minico en Longitudinal y D. Río Renaico en Longitudinal representan a las sub-cuencas.....	15
Figura 2. Mapa del caudal generado por el modelo calibrado en N-SPECT para la cuenca del río Vergara, Región del Bío-Bío, Chile..	19
Figura 3. Mapas temáticos de cobertura para los años 1986 y 2011 en la cuenca del río Vergara, Chile.....	20
Figura 4. Gráficos de contribución al cambio neto en superficie desde 1986 al 2011.	21
Figura 5. Comparación entre los caudales reales y modelados para el año utilizando cinco puntos del 2011 y cuatro del 2014 de la cuenca del río Vergara, Chile.	22
Figura 6. Relación existente entre la disminución de las tasas de sedimentación de cada una de las sub cuencas y la degradación del bosque adulto (cambio de superficie de bosque nativo a matorrales), ponderado por la superficie de cada sub cuenca.....	23

Introducción

Los cambios en el uso del suelo son provocados por actividades humanas las cuales han sido catalogadas como la fuerza modeladora más grande de la biósfera (Valdez, 2012). Estas se encuentran por encima de las fuerzas naturales que son responsables de la gran mayoría de cambios modernos en los flujos y estados de la biosfera (López *et al.*, 2009). Según Reid *et al.* (2000), más de la tercera parte de la superficie de nuestro planeta presenta cultivos y pastos; el cambio de bosque a este tipo de cobertura en nuestro planeta ha afectado directamente a los ríos, ya que para la subsistencia de los cultivos y pastos se utiliza un 25% del agua que fluye (Balvanera y Cotler, 2007).

Pascual (2002), menciona que las intervenciones antrópicas en los distintos usos del suelo moldean el paisaje y como consecuencia de esto, alteran diferentes servicios ecosistémicos. Lambin (1997), menciona tres cambios en los ecosistemas por causa de las actividades humanas: (1) el cambio en la cubierta superficial debido a la alteración radical del uso del suelo existente, como por ejemplo la deforestación y la urbanización; (2) el deterioro de la superficie por procesos como la erosión, salinización y contaminación; y por último (3) la intensificación de técnicas de cultivo como irrigación, uso de fertilizantes o la integración de diferentes actividades productivas. En particular, los cambios en el uso del suelo pueden influir en la dinámica del ciclo hidrológico debido a que afectan componentes del sistema como la transpiración, la infiltración, la interceptación y la evaporación.

Estos cambios tienden a ser acumulativos y expresan una continuidad en el tiempo, por lo cual, al intentar establecer un valor para el impacto en el régimen hídrico, la escala de trabajo aumenta desde una parcela experimental a una unidad hidrológica llamada cuenca de drenaje (Pascual, 2002).

Entre los factores de cambio se encuentran los incendios forestales, los cuales generan un gran impacto en el drenaje de la cuenca por sus efectos inmediatos en el aumento de la escorrentía, además que va de la mano con la erosión de los suelos y por consecuencia la alteración del caudal (Morris y Moses, 1987; Imeson *et al.*, 1992; Lavabre *et al.*, 1993; Coelho *et al.*, 1995; Keller *et al.*, 1997; Scott, 1997).

Conjuntamente con los incendios forestales, aspectos como la deforestación (Bari *et al.*, 1996), las prácticas agrícolas (Reid *et al.*, 1990), el abandono de los cultivos (Romero *et al.*, 1998) y la incidencia de los procesos de urbanización (Sala y Imbar, 1992), representan alteraciones considerables en las condiciones naturales y por consiguiente ocurren cambios en la escorrentía, porosidad del terreno, almacenaje hídrico del suelo y erosión, además de riesgos de inundaciones. Por esta razón se ha creado la necesidad de estudiar a fondo el

comportamiento de los ecosistemas, para así visualizar cuales son los servicios que estos pueden ofrecer y como la actividad humana asociada a las transformaciones en la cobertura de uso del suelo los afecta.

Los primeros estudios sobre las transformaciones antropogénicas del paisaje en Chile se realizaron en la zona central de este país a fines de la década de los setenta (Fuentes & Hajek, 1979), posteriormente en la década de los ochenta se dieron nuevas contribuciones en conocimiento sobre los cambios de uso del suelo en el centro y sur del país mediante estudios técnicos de flora y fauna (Fuentes & Carrasco, 1984., Fuentes, 1988 y Lara *et al.*, 1989). Recientemente los estudios de cambio de cobertura han ampliado el rango general de análisis utilizando imágenes satelitales para evaluar paisajes de hace más de 30 años (Echeverría *et al.*, 2006 y Altamirano *et al.*, 2007). Estudios realizados por Wilson *et al.*, (2005); Echeverría *et al.*, (2006); Altamirano *et al.*, (2007) y Aguayo *et al.*, (2009), muestran que los principales causantes de la transformación de los paisajes en el centro sur de Chile ocurrieron en un inicio por la habilitación de terrenos para la agricultura y, posteriormente, la expansión de las plantaciones forestales incentivadas por subsidios estatales (Donoso y Lara, 1996., Cisterna *et al.*, 1999; CONAF *et al.*, 1999 y Sanhueza y Azocar, 2000).

En otros países de Latinoamérica como México la principal causa de las transformaciones en el uso del suelo ha sido debido a la deforestación perdiendo más de 160 000 ha/año de bosque (Velázquez *et al.*, 2002); en latitudes más tropicales como Costa Rica se dio un cambio de bosque hacia tierras ganaderas en el sur del país para pasar de un 81% de cobertura boscosa en esta zona a un 51% (Rosero-Bixby, 2002). En Colombia el principal agente modelador han sido las plantaciones de café asociados con cambios de paisaje bastante significativos (GUHL, 2004).

La sustitución del bosque nativo por plantaciones forestales de *Pinus radiata* y *Eucalyptus spp.* en el centro-sur de Chile (Lara *et al.* 2003, Echeverría *et al.* 2006), han llevado a consecuencias tales como la disminución o deterioro de servicios ecosistémicos como la diversidad biológica (Echeverría *et al.* 2006) y la provisión de agua en calidad y cantidad (Oyarzún *et al.* 2007, Little *et al.* 2008, 2009, Lara *et al.* 2009), el aumento en la erosión del suelo y en contraste impactos negativos sobre las comunidades locales (Lara y Veblen, 1993).

El estudio de los patrones de cambio de uso del suelo de una manera histórica permite entender la forma en la que está configurado el paisaje para así poder reconocer los impactos ambientales y sociales relacionados con estas transformaciones (Andersen *et al.* 1996, Pan *et al.* 1991). Estudios como los de Little *et al.*, (2003, 2009, 2010); Aguayo *et al.*, (2009); Echeverría *et al.*, (2006, 2007, 2008); Lara *et al.* (2009) y Fuentes (2013), ayudan a entender el impacto que ha presentado el centro-sur de Chile a través de los años y como se puede explicar, modelar y prevenir futuros impactos utilizando una escala de paisaje El

presente estudio evalúa el impacto del cambio de uso del suelo en los patrones espaciales de la erosión y del régimen de caudal en la cuenca del río Vergara ubicada en la zona centro-sur de Chile, en el periodo de 1987 y 2011.

Objetivos

Objetivo General:

- Evaluar el impacto del cambio de uso del suelo en el régimen de caudal y erosión en la cuenca del río Vergara, Chile.

Objetivos Específicos:

- Calibrar un modelo hidrológico espacialmente explícito de régimen de caudal y sedimentos en suspensión para la cuenca del Río Vergara, Chile.
- Determinar los patrones espaciales del cambio de uso del suelo entre 1986 y 2011 en la cuenca del Río Vergara, Chile.
- Analizar el impacto del cambio de uso del suelo en el régimen de caudal y la erosión entre 1986 y 2011 en la cuenca del Río Vergara, Chile.

Materiales y métodos:

Área de Estudio

Corresponde a la cuenca del río Vergara la cual se localiza entre la región del Bío-Bío y la Araucanía cerca de la ciudad de Concepción, Chile ($37^{\circ} 52' S$, $72^{\circ} 20' O$) (Fig. 1). El origen de esta cuenca se da en la falda de la cordillera de los Andes y culmina en la comunidad de los Ángeles bordeando el Río Bío-Bío; los principales afluentes que componen esta cuenca son el río Vergara, Renaico, Mininco, Malleco, Huequén y Rehue. De estos solamente se utilizaron cuatro sub-cuencas ya que fueron las únicas que presentaban un tipo de cobertura predominante en gran cantidad.

La cuenca presenta una extensión 432 893 ha donde el uso de suelo predominante se reparte entre cuatro distintas coberturas, bosque (26,1%), matorral (27,1%), plantación forestal (27,4%) y agricultura (17,6%). El resto de la cuenca presenta parches de suelos descubiertos, áreas urbanas y cuerpos de agua.

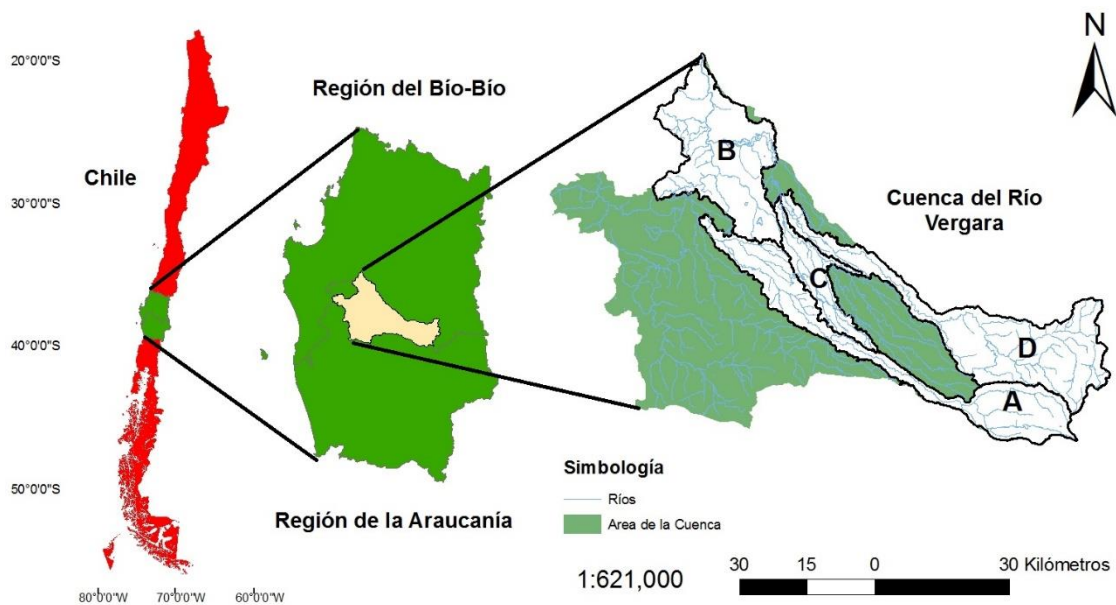


Figura 1. Ubicación de la cuenca del Río Vergara en el año 2014, Región del Bío-Bío y la Araucanía, Chile. Donde: A. Río Malleco en Collipullí, B. Río Vergara en Tijeral, C. Río Mininco en Longitudinal y D. Río Renaico en Longitudinal representan a las sub-cuencas.

Modelación Hidrográfica

Se utilizaron los datos de tipo de suelo, cobertura, precipitación, erosividad y erodabilidad del suelo, tomados en dos periodos de tiempo correspondientes a los años 1987 y 2011. Se calibró un modelo de suministro de agua (caudal) y otro de sedimentos en suspensión para la cuenca del río Vergara, utilizando el programa *Nonpoint Source Pollution and Erosion Comparison Tool* (N-SPECT), analizando las relaciones entre la erosión, la cobertura del suelo y mediante la combinación de factores del ambiente físico como la elevación, la inclinación, tipo de suelo y precipitación. Este modelo es usado como una extensión de Arc GIS y posee la ventaja de ser extrapolable a cualquier área de estudio.

Parametrización de N-SPECT

- *Coeficiente de cobertura del suelo (C)*: las distintas capas de uso del suelo fueron obtenidas gracias a imágenes raster de la cuenca, pertenecientes al Laboratorio de Ecología del Paisaje (LEP) de la Universidad de Concepción (UdeC) Este factor indica como la pérdida del suelo será distribuida a través del tiempo mediante distintos tipos de manejos sobre la cobertura (Renard et al., 1997; Fu et al., 2006). Los factores de cobertura para cada uno de los distintos usos del suelo, fueron estimados mediante una calibración del modelo, comparando los datos arrojados por el modelo con datos reales tomados de la Dirección General de Aguas de Chile (DGA). Las distintas clases de usos del suelo fueron bosque (bosques siempre-verdes prístinos, bosques achaparrados y renoval o bosque intervenido), agricultura (cultivos de distintas clases junto con praderas ganaderas), plantaciones (principalmente del género *Eucalyptus spp.* y *Pinus spp.*), matorral, suelos descubiertos, y cuerpos de agua (Fuentes, 2013).
- *Coeficiente de Erosividad de Lluvia (R)*: representa la capacidad que tiene la lluvia de causar erosión utilizando el efecto de la intensidad, duración y magnitud de cada evento de lluvia (Angulo-Martínez & Beguería 2009; Bonilla et al., 2010; Bonilla & Vidal, 2011); este fue calculado utilizando datos de precipitación obtenidos de la DGA los cuales fueron interpolados por medio del método Kriging (Haylock et al., 2008). Estos datos corresponden a las precipitaciones del año hidrológico el cual comienza en abril del 2010 y culmina en marzo del 2011; con esto se creó un modelo que valora la cantidad de precipitación medida de cada una de las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca. Posteriormente utilizando las capas interpoladas para los doce meses del año se calculó el factor R con la fórmula del Índice de Fournier Modificado (IFM),

$$IFM_j = \frac{\sum_{i=1}^{12} (p_{ij})^2}{P_m}$$

Donde: IFM_j = índice Modificado de Fournier, para el año j.

p_{ij} = Precipitación mensual del mes i del año j (mm).

P_m = Precipitación media anual (mm).

- *Coefficiente de Erodabilidad del suelo (K)*: representa la susceptibilidad del suelo a ser erosionado, este depende de la textura, estructura, contenido de materia orgánica y permeabilidad que este posea (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2007). Este factor fue calculado con la fórmula propuesta por Wischmeier y Smith (1978):

$$K = \frac{[(2,1 * 10^{-4} (12 - OM) M^{1,14} + 3,25 (S - 2) + 2,5 (P - 3))]}{100}$$

Donde: K= factor de erodabilidad del suelo (t./ha.MJ*ha/mm*hr).

OM= porcentaje de materia orgánica.

S= es el código de la estructura del suelo.

P= es el código de permeabilidad del suelo.

M= producto de las fracciones del tamaño de las partículas primarias o (% limo + % arena muy fina) * (100-% arcilla).

Tanto las características físicas como los porcentajes de materia orgánica y los datos de estructura fueron tomadas de las capas generadas por el estudio agrológico de suelos de Chile (CIREN 1999; CIREN 2002).

- *Grupos Hidrológicos de Suelos*: basado en el porcentaje de permeabilidad de los suelos donde 0 equivale a la máxima infiltración para suelos arenosos (100% infiltración) y 1 (0% de infiltración) para suelos arcillosos (NOAA, 2004). Para este estudio los grupos hidrológicos fueron obtenidos mediante datos de textura provenientes del centro de información de recursos naturales de Chile (CIREN).
- *Factor L (longitud de la pendiente) y S (gradiente de la pendiente)*: Estos dos factores utilizados en la Revice Universal Soils Loss Equation (RUSLE) para el cálculo de erosión se calcularon mediante un modelo de elevación digital cuenca adicionado al modelo N-SPECT, tomado del Laboratorio de Ecología del Paisaje (LEP) de la Universidad de Concepción.

Para limitar el modelo solamente al efecto de la variable “uso del suelo” la precipitación se mantuvo constante en los dos escenarios esto con el fin de disminuir el sesgo que podría ser introducido por esta variable.

Posteriormente se manejaron capas de cobertura creados a partir de imágenes satelitales Landsat 30x30m clasificadas en el año 2013 bajo la metodología utilizada por Fuentes, (2013) con un porcentaje de validación para 1986 de 83% y para el 2011 de un 87%. Estas capas se utilizaron para un análisis de cambios netos utilizando la aplicación Land Change Modelling (LCM) en el programa HIDRISI SELVA. Además se calculó la tasa de cambio con respecto al bosque nativo, matorral, plantación forestal y agricultura con la fórmula utilizada por FAO (1986), Echeverría *et al.* (2006) y Aguayo *et al.* 2009):

$$P = \frac{100}{t_2 - t_1} \ln \frac{S_2}{S_1}$$

Donde: P= porcentaje de cambio por año

t₁= primer año del estudio.

t₂= último año del estudio.

S₁=Superficie en el tiempo t₁.

S₂=Superficie en el tiempo t₂.

Finalmente, se comparó el caudal, el porcentaje de cobertura y la erosión de cuatro distintas micro cuencas entre estas y a través del tiempo, con valores obtenidos de cada una de estas variables por el modelo N-SPECT.

Toma de Datos de Control

La toma de datos se realizó mediante una visita a campo en octubre del 2014, con el fin de validar la calibración del modelo N-SPECT. Los datos de la DGA solamente se utilizaron para la validación del modelo. Se obtuvieron datos de caudal en cuatro puntos distintos de la cuenca que contienen un tipo de cobertura predominante (matorral, agricultura, plantación y bosque nativo) creando un mapa de caudal donde se expone de mejor manera la cantidad de agua que escurre por la cuenca (Fig. 2). La medición se realizó cada 60cm en todo el ancho de los ríos tributarios utilizando el SonTech FlowTracker®. Este equipo calcula el caudal del río mediante mediciones en varios puntos del cauce luego de la medición de la velocidad de este y su área a través de su perfil.

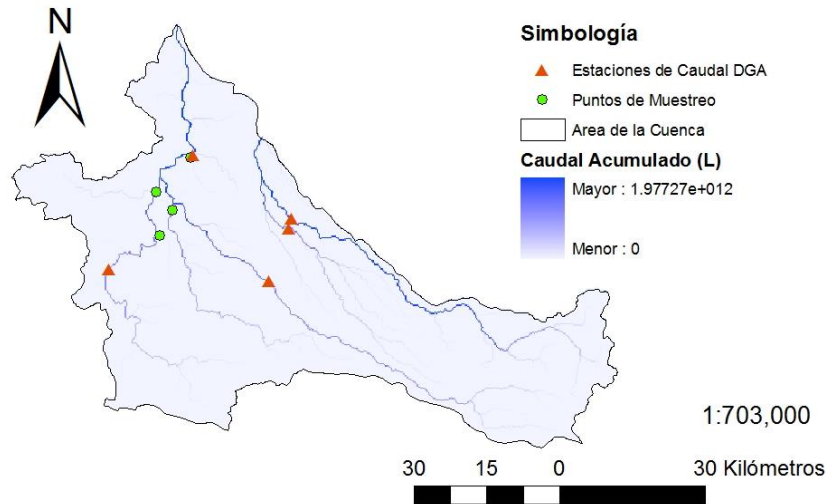


Figura 2. Mapa del caudal generado en litros (L) por el modelo calibrado en N-SPECT para la cuenca del río Vergara, Región del Bío-Bío, Chile.

La bondad de ajuste del modelo fue evaluada a través de dos valoraciones estadísticas cuantitativas, a) La eficiencia relativa del modelo (E_{rel}) (Krause et al. 2005; Thanapakpawin *et al.* 2006) y b) La raíz media de los errores cuadrados (RMEC)

$$a) E_{rel} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \left(\frac{C_i - C'_i}{C_i} \right)^2}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{C_i - \bar{C}}{\bar{C}} \right)^2} \quad b) RMEC = \sqrt{\left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C'_i - C_i)^2 \right)}$$

Donde: C_i = caudal observado \bar{C} = media de las mediciones observadas
 C'_i = caudal simulado N = es el total de las muestras

Resultados

Cambios en la cobertura de uso del suelo

Al realizar el análisis de cobertura, los principales cambios que se dieron fueron el gran aumento en el área de plantaciones forestales y de matorrales y la disminución de la cobertura agrícola. Se observó una drástica disminución en las tierras agrícolas las cuales en el año 1986 dominaban el paisaje con el 47,5% (205 7979 ha), para pasar a un 17,6% (76 125 ha) en el 2011. Por otra parte, se observó un aumento en el área de matorral desde 14,3 % (62 062 ha) en 1986 hasta un 27,1 % (117 266 ha) en el 2011.

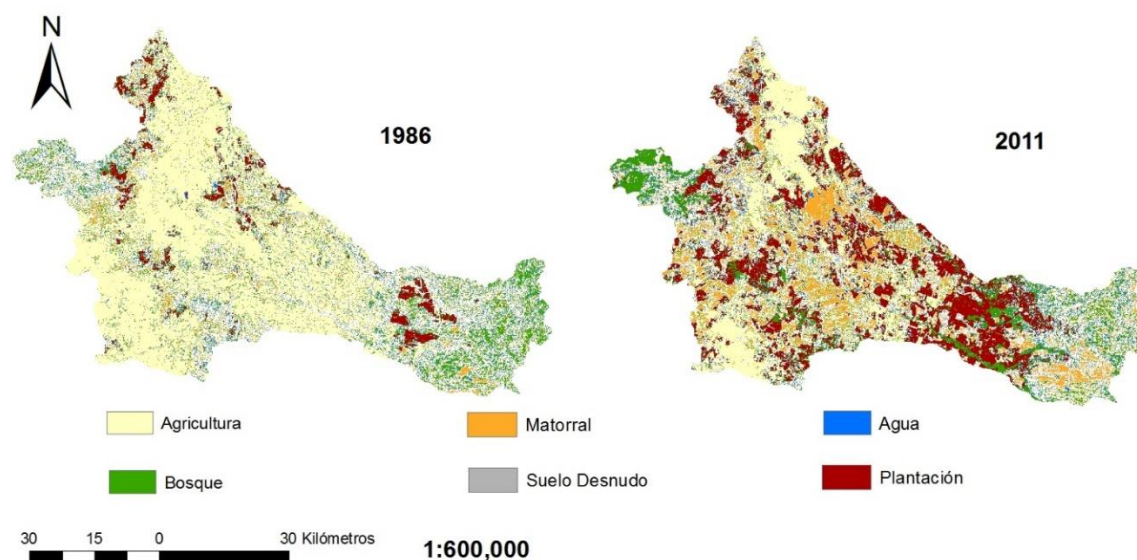


Figura 3. Mapas temáticos de cobertura para los años 1986 y 2011 en la cuenca del río Vergara, Chile. Fuente: Laboratorio de Ecología del paisaje, Universidad de Concepción.

El bosque nativo disminuyó de un 27,7% (120 033 ha) hasta un 26,1% (113 113 ha) para el 2011 (fig. 3). Del área total de la cuenca 41321ha eran plantación, sin embargo, se notó un crecimiento para el 2011 hasta 118737ha (cuadro 1).

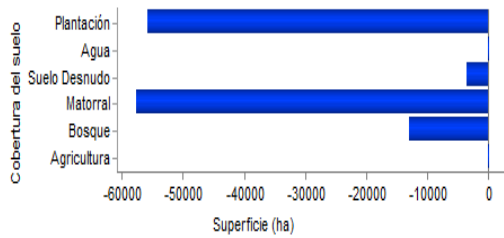
Cuadro 1. Superficie de coberturas de los usos del suelo para 1986 y 2011.

Tipos de Cobertura	1986		2011		Tasa de cambio (%)
	Ha	%	ha	%	
Agricultura	205 797	47,5	76 125	17,6	-4
Bosque nativo	120 033	27,7	113 113	26,1	-0,24
Matorral	62 062	14,3	117 266	27,1	+2,55
Plantación Forestal	41 321	9,5	118 737	27,4	+4,22
Cuerpos de agua	231	0,1	334	0,1	
Suelo desnudo	3 450	0,8	7 319	1,7	
Total	432 893	100	432 893	100	

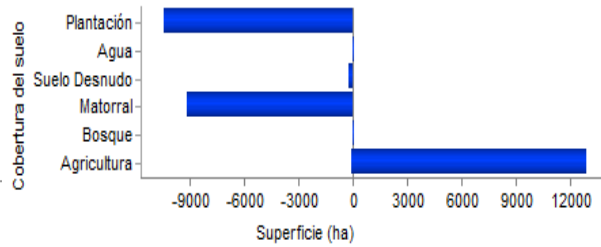
Con respecto a las transiciones del bosque nativo, este perdió 19 629 ha de las cuales 9 167 ha se transformaron en matorral y 10 462 ha en plantación. Sin embargo, el bosque nativo ganó 12 709 ha a costa de la disminución en la agricultura. Por otra parte se vio un incremento substancial en las plantaciones a costa de los terrenos agrícolas y los bosques. Los terrenos agrícolas a partir del año 1986 cambiaron su uso del suelo principalmente por plantaciones forestales y áreas de matorral en 55 891 ha y 57 715 ha respectivamente (fig. 4). Con respecto a la tasa de reemplazo de bosque nativo o tasa de deforestación,

se obtuvo una pérdida del 0,24% anual, el matorral obtuvo una tasa de reemplazo de 2,55% anual, las plantaciones forestales un 4,22% anual y la agricultura una disminución de un 4% anual

a) Agricultura



b) Bosque



c) Plantación

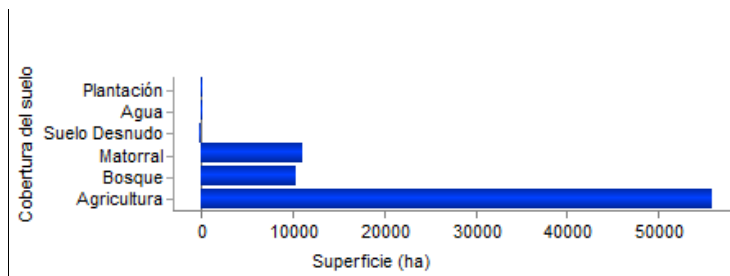


Figura 4. Gráficos de contribución al cambio neto en superficie desde 1986 al 2011.

Validación del modelo hidrológico

Al comparar los cinco valores reales obtenidos de la DGA y los cuatro puntos de muestreo, con los valores estimados por el modelo N-SPECT, se obtuvo un rendimiento relativo del modelo de 0,7 el cual describe de buena manera los valores de caudal reales de la cuenca. Por otro lado se obtuvo un RMSE de 5,52m³/s con un coeficiente de variación de 37% (fig. 5).

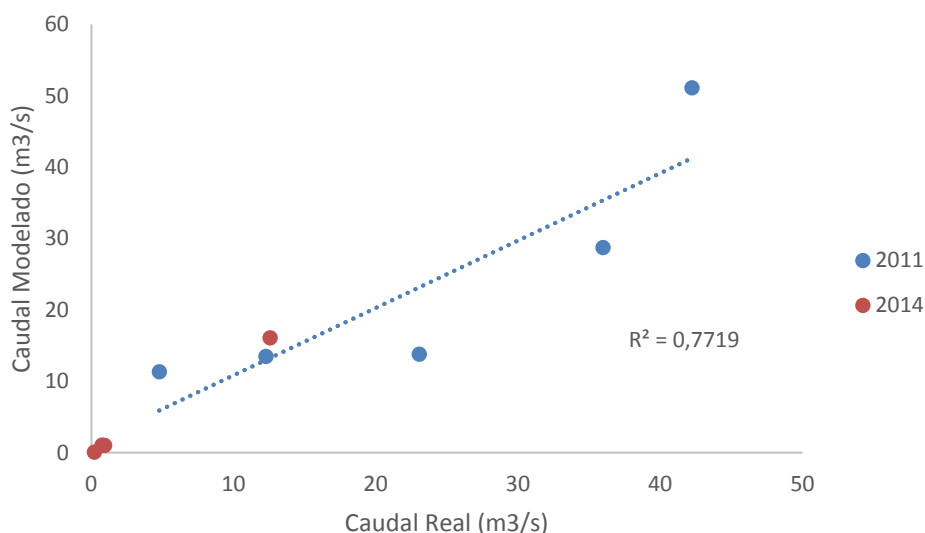


Figura 5. Comparación entre los caudales observados y modelados para el del 2011 y 2014 de la cuenca del río Vergara, Chile.

Cambios en el caudal a nivel de cuenca y subcuenca.

Al comparar los datos obtenidos de la DGA en los años 1986 y 2011, se puede notar que el caudal promedio ha disminuido de forma drástica (41%) (Cuadro 2).

Cuadro 2. Caudal aforado (1986), modelado (2011) (m³/s) y porcentajes de disminución para cuatro estaciones en la cuenca del río Vergara, centro-sur de Chile.

Estaciones	Caudal (m ³ /s)		
	1986	2011	%
Río Malleco en Colipulli	32.1	13.81	57.0
Río Vergara en Tijeral	68.78	51.14	25.6
Río Minico en Longitudinal	20.86	13.52	35.2
Río Renaico en Longitudinal	51.89	28.77	44.6
Promedio			41

Al comparar los datos de cobertura a nivel de sub cuencas, las cuatro sub cuencas presentan la misma tendencia con respecto al aumento en la plantación, disminución en las tierras agrícolas y aumento en el área de matorrales.

Cambio en la erosión a nivel de sub cuenca

Para el año 1986 las cuatro sub cuencas presentaron valores entre 0,98 y 5,29 Ton/ha/año, sin embargo, para el año 2011 las cuatro sub cuencas presentaron un disminución en los valores de erosión (cuadro 3).

Cuadro 3. Erosión y cobertura predominante para cuatro sub cuencas en la cuenca del río Vergara, Chile.

Sub Cuenca	Erosión (ton/ha/año)		Cobertura Predominante	
	1986	2011	1986	2011
Río Malleco en Collipullí	1,01	0,79	Bosque	Matorral, Bosque y Plantación
Río Vergara en Tijeral	5,29	3,04	Agricultura	Agricultura y Plantación
Río Mininco en Longitudinal	2,3	1,19	Agricultura	Plantación y Matorral
Río Renaíco en Longitudinal	0,98	0,75	Bosque	Matorral, Bosque y Plantación

Las sub cuencas que presentaron una menor disminución en la cantidad de sedimentación, son aquellas en donde se dieron las mayores tasas de degradación del bosque. En contraste, las sub cuencas en las cuales se dio una mayor disminución en la erosión fueron aquellas donde el bosque presentó una ganancia en área (Figura 6).

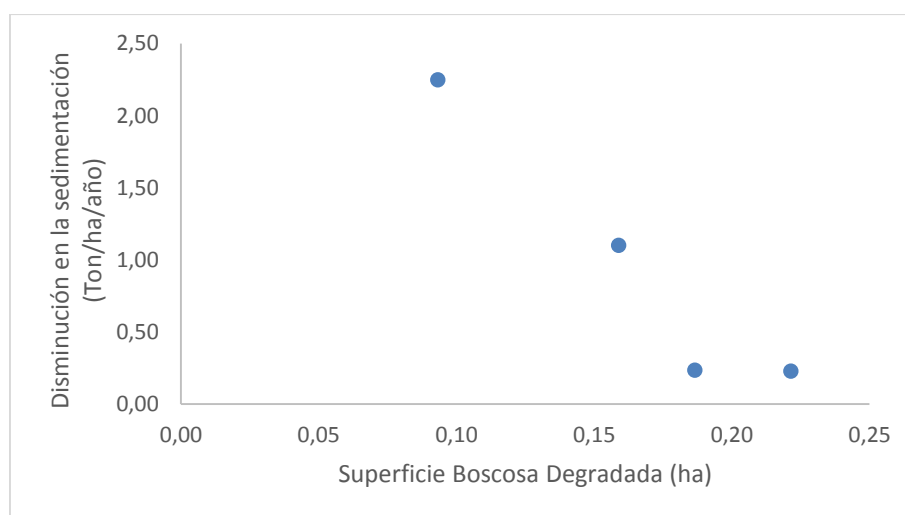


Figura 6. Relación existente entre la disminución de las tasas de sedimentación de cada una de las sub cuencas y la degradación del bosque adulto (cambio de superficie de bosque nativo a matorrales), ponderado por la superficie de cada sub cuenca.

Discusión

Cambios en la cobertura de uso del suelo

La actividad agrícola y la actividad forestal son los principales responsables del cambio de uso del suelo en el centro-sur de Chile (Aguayo, *et al.* 2009 Donoso y Lara 1996, Cisterna *et al.* 1999, Sanhueza y Azócar 2000). Al realizar la comparación entre las coberturas del año 1986 y el 2011, se encontró que el tipo de cobertura dominante para el año 1986 fue la agricultura y para el año 2011 son las plantaciones forestales. El incremento de las plantaciones forestales en la cuenca desde 1986 hasta el 2011 fue de un 188% debido al aumento de la actividad forestal en el área, valor mucho mayor al 75% reportado por Millán & Carrasco (1993) para todo Chile, luego del incremento en la expansión forestal a partir de los años setenta (Cisterna *et al.* 1999, Pellet *et al.* 2005, Echeverría *et al.* 2006).

El aumento en el área de matorral fue de un 53% para el 2011 con respecto a 1986. El incremento en este tipo de cobertura para el 2011 se debe principalmente al abandono de la actividad agrícola en esta zona y en menor escala a la transición de bosque nativo a matorral como lo reporta Aguayo *et al.* (2009), cambio que puede deberse al aumento en las prácticas de floreo, las cuales se caracterizan por la extracción de los árboles de mejor calidad. Esta actividad produce una alta degradación del bosque, creando este tipo de ecosistemas en forma de matorral (Donoso 1993, San Martín y Donoso 1995).

El bosque nativo fue reemplazado a una tasa del 0,24% anual, mucho menor a la reportada por Echeverría *et al.* (2006) que fue del 4,5%, en un área de 500 000 mil hectáreas localizadas en las laderas de la Cordillera de la Costa. Sin embargo, este valor es similar al estimado por CONAF *et al.* (1999b) de un 0,3% para la región del Bío-Bío y cercano al 1,6% reportado por Aguayo *et al.* (2009) entre la región de la Araucanía y la región del Bío-Bío. Fuentes (2013) también reporta a unos 360km al sur, en la Región de los Lagos, en el área del Lago Rupanco, una tasa de reemplazo de 0,95% y Echeverría *et al.* (2006) reporta a unos 160km al norte en la región del Maule una tasa de reemplazo de 4,5% en bosques secundarios. Esta discrepancia se debe a que la dinámica de los paisajes analizados es distinta. La intrusión del ser humano en las montañas de los Andes y en la cordillera de la costa es más reciente que aquellas ocurridas en el valle central (Millán y Carrasco 1993, Cisterna *et al.* 1999, Azocar y Sanhueza 1999).

Relación espacial entre la cobertura de uso del suelo y el caudal.

El caudal obtenido por medio del modelo N-SPECT es similar a los datos obtenidos de la DGA lo cual refleja una adecuada calibración del modelo, Burke y Surge, (2006) compararon valores de caudal obtenidos con N-SPECT contra un modelo de balance de agua calculado por Thattai *et al.* (2003) en seis cuencas del golfo de Honduras obteniendo resultados muy similares.

Lara *et al.* (2003) y Echeverría *et al.* (2006) mencionan que la disminución en la descarga de agua a través de los ríos en el centro-sur de Chile se debe a distintas prácticas como la sustitución del bosque nativo y la habilitación agropecuaria. El presente estudio muestra un contraste con esta afirmación ya que la cobertura predominante en el año 1986 es la agricultura y para el año 2011 se dio un crecimiento en el área de plantaciones forestales. Al aumentar el área de plantaciones en gran medida y el área de bosque disminuir en menor cantidad en comparación con las otras coberturas predominantes, se puede notar que la gran cantidad de plantaciones de *Pinus spp.* y *Eucalyptus spp.* en la cuenca del Río Vergara cumplen la función hidrológica del bosque disminuyendo el caudal anual promedio en un 34,7% ya que este crea un balance en la regulación hídrica (Lara y Veblen 1993).

De acuerdo con varios autores las plantaciones forestales cumplen un papel similar al de los bosques en materia hidrológica. Van Lil *et al.*, (1980) demostró en plantaciones de *Eucalyptus grandis* una reducción del escurrimiento superficial durante el tercer año luego de haber plantado los árboles, Prebble y Strick (1988) en Australia documentaron un aumento en el almacenamiento de agua del suelo entre 0 y 1m de profundidad luego de realizar una conversión de *Eucalyptus melanophloia* a praderas, además, Swank y Douglas (1974) encontraron reducciones importantes del escurrimiento después de 15 años de una conversión de bosques deciduos a coberturas de pinos debido, Huber *et al.* (2010) señalan que las plantaciones de *Pinus radiata* presentan mayor intercepción que las de *Eucalyptus globulus* debido principalmente a que las coníferas presentan mayor capacidad de retención de agua que las latifoliadas (Crockford y Richardson 2000, Huber y Iroumé 2001, Link *et al.* 2004, Fleischbein *et al.* 2005).

Huber (1991) en un estudio de cinco años demostró que el consumo de agua por evapotranspiración es mayor en una plantación adulta de *P. radiata* que en un bosque nativo siempre-verde y una pradera. Las pérdidas por evapotranspiración en estas plantaciones pueden tener grandes variaciones anuales y constituir hasta un 58% de la precipitación total (Huber y Oyarzún, 1990). En contraste, Huber *et al.* (2010) reportan que la cantidad de agua involucrada en la evapotranspiración total para plantaciones de *P. radiata* (64% de la precipitación total) era menor al compararla con plantaciones de *E. globulus* (73% de la precipitación total). La disminución en la cantidad de agua

evapotranspirada en *E.globulus* es debido a las características propias de la especie latifoliada.

Relación espacial entre la cobertura y la erosión

El efecto que genera la pérdida de cobertura vegetal, ya sea por causas naturales o antrópicas, sobre el aumento en las tasas de pérdida de suelo en cuencas de todo el mundo ha sido estudiada y demostrada por diversos investigadores bajo enfoques empíricos o modelaciones (Bakker *et al.* 2008; Lastoria *et al.* 2008; Li *et al.* 2009; Casalí *et al.* 2010; Fuentes, 2013).

En el presente estudio los resultados indican que los cambios en la cobertura boscosa están asociados a las tasas de erosión que la cuenca pueda tener. La disminución de los valores de sedimentación en todas las sub cuencas se debe a tres factores, primero la mínima disminución de la cobertura boscosa presente en la cuenca (1,6%), segundo la considerable disminución de los terrenos agrícolas (29,9%) y tercero el aumento acelerado de las plantaciones forestales de especies exóticas (17,9%). En un estudio ubicado en la región de los Lagos, Fuentes (2013) encontró un aumento considerable en tasas de erosión hídrica para los mismos años de estudio de este trabajo, obteniendo tasas de pérdida de suelos de más de 1,5 Ton/ha/año debido a procesos de deforestación y degradación de hasta 2,5% en comparación con los 0,24% de degradación en la cuenca del río Vergara. Bonilla *et al.* (2010) encontraron valores de 8 Ton/ha/año para la zona central de Chile, esto debido a la menor cobertura arbórea que presenta esta zona con relación al centro-sur del país. Sin embargo, CIREN (2010a) señala que la zona en la que se presenta la cuenca del río Vergara presenta un riesgo de erosión de Nulo a Muy Alto debido a su ubicación entre la cordillera de la costa y la cordillera de los Andes.

En general las tasas de sedimentación en las sub cuencas con un uso agrícola para el año 1986 disminuyeron en más de un 40% su erosión, mientras que las cuencas que presentaron bosque nativo en mayor cantidad para el año 1986, disminuyeron su tasa de sedimentos en alrededor de un 20%, ya que, los usos del suelo relacionado con actividades antrópicas (agricultura, pastoreo, manejo forestal), las cuales afectan negativamente las tasas de infiltración aumentando la escorrentía superficial y por consiguiente acelerando los procesos erosivos (Turnbull *et al.* 2010). Sin embargo, la disminución de la erosión en estas dos últimas sub-cuencas donde el bosque se degradó, se debió al aumento de las plantaciones forestales en más de un 50% de su área en estas zonas.

De acuerdo con este estudio las tasas de sedimentación de la cuenca del Río Vergara han disminuido desde 1986. Sin embargo, es necesario contar con políticas que apoyen actividades claves para la conservación del recurso hídrico por encima de las actividades productivas (Leon-Muñoz *et al.* 2013). Como por

ejemplo, la regulación de la aplicación de fertilizantes en la agricultura, promover actividades de reforestación en los bordes de los ríos, los cuales disminuyen las tasas de erosión, evitar la deforestación en las cabeceras de las cuencas y restringir la expansión de la agricultura en las pendientes (Ceccon, 2003), esto con la ayuda de los propietarios agrícolas y forestales para lograr una mejor educación ambiental y apoyo económico (Fuentes, 2013).

Conclusiones

En el área de estudio, las tierras agrícolas disminuyeron para el año 2011 reemplazándose principalmente por plantaciones forestales de especies nativas. La degradación de algunos parches de bosque, el abandono de tierras agrícolas y los turnos de rotación de las plantaciones forestales dieron paso al aumento de las áreas de matorral dentro de la cuenca.

El modelo usado describe de buena manera los valores de caudal para la cuenca con un RMSE de $5,52\text{m}^3/\text{s}$ y una eficiencia relativa del modelo de 0,7. El caudal dentro de toda la cuenca disminuyó en un 41% en promedio con respecto al año 1986 esto por el aumento de las plantaciones forestales, disminución de las áreas agrícolas y mantenimiento de las áreas de bosque nativo esto en un escenario donde las precipitaciones no cambian.

La cantidad de sedimentación a nivel de sub cuenca disminuyó en mayor cantidad (40%) en aquellas donde su cobertura inicial era agricultura y se convirtió en plantación. La disminución de este factor es análoga para toda la cuenca debido al gran aumento de la actividad forestal.

Con esta investigación se pudo demostrar como los patrones en el cambio de uso del suelo afectaron el caudal y los patrones de erosión de la cuenca del río Vergara; y como el modelamiento espacial fue una herramienta de gran utilidad para evidenciar este efecto en la cuenca.

Recomendaciones

Realizar nuevas mediciones en distintas partes de la cuenca obteniendo promedios de caudal para calibrar de mejor manera el modelo estadístico.

Ampliar la cantidad de clases de cobertura si se desean obtener valores más específicos sobre el impacto que han presentado los distintos tipos de bosque por el efecto del cambio de uso del suelo.

Comparar los valores de esta cuenca con futuros estudios en distintas cuencas del río Bío-Bío para obtener valores a una escala muy amplia en el paisaje y poder entender de mejor manera la dinámica de este.

Realizar análisis de contaminación como cantidad de fosforo y nitrógeno en el agua para tener un mejor entendimiento de la dinámica de la cuenca.

Anexos

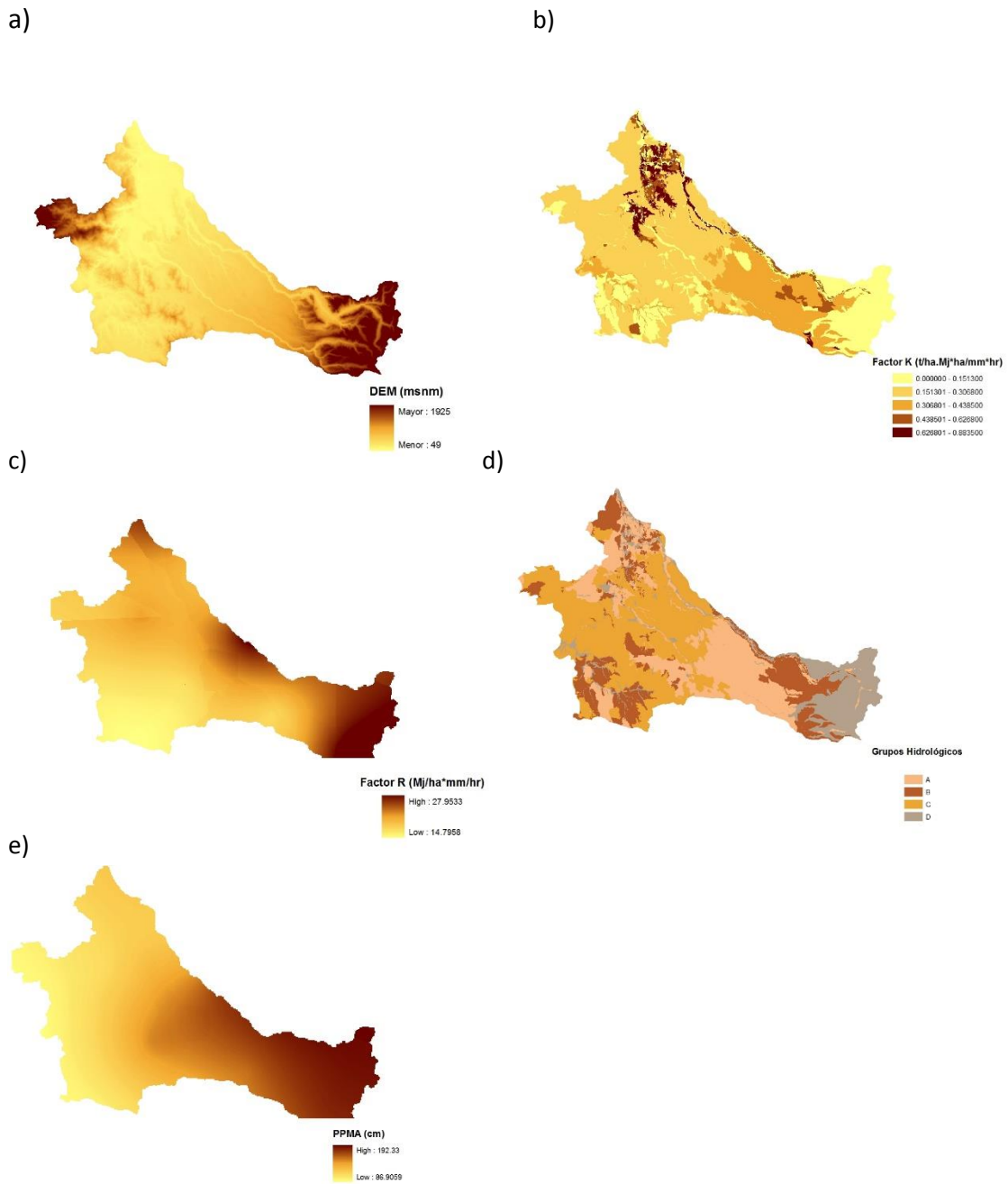


Figura 1B. Información espacial generada para modelación del año 2011. a) Modelo de Elevación Digital (DEM), b) Factor de erodabilidad del suelo, c) Factor de erosividad de la lluvia, d) Grupos hidrológicos del suelo, e) Precipitación media anual

Bibliografía

- Aguayo, M., Pauchard, A., Azócar, G. & Parra, O. (2009). Cambio del uso del suelo en el centro sur de Chile a fines del siglo XX. Entendiendo la dinámica espacial y temporal del paisaje. *Revista Chilena de Historia Natural* 82: 361-374.
- Altamirano, A., Echeverría, C. & Lara, A. (2007). Efecto de la fragmentación forestal sobre la estructura vegetacional de las poblaciones amenazadas de *Legrandia concinna* (Myrtaceae) del centro-sur de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 80: 27-42.
- Andersen, O., Crow, TR., Lietz, SM. & Stearns, F. (1996). Transformation of a landscape in the upper mid-west, USA: The history of the lower St Croix River valley, 1830 to present. *Landscape and Urban Planning* 35: 247-267.
- Angulo-Martínez, M. & Beguería, S. (2009). Estimating rainfall erosivity from daily precipitation records: A comparison among methods using data from the Ebro Basin (NE Spain). *Journal of Hydrology*, 379, 111-121.
- Balvanera, P. & Cotler, H. (2007). Acercamiento al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta ecológica número especial*, 8-15.
- Bakker, M.M., Govers, G., Van Doorn, A., Quetier, F., Chouvardas, D. & Rounsevell, M. (2008). The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: The importance of landscape pattern. *Geomorphology*, 98 (3-4), 213-226.
- Bari, M., Smith, N., Ruprecht, J. & Boyd, B. (1996). Changes in Streamflow components following logging and regeneration in the southern forest of western Australia. *Hydrological Processes*, 10, 447-461.
- Bonilla, C., Reyes, JL. & Magri, A. (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.

- Bonilla, C. & Vidal, K. (2011). Rainfall erosivity in Central Chile. *Journal of Hydrology*, 410 (12), 126-133.
- Burke, L. & Sugg, Z. (2006). Hydrologic Modeling of Watersheds Discharging Adjacent to the Mesoamerican Reef. International Coral Reef Action Network (ICRAN).
- Ceccon, E. (2003). Los bosque ribereños y la restauracion y conservacion de las cuencas hidrograficas. *Ciencias*, 72, 46-53.
- Casalí, J., Giménez, R., Díez, J., Álvarez-Mozos, J., Del Valle de Lersundi., Goñi, M., et al. (2010). Sediment production and water quality of watersheds with contrasting land use in Navarre (Spain). *Agricultural Water Management*, 97 (10), 1683-1694.
- CIREN. (1999). ESTUDIO AGROLOGICO. Descripciones de suelos materiales y simbolos. VIII Región. ISBN, Publicación 121.
- CIREN. (2002). ESTUDIO AGROLOGICO. Descripciones de suelos materiales y simbolos. IX Región. ISBN, Publicación 122.
- CIREN. (2010a). Determinación actual y potencial de los suelos de Chile. Region del Bío-Bío. Sintesis de resultados, 22.
- CIREN. (2010b). Determinación actual y potencial de los suelos de Chile. Region de la Araucanía. Sintesis de resultados, 23.
- Cisterna, M., Martínez, P., Oyarzún, C. & Debels, P. (1999). Caracterización del proceso de reemplazo de vegetación native por plantaciones forestales en una Cuenca lacustre de la cordilla de Nahuelbuta, VII Región, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 72: 541-556.
- Coelho, C., Shakesby, R. & Walsh, R. (1995) Effects of forest fires and post-fires land management practice on soil erosion and stream dynamics, Águeda basin, Portugal. Directorate-General Science, Research and Development, European Comission, Luxembourg, 91.

- CONAF, CONAMA, BIRF, UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE & UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN. (1999). Catastro y evaluación de los recursos vegetacionales nativos de Chile. Monitoreo de cambios. Santiago, Chile. 12pp.
- Crockford, R. & Richardson, D. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. *Hydrological Processes* 14: 2903-2920.
- Donoso, C. (1993). Bosques templados de Chile y Argentina: variación, estructura y dinámica. Universitaria, Santiago, Chile.
- Donoso, C. & Lara, A. (1996). Utilización de los bosques nativos en Chile: pasado, presente y futuro. En: Armesto JJ, C Villagrán & MK Arroyo (eds). *Ecología de los bosques nativos de Chile*: 363-387. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey Benayas, J., Lara, A. & Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean temperate forests. *Biological Conservation* 130: 481-494.
- Echeverría, C., Newton, A., Lara, A., Rey-Benayas, JM. & Coomes, D. (2007) Impacts of forest fragmentation on species composition and forest structure in the temperate landscape of southern Chile. *Gobla Ecology and Biogeography* 16: 426-439.
- Echeverría, C., A. Comes, D., Hall, M. & C. Newton, A. (2008). Spatially explicit model to analyze forest loss and fragmentation between 1976 and 2020 in southern Chile. *Ecological Modelling* 212: 439-449.
- FAO (1996) Forest resources assessment 1990. Survey of tropical forest cover and study change process. Rome N° 26. 152 pp.
- Fleischbein, K., Wilcke W., Boy J., Valarezo C., Zech, W. & Knoblich, K. (2005). Rainfall interception in a lower montane forest in Ecuador: effects of canopy properties. *Hydrological Processes* 19: 1355-1371.

- Fu, G., Chen, S. & McCool, D. (2006). Modeling the impacts of no-till practice on soil erosion and sediment yield with RUSLE, SEDD, and ArcView GIS. *Soil and Tillage Research*, 85 (1-2), 38-49.
- Fuentes, E. (1988) Sinopsis de paisajes de Chile central. En: Fuentes E. & Prenafeta, S. (eds). *Ecología del paisaje en Chile central. Estudios sobre sus espacios montañosos*: 17-27. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Fuentes, E. & Carrasco, M. (1984). Problems of resource management and land use in two mountain regions of Chile. En: Di Castri, F., Baker, F. & Hadley, M. (eds) *Ecology in practice*: 315-330. Tycooly international, Dublin, Irlanda.
- Fuentes, E. & Hajek, E. (1979). Patterns or landscape modification in relation to agricultural practice in central Chile. *Environmental Conservation* 6: 265-271.
- Fuentes, R. (2013) Modelamiento de impactos del cambio de uso de suelo en la carga de sedimentos y nutrientes en la cuenca lacustre del lago Rupanco, Región de Los Lagos, Chile. Tesis para optar por el grado de Magíster en Ciencias Forestales, Universidad de Concepción, Chile.
- GUHL, A. (2004). *Café y cambio de paisaje en la zona cafetera colombiana entre 1970 y 1997*. Colombia
- Haylock, M., Hofstra, N., Klein Tank, A., Klok, E., Jones, P. & New, M. (2008) A European daily high-resolution gridded data set of Surface temperatura and precipitation for 1950-2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 113, D20119.
- Huber, A. (1991). Modificación del balance hídrico por cambios en la cubierta vegetal. *Resúmenes II Congreso Gestión en Recursos Naturales*. Valdivia, Chile. pp. 43.
- Huber, A. & Oyarzún, C. (1990). Variaciones anuales en precipitación, escurrimiento e interceptación en un bosque adulto de *Pinus radiata*. *Turrialba* 40: 503-508.
- Huber, A. & Iroumé, A. (2001). Variability of annual rainfall partitioning for different sites and forest covers in Chile. *Journal of Hydrology* 248: 78-92.

- Huber, A., Iroumé, A., Mohr, C. & Frene, C. (2010). Efecto de plantaciones de *Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus* sobre el recurso agua en la Cordillera de la Costa de la región del Biobío, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 31(3): 219-230.
- Imeson, A., Verstraten, J., Van Mulligen, E. & Sevink, J. (1992). The Effects of Fire and Water Repellency on Infiltration and Runoff under Mediterranean Type Forest. *Catena*, 19, 345-360.
- Keller, E., Valentine, D. & Gibbs, D. (1997) Hydrological response of small watersheds following the southern California painted cave fire of June 1990. *Hydrological Processes*, 11, 401-414.
- Krause P, DP Boyle y F Bäse. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97.
- Lambin, E. (1997). Modelling and monitoring land-cover change processes in tropical regions. *Progress in Physical Geography*, 21(3), 375-393.
- Lara, A., Araya, L., Capella, J., Fierro, M. & Cavierres, A. (1989) Evaluación de la destrucción y disponibilidad de los recursos forestales nativos en la VII y VIII Región. Informe Técnico, Comité Pro Defensa Fauna y Flora, Santiago, Chile. 22 pp.
- Lara, A. & Veblen, T. (1993). Forest plantations in Chile: a successful model? In: Mather, A. (Ed.), *Afforestation: policies, planning and progress*. Belhaven Press, London. Pp 119-137.
- Lara, A., Soto, D., Armesto, J., Donoso, P., Wernli, C., Nahuelhual, L. & Squeo, F. eds. (2003). Componentes científicos clave para una política nacional sobre usos, servicios y conservación de los bosques nativos chilenos. Valdivia, Chile. Universidad Austral de Chile. 134 p. (Iniciativa Científica Milenio de Mideplan).
- Lara, A., Little, C., Urrutia, R., McPhee, J., Álvarez-Garretón, C., Oyarzún, C., Soto, D., Donoso, P., Nahuelhual, L., Pino, M., & Arismendi, I. (2009). Assessment of ecosystem services as an opportunity for the conservation and management of native forests in Chile. *Forest Ecology and Management* 258: 415-424.

- Lara A, Reyes, R., Urrutia, R. (2010). Bosques nativos. Informe país. Estado del medio ambiente en Chile 2008. Santiago, Chile. Instituto de Asuntos Públicos. Centro de Análisis de Políticas Públicas, Universidad de Chile. p. 126-171.
- Lastoria, B., Miserocchi, F., Lanciani, A. & Monacelli, G. (2008). An estimated Erosion Map for the Aterno-Pescara River Basin. *European Water*, 21/22, 29-39.
- Lavabre, J. Sempere, D. & Cernesson, F. (1993). Changes in the hydrological response of a small Mediterranean basin a year after wildlife. *Journal of Hydrology*, 142, 273-299.
- León-Muñoz, J., Echeverría, C., Marcé, R., Riss, W., Sherman, B. & Iriarte, J. (2013). The combined impact of land use change and aquaculture on sediment and water quality in oligotrophic Lake Rupanco (North Patagonia, Chile, 40.8°S). *Journal of Environmental Management*, 128, 283-291.
- Li, M., Li, Z., Yao, W. & Liu, P. (2009). Estimating the erosion and deposition rates in a small watershed by the ¹³⁷Cs tracing method. *Applied Radiation and Isotopes*, 67 (2), 362366.
- Link, T., Unsworth, M. & Marks, D. (2004). The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agricultural and Forest Management* 124: 171-191.
- Little, C., Soto, D., Lara, A. & Cuevas, J. (2008). Nitrogen exports at multiple-scales in a southern Chilean watershed (Patagonian Lakes district). *Biogeochemistry* 87(3): 297-309.
- Little, C., Lara, A., McPhee, J. & Urrutia, U. (2009). Revealing the impact of forest exotic plantations on water yield in large scale watersheds in South-Central Chile. *Journal of Hydrology* 374: 162-170
- López, E., Mendoza, M., & Acosta, A. (2009). Cambio de cobertura vegetal y uso de la tierra: El caso de la cuenca endorreica del lago de Cuitzeo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología. México.

- Millan, J. y Carrasco, P. (1993). La forestación en la VIII Región. Serie EULA Elementos cognoscitivos sobre el recurso suelo y consideraciones generales sobre el ordenamiento agroforestal. Editorial Universidad de Concepción, Concepción, Chile. 105 pp.
- Morris, S. & Moses, T. (1987). Forest Fire and the Natural Soil Erosion Regime in the Colorado Front Range. *Annals of the Association of American Geographers*, 77(2), 245-254.
- NOAA. (2004). Tutorial for the Nonpoint Source Pollution and Erosion Comparison Tools (NSPECT).
- Rosero-Bixby, L., Maldonado-Ulloa, T., & Bonilla-Carrión, R. (2002). Bosque y población en la Península de Osa, Costa Rica. *Revista de biología tropical*, 50(2), 585-598.
- Oyarzún, C., Nahuelhual, L. & Núñez, D. (2005). Los servicios eco- sistémicos del bosque templado lluvioso: producción de agua y su valoración económica. *Ambiente y Desarrollo* 20: 88-95.
- Oyarzún, C., Aracena, C., Rutherford, P., Godoy, R. & Deschrijver, A. (2007). Effects of land use conversion from native forests to exotic plantations on nitrogen and phosphorus retention in catchments of southern Chile. *Water Air and Soil Pollution* 179(1-4): 341-350.
- Pascual, J. A. (2002). Cambios de usos del suelo y régimen hídrico en la rambla de Poyo y el barranc de Carraixet. Universitat de València.
- Pellet, P., Ugarte, E., Osorio, E. y Herrera, F. (2005). Conservación de la biodiversidad en Chile, ¿legalmente suficiente?: la necesidad de cartografiar la ley antes de decidir. *Revista Chilena de Historia Natural* 78: 125-141.
- Pérez-Rodríguez, R., Marques, M & Bienes, R. (2007). Spatial variability of the soil erodibility parameters and their relation with the soil map at subgroup level. *Science of The Total Environment*, 378, 166-173.

- Prebble, R. & Stirk, G. (1988). Hydrological effects of land use change on small catchments at the Narayen research station, Queensland. *Australian J. Soil Research* 26: 231-242.
- Reid, I., Parkinson, R., Twomlow, S. & Clark, A. (1990) The Impact of Agricultural Land-use Changes on Soil Conditions and Drainage.
- Reid, R., Kruska, R., Muthui, N., Taye, A., Wotton, S., Wilson, C., & Mulatu, W. (2000). Land-use and land-cover dynamics in response to changes in climatic biological and socio-political forces: the case of southwestern Ethiopia. *Landscape Ecology* 15: 335-339.
- Renard K., Foster G., Weesies G., McCool D., & Yoder D. (1997). Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). USDA-Agriculture Handbook, No. 703.
- Romero, A., Alonso, F., Fernández, I., López, F., & Perez, J. (1998). Evolución de los usos del asuelo y factores topográficos en la cuenca de Rambla Salada (Cuenca del Segura, Sureste de España). V Reunión Nacional de Geomorfología, 751-755.
- San Martin, J. & Donoso, C. (1997). Estructura florística e impacto antrópico en el bosque Maulino de Chile. In: Armesto, J. Villagrán, Arroyo, M. (Eds) *Ecología de los bosques nativos de Chile*. Editorial Universitaria, Santiago, pp. 153-168.
- Sanhueza, R. & Azocar, G. (2000). Transformaciones ambientales provocadas por los cambios económicos de la segunda mitad del siglo XIX; provincia de Concepción. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis* 45: 181-194.
- Sala, M., & Imbar, M. (1992). Some Hydrologic Effects of Urbanization in Catalan Rivers. *Catena*, 19, 363-378.
- Scott, D. (1997) The contrasting effects of wildfire and clearfelling on the hydrology of a small catchment. *Hydrological Processes*, 11, 543-555.
- Swank, W. & Douglass, J. (1974). Streamflow greatly reduced by converting deciduous hardwood stands to pine. *Science* 185:857-859.

- Thattai, D., Kjerfve, B. & Heyman, W.D. (2003). Hydrometeorology and variability of water discharge and sediment load in the Inner Gulf of Honduras, Western Caribbean. *Journal of Hydrometeorology* 4: 985-995.
- Thanapakpawin, P., Richey, J., Thomas, D., Rodda, S., Campbell, B. & Logsdon, M. (2006). Effects of landuse change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. *Journal of Hydrology*, 334 (1-2), 215-230.
- Turnbull, L., Wainwright, J. & Brazier, R. (2010). Changes in hydrology and erosion over a transition from grassland to shrubland. *Hydrological Processes* 24: 393-414
- Valdez, Z. (2012). *Diagnostico ambiental en las inmediaciones del embalse Reuqena, Municipio de Tepeji del Río, Hidalgo*. Tesis para obtener el título de Biólogo. Facultad de Estudios Superiores Iztalca. Mexico.
- Van Lill, W., Kruger, F. & Van Wyk, D. (1980). The effect of afforestation with *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden and *Pinus patula* Schlecht. et Cham. on streamflow from experimental
- Velázquez, A., Mas, J. F., Gallegos, J. R. D., Mayorga-Saucedo, R., Alcántara, P. C., Castro, R., ... & Palacio, J. L. (2002). Patrones y tasas de cambio de uso del suelo en México. *Gaceta ecológica*, (62), 21-37.
- Videla, Y. (2013) *Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Maipo mediante la aplicación del software "Cold Region Hydrological Model"*. Tesis para optar por el título de geógrafo, Universidad de Chile, Chile.
- WILSON, K., NEWTON, A., ECHEVERRÍA, C., WESTON, C. & BURGMAN, E. (2005). A vulnerability analysis of the temperate forests of south central Chile. *Biological Conservation* 122: 9-21
- Wischmeier, W. & Smith, D. (1978). Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. United States Department of Agriculture (Vol. 537). United States Government Printing Office Washington, DC.