

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SEVERIDAD EN CUENCAS AFECTADAS POR
INCENDIOS FORESTALES PARA EL ANÁLISIS DE PARÁMETROS DE SUELO EN
MODELOS HIDROLÓGICOS**

DANIEL MUÑOZ P.¹
LINA CASTRO H.²

RESUMEN

Los incendios forestales modifican la respuesta hidrológica de una cuenca en función del grado de perturbación producido en el suelo y en la capa vegetal, para lo cual se utiliza el término severidad. El presente trabajo se centra en el estudio del incendio La Rufina, ocurrido el año 1999 en la comuna de San Fernando y que afectó más de 25.000 hectáreas según la CONAF. El objetivo del trabajo es evaluar la severidad del incendio forestal mediante el índice espectral dNBR calculado a partir de imágenes satelitales Landsat 5 TM y el uso de herramientas SIG. El índice dNBR fue utilizado para definir el área afectada y la severidad producida por el incendio forestal, la que será un insumo para la definición del parámetro CN del método Curva Número-SCS en la modelación hidrológica que se realizará en una etapa posterior a la de este trabajo por medio del software HEC-HMS para una situación previa y otra posterior a la ocurrencia del incendio forestal. Adicionalmente se calculó el índice NDVI para estudiar el impacto producido en la capa vegetal y la recuperación de esta a uno, dos y tres años de ocurrido el incendio forestal. Los resultados obtenidos indican que el 80% del área analizada resultó con algún grado de severidad a raíz del incendio, y que el área afectada pasó de tener principalmente zonas clasificadas como “vegetación moderada” (55%) y “vegetación alta” (39%), a zonas clasificadas como “sin vegetación” (30%) y “vegetación ligera” (46%) debido al incendio. Al cabo de 2 años se alcanza una recuperación vegetal que presenta valores similares a los originales.

¹Alumno Memorista, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María – Daniel.munozp@alumnos.usm.cl

²Profesor Auxiliar, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María – Lina.castro@usm.cl

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales arrasaron enormes extensiones de vegetación provocando importantes alteraciones sobre el ecosistema: transformación de las propiedades físicas-químicas-biológicas del suelo, alteración de la vida silvestre, variaciones fisicoquímicas de los componentes atmosféricos y cambios hidrológicos sobre las cuencas afectadas (Neary et. al., 2005). Respecto a esto último, varios componentes del ciclo hidrológico se ven afectados, en mayor o menor medida, por el fuego: la interceptación, infiltración, evapotranspiración, capacidad de almacenamiento de humedad del suelo, escorrentía superficial, entre otros (West Consultant Inc., 2011). Además, dependiendo del daño producido por el fuego se puede formar una capa hidrofóbica bajo la superficie del suelo que elimina/reduce la capacidad de infiltración (García-Chevesich, 2015).

Para describir la magnitud de la perturbación producida por el fuego y, por lo tanto, el grado de alteración de los componentes del ecosistema se utiliza el término severidad (Neary et. al., 2005). La severidad incorpora los efectos producidos en el suelo (pérdida de material orgánico, pérdida de estructura granular, reducción de infiltración, etc.) y en la capa vegetal (cantidad de material consumido, tiempo proyectado para recuperación, etc.). Según Parsons (2010) se definen tres categorías de severidad: baja, media y alta. En la primera no se observan alteraciones estructurales del suelo ni hay cambios en la escorrentía superficial, en la severidad media ocurre un aumento de escorrentía clasificado como leve a moderado y generalmente no hay alteración de las propiedades estructurales del suelo, mientras que en las zonas afectadas con severidad alta se produce pérdida estructural del suelo, aumento de escorrentía, presencia de suelo hidrofóbico, entre otros efectos.

Una herramienta utilizada en el análisis de incendios forestales es la teledetección, la cual permite delimitar el área afectada y determinar la severidad alcanzada en la zona del incendio por medio de la combinación de ciertas bandas espectrales presentes en las imágenes satelitales (Chuvieco, 2009). Esta combinación de bandas da origen a los índices espectrales, los cuales permiten obtener información mejorada, aislada y que facilita el análisis específico de ciertas características de la superficie de la Tierra (Key & Benson, 2006). En el estudio de incendios forestales se utilizan los índices espectrales NBR (*Normalized Burn Index*) y dNBR (*Difference Normalized Burn Index*) para definir la severidad del incendio forestal y delimitar el área de afectación, y el índice NDVI (*Normalized Differenced Vegetation Index*) para estudiar la variación de la capa vegetal.

En Chile se han desarrollado algunas publicaciones relacionadas con el uso de índices espectrales y el estudio de incendios forestales: Navarro (2008) utiliza el índice dNBR para determinar la severidad y el perímetro de afectación del incendio forestal ocurrido en el Parque Nacional Torres del Paine el año 2005 y Mattar (2012) hace lo propio para el incendio forestal ocurrido el año 2011 en el mismo Parque Nacional, Vidal (2017) estima la generación de gases de efecto invernadero (GEI) producidos por el incendio La Rufina a partir del mapa de severidad y la CONAF (2017) determina los niveles de afectación producidos por el mega incendio del año 2017.

El objetivo del presente trabajo es evaluar la severidad del incendio forestal La Rufina en el marco de la evaluación hidrológica de la cuenca afectada para una situación previa y otra posterior a la ocurrencia del incendio forestal. Los resultados permitirán estimar cambios en los parámetros de modelación hidrológica del método de lluvia-escorrentía desarrollado por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos (método Curva Número), particularmente del parámetro CN mediante el mapa de severidad obtenido.

2. METODOLOGÍA

En la Figura 1 se muestra el esquema metodológico del trabajo desarrollado. En primer lugar, se descargaron las imágenes satelitales para el periodo en estudio (diciembre/1998 – enero/2002) y luego las imágenes fueron calibradas (radiométrica y atmosféricamente). Hecho lo anterior, se calcularon los índices espectrales NDVI, NBR y dNBR, con el fin de estudiar la variación de la cubierta vegetal (índice NDVI) y calcular los niveles de severidad producidos por el incendio y delimitar el área afectada (índices NBR y dNBR).

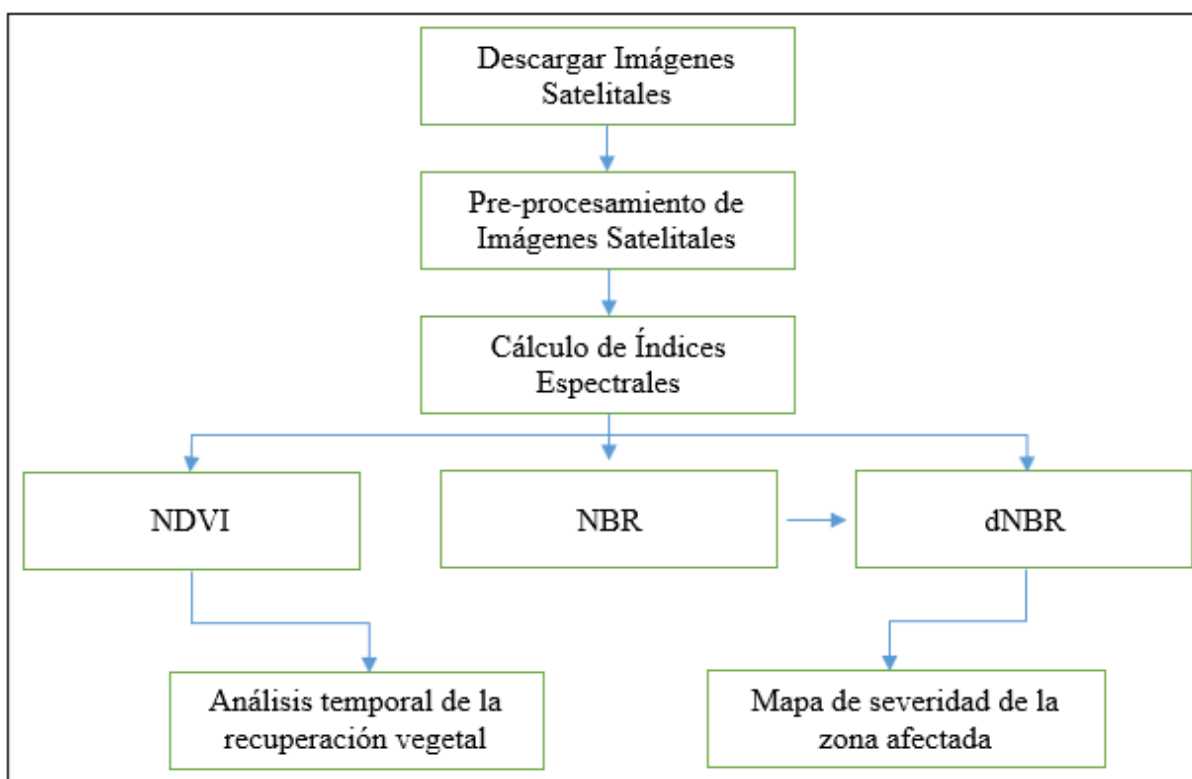


Figura 1. Esquema de la metodología desarrollada.

Imágenes Satelitales

La teledetección o percepción remota (del inglés *remote sensing*) se puede definir como aquella técnica que permite obtener imágenes de la superficie terrestre desde sensores aéreos o espaciales por medio de un flujo energético producido entre la superficie terrestre y el sensor (Chuvieco, 2008). Los sensores de teledetección están adaptados para captar ciertos intervalos de longitudes de onda, llamadas bandas espectrales, las que responden de forma única a ciertas características de la superficie de la Tierra, como el contenido de agua, estructura vegetacional, composición mineral, entre otras (Key & Benson, 2006).

En el presente estudio se utilizan imágenes satelitales procedentes del sensor TM (acoplado al satélite Landsat 5), el cual cuenta con 7 bandas espectrales (ver Tabla 1), de las cuales se utilizaron la banda del espectro visible – Rojo (*Red*), la banda del infrarrojo cercano (*NIR*) y la banda del infrarrojo de onda corta (*SWIR2*).

Tabla 1. Bandas espectrales del Sensor TM (Satélite Landsat 5).

Banda	Descripción	Rango [μm]	Resolución [m]
B1	Visible (Blue)	0,45 – 0,52	30
B2	Visible (Green)	0,52 – 0,60	30
B3	Visible (Red)	0,63 – 0,69	30
B4	Near Infrared (NIR)	0,76 – 0,90	30
B5	Short-wave Infrared (SWIR1)	1,55 – 1,75	30
B6	Thermal	10,40 – 12,50	120
B7	Short-wave Infrared (SWIR2)	2,08 – 2,35	30

Pre-procesamiento de Imágenes Satelitales

Los pixeles de las imágenes satelitales originales se encuentran en unidades llamadas Digital Number (DN), las cuales deben ser calibradas para obtener imágenes con significancia física (Mattar, 2012), es decir, para que se puedan extraer y analizar las medidas físicas de las imágenes (Ariza et. al., 2018). La calibración se hace por cada banda espectral según el procedimiento que se describe a continuación. En primer lugar, las imágenes son transformadas a unidades de energía reflejada (o radiancia espectral) mediante el proceso denominado calibración radiométrica, dado por la ecuación (1) (Key & Benson, 2006):

$$L_{\lambda} = DN_i \cdot G_b + B_b \quad (1)$$

Donde L_{λ} corresponde a la radiancia espectral $\left[\frac{\text{watts}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}\right]$, DN_i al valor original del pixel, G_b al valor de gain y B_b al valor de bias, los cuales son obtenidos desde el archivo MTL.txt del metadatos incluido en la carpeta de las imágenes satelitales descargadas.

Posteriormente se aplica una segunda calibración con el fin de minimizar los efectos atmosféricos (calibración atmosférica), en la cual se obtiene una imagen de reflectancia de la superficie de la Tierra. Esta segunda calibración tiene una importancia crucial ya que los gases presentes en la atmósfera dispersan y absorben parte de la señal original (Chuvieco, 2008) y permite la aplicación de procesos y modelos estándar para las escenas y fechas analizadas (Galindo et. al., 2014). El proceso de calibración atmosférica se indica en la ecuación (2) (Key & Benson, 2006):

$$\rho = \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{SUN} \cdot \cos \theta_s} \quad (2)$$

Donde ρ corresponde a la reflectancia atmosférica [-], L_{λ} a la radiancia espectral $\left[\frac{\text{watts}}{\text{m}^2 \cdot \text{sr}}\right]$, d a la distancia entre el sol y la Tierra [UA] y E_{SUN} a la irradiancia solar exoatmosférica media $\left[\frac{\text{watts}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}}\right]$.

Los valores de irradiancia solar exoatmosférica depende de cada banda espectral y para el sensor TM son: B1=1958, B2=1827, B3=1551, B4=1036, B5=214,9 y B7=80,65, en todos los casos las unidades son $\left[\frac{\text{watts}}{\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}}\right]$ (Chander, Markham & Helder, 2009).

Índices Espectrales

Las bandas espectrales pueden ser combinadas dando origen a los índices espectrales. A continuación, se detallan los índices NDVI, NBR y dNBR utilizados en el presente estudio.

Índice NDVI

El índice NDVI es un índice espectral de vegetación que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación con base en la medición de la intensidad de la radiación de ciertas bandas del espectro electromagnético que la vegetación emite o refleja (Alonso, 2020), se relaciona directamente con la cantidad de biomasa verde por unidad de área y se utiliza como una medida del área foliar, la producción vegetal y como un índice de sequedad (Key & Benson, 2006). El índice NDVI se define en función de la banda del infrarrojo cercano (*NIR*) y de la banda del espectro visible - Rojo (*Red*), según la ecuación (3) y la clasificación entregada en la Tabla 2.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (3)$$

Tabla 2. Clasificación de índice NDVI (Key & Benson, 2006).

Valor dNBR	Clasificación índice NDVI
< 0,01	Nubes y agua
0,01 a 0,1	Suelo sin vegetación
0,1 a 0,2	Vegetación ligera
0,2 a 0,4	Vegetación moderada
> 0,4	Vegetación alta

Índices NBR y dNBR

El índice dNBR es utilizado para estimar el grado de severidad y delimitar el área de afectación. Se basa en la comparación de dos imágenes NBR de escenas temporales diferentes (una antes y otra después de la ocurrencia del incendio), con el fin de captar cambios en la estructura de la vegetación y en la reflectividad del suelo (CONAF, 2017). El índice NBR se compone de las dos bandas espectrales que reaccionan en mayor medida a los efectos del fuego, el infrarrojo cercano (*NIR*) y la banda del infrarrojo de onda corta (*SWIR2*) (Key & Benson, 2006), según se indica en la ecuación (4).

$$NBR = \frac{NIR - SWIR2}{NIR + SWIR2} \quad (4)$$

Teniendo en cuenta que el incendio La Rufina ocurrió entre el 02 y el 15 de enero del año 1999 (Haltenhoff, 2010), se utilizan las imágenes satelitales disponibles inmediatamente anterior (pre) e inmediatamente posterior (post) a la ocurrencia del incendio, sobre las cuales se calcula el índice NBR respectivo. El índice dNBR se define según la ecuación (5) (Key & Benson, 2006).

$$dNBR = NBR_{prefire} - NBR_{postfire} \quad (5)$$

Se considera que en las imágenes satelitales obtenidas antes y después del incendio todo se mantiene en igualdad de condiciones, salvo la zona afectada por el incendio forestal. De esta manera se supone que las zonas que no son afectadas por el incendio presentan características fenológicas y de humedad similar en ambas imágenes, dando resultados cercanos al cero, mientras que en las zonas mayormente afectadas presentan valores positivos altos (Key & Benson, 2006). Por este motivo, las imágenes utilizadas para analizar la recuperación de la vegetación en los años posteriores fueron seleccionadas en la misma época del año (diciembre/1999, enero/2001 y enero/2002). El índice dNBR se clasifica en siete categorías según el grado de afectación provocado por el incendio forestal, de acuerdo con el detalle presentado en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de rangos de severidad índice dNBR (Key & Benson, 2006).

Valor dNBR	Nivel de Severidad
< -0,25	Alto crecimiento vegetacional post incendio
-0,25 a -0,1	Bajo crecimiento vegetacional post incendio
-0,1 a 0,1	No quemado
0,1 a 0,27	Severidad baja
0,27 a 0,44	Severidad media - baja
0,44 a 0,66	Severidad media – alta
> 0,66	Severidad alta

3. ÁREA DE ESTUDIO Y BASE DE DATOS ESPACIALES

Área de Estudio

La cuenca “Río Tinguiririca Alto” se ha seleccionado luego de realizar un análisis de los principales incendios ocurridos en las últimas tres décadas en Chile, considerando el área y grado de afectación, presencia de estaciones de medición (estaciones pluviométricas, fluviométricas y meteorológicas) y disponibilidad de imágenes satelitales.

El 02 de enero del año 1999 se inició el denominado incendio “La Rufina” en la precordillera de la Región de O’Higgins, comuna de San Fernando, el cual tuvo una duración de 13 días y afectó una superficie de 25.389 hectáreas (Haltenhoff, 2010) de pastizales, bosque esclerófilo, plantaciones de pino insigne y bosque nativo (roble y ciprés), además de la destrucción de 13 casas (CONAF, 2016).

La cuenca en estudio se definió a partir de la estación fluviométrica “Río Tinguiririca Bajo Los Briones” de la DGA, tiene un área aproximada de 176.500 hectáreas, es de régimen hidrológico mixto, el rango de elevación está comprendida entre los 1.390 y los 3.600 msnm, y el incendio afectó un área equivalente al 14% del área de la cuenca. En la Figura 2 se muestra la ubicación de la cuenca en estudio, el área de afectación del incendio “La Rufina” y la ubicación de las estaciones de medición que serán utilizadas para calibrar los parámetros de modelación en el trabajo de tesis posterior al presente trabajo.

Dada la magnitud del incendio y la urgencia de contrarrestar el impacto sobre los ecosistemas dañados se realizaron una serie de iniciativas con el fin de restaurar la zona afectada (CONAF,

2016). Se desarrollaron obras de conservación enfocadas en la restauración hidrológica y forestal de la cuenca, realizándose obras mecánicas para el control y prevención de la erosión y trabajos biológicos, consistentes en la siembra de pastos, manejo de regeneración y reforestación de ciertas especies (Navarro, 2001).

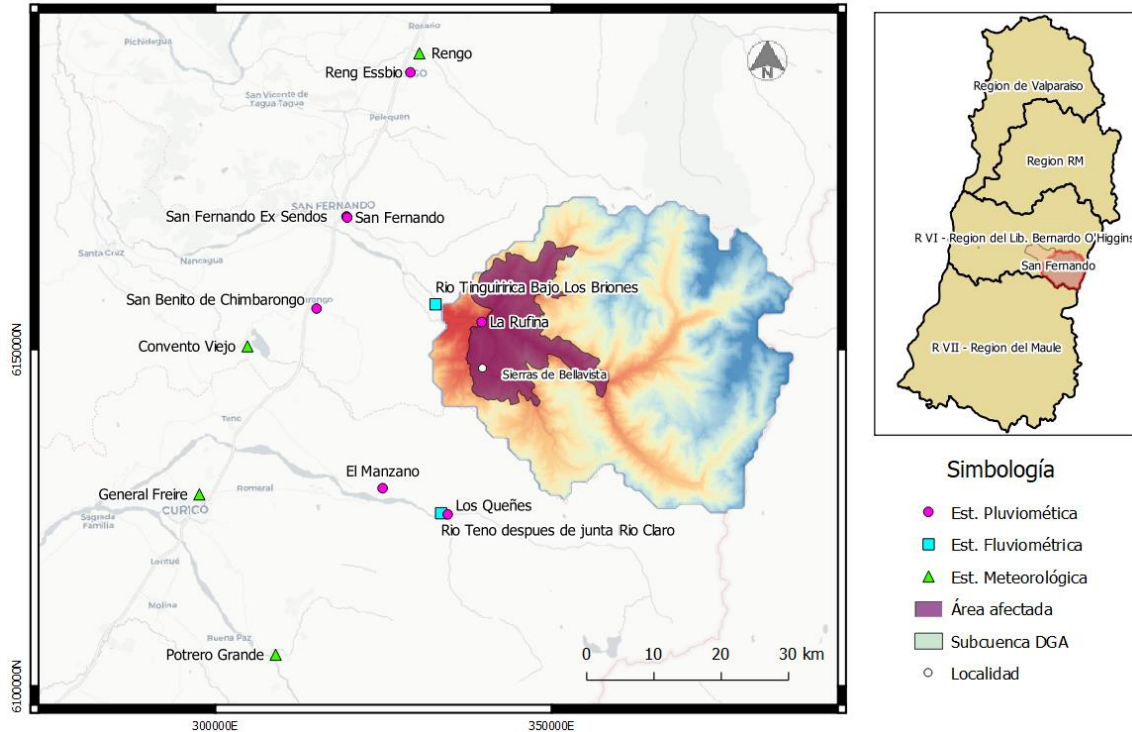


Figura 2. Ubicación de la cuenca en estudio.

Vegetación y Tipo de Suelo

De acuerdo con lo indicado por Navarro (2001) la vegetación del área afectada corresponde al tipo esclerófilo de estructura arborescente, con especies tales como el Quillay, Litre, Peumo, Espino y Maqui, también existe la presencia de renovales de Roble y de Pino Radiata. Por otra parte, Vidal (2017), quien estimó la generación de gases de efecto invernadero producidos por el incendio La Rufina, menciona que el 60% de la vegetación afectada corresponde a matorral, el 19% a renoval, el 6,6% a estepa andina, el 6,6% a bosque nativo y el 4,1% a plantaciones.

Respecto al tipo de suelo, Navarro (2001) indica que los suelos de la zona de Sierras de Bellavista corresponden a suelos derivados del batolito andino, ubicado en la cordillera de la Región de O'Higgins. Son suelos moderadamente profundos, de texturas francas en la superficie y franca-arenosa en la profundidad. Presentan colores que varían del pardo oscuro al pardo amarillento y la estructura es de bloques angulares muy sueltos.

Imágenes Satelitales

Para estudiar el efecto producido por el incendio forestal se dispuso la utilización de dos imágenes satelitales, una previa al incendio forestal y otra posterior a este. Además, se dispuso de tres imágenes satelitales que representan la condición del lugar de estudio a uno, dos y tres años de

ocurrido el incendio, con el fin de conocer la variación de la severidad y la recuperación de la cubierta vegetal en la zona afectada por el incendio en este periodo de tiempo (este estudio busca entregar una mirada global a la recuperación de la cuenca, haciendo énfasis en el efecto inmediato del incendio). Las imágenes satelitales proceden del sensor TM (satélite Landsat 5) y fueron descargadas del servidor de imágenes satelitales del U.S. Geological Survey (<http://earthexplorer.usgs.gov>). El criterio de selección de las imágenes, además del criterio temporal, consistió en que las imágenes presentaran baja nubosidad y que abarcaran íntegramente la zona en estudio (*Path 233* y *Row 084*). Los principales atributos de las imágenes satelitales utilizadas son presentados en la Tabla 4.

Tabla 4. Imágenes satelitales utilizadas (Sensor TM - Landsat 5).

ID	Fecha	Tipo de Imagen	Nombre	Nubosidad (%)
1	31 / 12 / 1998	Pre Incendio	Pre	5,0
-	Enero/1999	Incendio	-	-
2	05 / 03 / 1999	Post Incendio	Post	14,0
3	02 / 12 / 1999	Post Incendio	Post 12 meses	3,0
4	05 / 01 / 2001	Post Incendio	Post 24 meses	6,0
5	08 / 01 / 2002	Post Incendio	Post 36 meses	3,0

4. RESULTADOS

En la Figura 3 se observan los resultados del índice NDVI aplicado a la cuenca en estudio para los periodos mencionados en la Tabla 4 según la clasificación señalada en la Tabla 2. En la figura se resalta el área afectada por el incendio La Rufina mediante un polígono rojo. La figura muestra gráficamente la pérdida de vegetación en la zona afectada por el incendio mediante la comparación visual de las imágenes correspondientes a la situación pre y post incendio (imágenes a y b). Además, se observa que al transcurrir un año (imagen c) existe recuperación parcial de la vegetación en la zona afectada (hipótesis que posteriormente es aceptada con el análisis realizado a los resultados del índice dNBR), mientras que al transcurrir dos años (imagen d) se alcanza una condición similar a la condición previa al incendio.

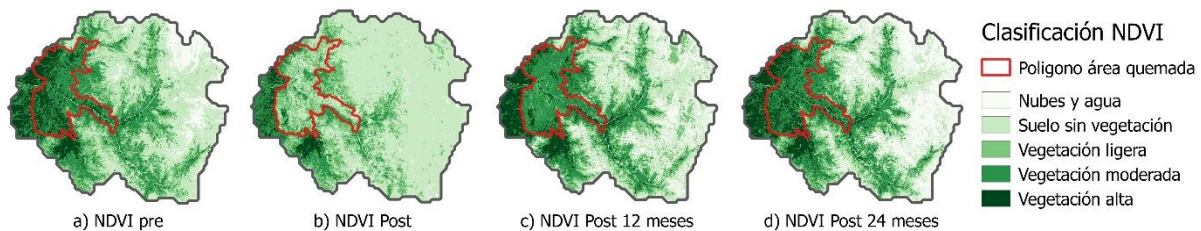


Figura 3. Índice NDVI en la cuenca en estudio.

La figura 4 muestra la variación (en porcentaje) de cada una de las clasificaciones del índice NDVI. Respecto a las situaciones pre y post incendio se observa la disminución de “Vegetación Moderada” (de 55% a 21%) y de “Vegetación Alta” (de 39% a 3%), en contraste con el aumento de “Suelo sin Vegetación” (de 1% a 30%) y de “Vegetación Ligera” (de 4% a 46%). Esta diferencia

comienza a revertirse a partir de un año, obteniéndose valores de vegetación similares a la condición previa al cabo de dos años de ocurrido el incendio forestal (se obtienen variaciones porcentuales respecto a la situación previa de: -8% en vegetación Ligera, -2% en vegetación Moderada y +3% en vegetación alta). Se observa también que la “vegetación moderada” disminuye a medida que aumenta la “vegetación alta” para las escenas temporales correspondientes a uno, dos y tres años de la ocurrencia del incendio, lo cual indicaría que hay densificación de la vegetación y se observa que al cabo de tres años existe mayor “vegetación alta” que previo al incendio.

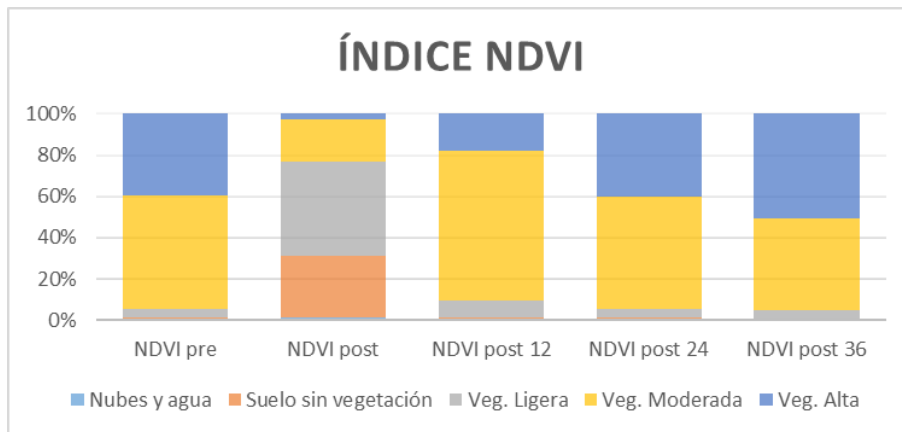


Figura 4. Variación de índice NDVI en la zona afectada.

En la Figura 5 se muestra la cuenca en estudio y la imagen dNBR del incendio forestal obtenida por comparación de la imagen NBR de la situación previa y posterior a la ocurrencia del incendio forestal. El polígono de afectación tiene un área de 25.341 hectáreas y se observan diferentes niveles de severidad de acuerdo a la clasificación dada en la Tabla 3.

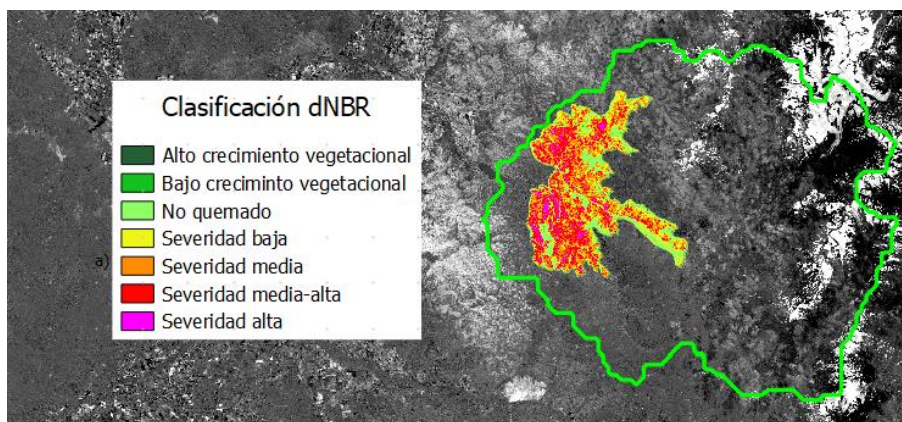


Figura 5. Área de afectación incendio La Rufina.

El índice dNBR se ha calculado, además, para la situación a uno, dos y tres años de ocurrido el incendio comparando la imagen NBR para la situación previa con la imagen NBR correspondiente a cada una de las imágenes posteriores al incendio. En la Figura 6 se observan los resultados obtenidos para el polígono de afectación según la categorización señalada en la Tabla 3. En la primera imagen se presenta la severidad producida por el incendio, mientras que en el resto de las

imágenes (figuras b, c y d) se observa la disminución de la severidad al transcurrir el tiempo, coincidiendo con la recuperación de la capa vegetal mostrada en la Figura 3 y en la Figura 4.

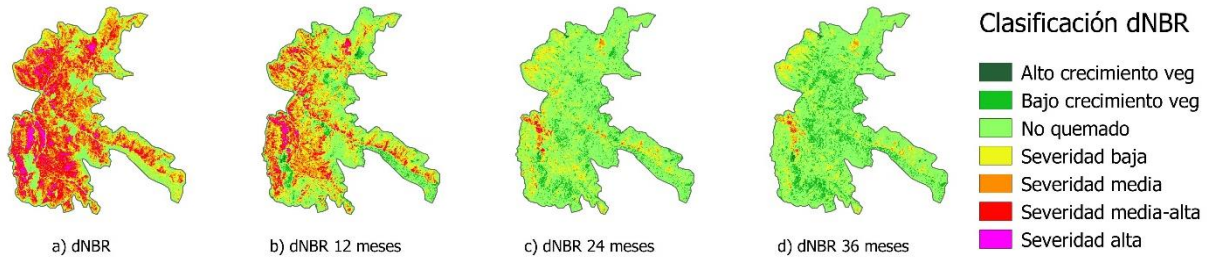


Figura 6. Índice dNBR en la zona afectada por el incendio.

La Figura 7 muestra la variación porcentual de la severidad para la zona afectada según la clasificación de severidad indicada en la Tabla 3 (se considera “no quemado” a las categorías “alto crecimiento”, “bajo crecimiento” y “no quemado”). De esta figura se observa que un 80% del área presenta algún grado de severidad al ocurrir el incendio forestal (severidad baja 22%, severidad media 28%, severidad media-alta 24% y severidad alta 6%), la cual se reduce paulatinamente al transcurrir uno, dos y tres años desde la ocurrencia de este (58%, 20% y 13% del área total presenta algún grado de severidad, respectivamente). Además, se produce el aumento de las zonas categorizadas como “no quemado” variando desde el 20% para la situación inmediatamente posterior al incendio hasta alcanzar el 80% y 87% al transcurrir 2 y 3 años respectivamente.

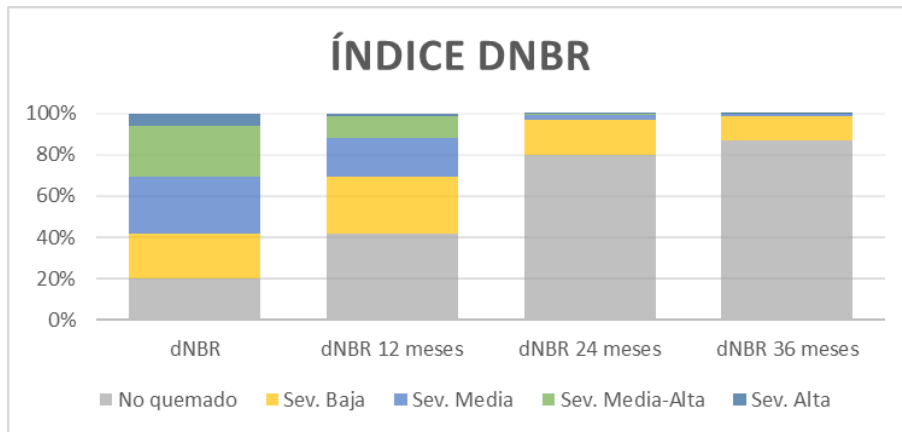


Figura 7. Variación del índice dNBR en la zona afectada.

Al analizar conjuntamente la Figura 4 y la Figura 7 se observa una relación directa entre el aumento de “suelo sin vegetación” y “vegetación ligera” con la presencia de todos los niveles de severidad en los resultados del índice dNBR por la ocurrencia del incendio forestal. A medida que los niveles de severidad categorizados como “severidad media” y “severidad media-alta” representan un menor porcentaje del área en el polígono de afectación se produce un aumento de las clasificaciones de “vegetación moderada” y “vegetación alta” dadas por el índice NDVI.

5. PRE-CONCEPTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Para analizar los efectos hidrológicos producidos por el incendio La Rufina se realizará la modelación hidrológica de la situación previa y posterior a la ocurrencia del incendio utilizando el software HEC-HMS desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineers, 2019). La modelación hidrológica requiere la definición de características morfométricas y físicas de la cuenca, y de los parámetros requeridos por el modelo lluvia-escorrentía escogido.

Para evaluar la respuesta hidrológica de la cuenca en la situación post incendio será necesario modificar los parámetros del suelo en función de la severidad producida por el incendio, en ese sentido es que ciertos autores han relacionado la severidad del incendio con variaciones al valor del parámetro CN del modelo lluvia escorrentía del SCS¹ para una situación post incendio. El parámetro CN es un parámetro que depende de la cobertura y tipo de suelo, y en el caso de los incendios forestales ambos pueden verse seriamente afectados en función de la severidad.

Trabajos realizados por Springer & Hawkins (2005), Stuart (2000), Livingstone et. al. (2005), Higginson and Jannecke (2007), Solt & Muir (2006) y Cerelli (2005) muestran variaciones al parámetro CN en cuencas afectadas por incendios forestales en función de la severidad. En la Tabla 5 se resumen las variaciones al parámetro CN obtenidos por los autores, cuyos resultados fueron obtenidos por medio de calibración de los parámetros en los modelos hidrológicos desarrollados.

Tabla 5. Modificaciones al parámetro CN propuesta por autores.

Severidad		Stuart	Livingstone	Higginson and Jannecke	Solt and Muir	Cerelli
Alta	con suelo hidrofóbico	-	95	CN _{pre} + 15	90	94
	sin suelo hidrofóbico		92			-
Media	con suelo hidrofóbico	80	89	CN _{pre} + 10	85	94
	sin suelo hidrofóbico		87			-
Baja		70 – 72	80 – 83	CN _{pre} + 5	80	-
No quemado		60 – 64	55 – 75	-	80	-

El modelo hidrológico del trabajo actual considera la división de la cuenca hidrográfica en tres subcuencas como se muestra en la Figura 8. La delimitación de las subcuencas y la determinación del cauce principal y secundarios fue realizada con la herramienta GRASS incorporada en el software QGIS (imagen b). En el modelo hidrológico se incluyen: 3 elementos *subbasin*, 1 elemento *reach* y 1 elemento *junction* (imagen c). Los valores del parámetro CN por cada

¹ SCS: Soil Conservation Service (actualmente el servicio se llama NRCS: Natural Resources Conservation Service).

subcuenca se obtendrán por ponderación de áreas según tipo de suelo y cobertura vegetal en acuerdo con los valores señalados por el NRCS (2004) y el “Catastro de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra de la Región de O’Higgins” de la CONAF (disponible en el portal *ide.cl*). El catastro entrega información actualizada al año 2013 del uso de suelo y de la cubierta vegetal en base a ocho categorías: 1) zona urbana, 2) terreno agrícola, 3) matorral, 4) bosque, 5) humedal, 6) rocas y cajas de río, 7) nieve y 8) agua (según se muestra en la Figura 9). Además, se utilizará información contenida en los Catastros de Bosque Nativo de la CONAF-CONAMA para el año 1999 (CONAF-CONAMA, 1999) y 2003 (CONAF-CONAMA, 2003).

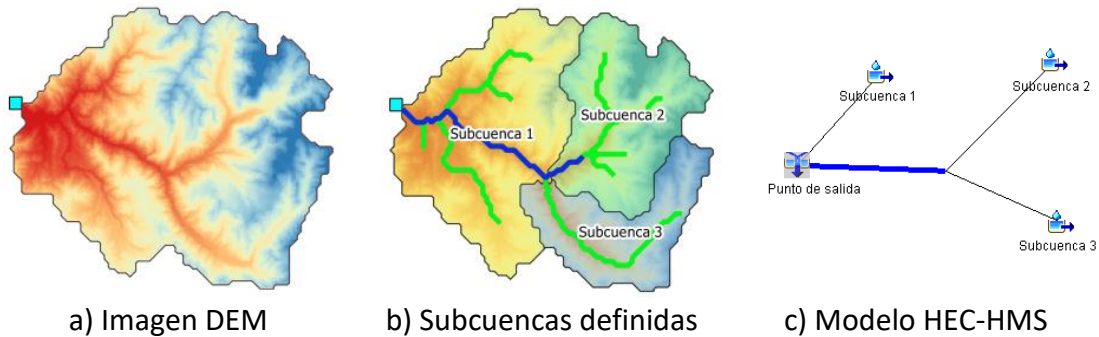


Figura 8. Modelo hidrológico.

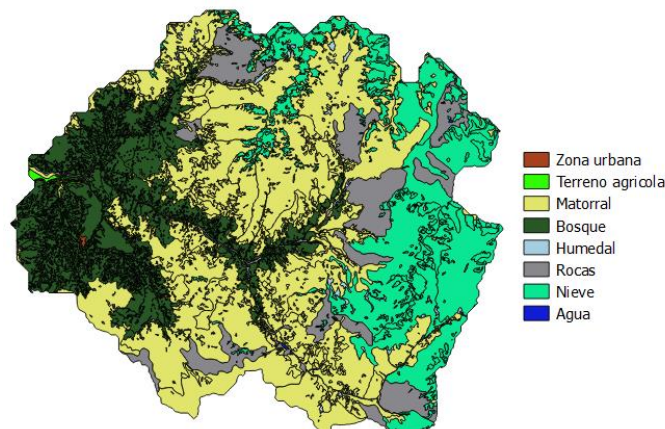


Figura 9. “Catastro de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra” para la cuenca en estudio – información actualizada al año 2013.

6. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

La utilización de imágenes de teledetección permite realizar un estudio rápido y sistemático de las zonas afectadas por incendios forestales mediante el índice de severidad dNBR, permitiendo la toma de decisiones respecto a planes de recuperación de cuencas para evitar erosión y medidas enfocadas en la recuperación hidrológica y forestal de la cuenca. El índice dNBR ha sido utilizado en Chile por ciertos autores con el fin de crear mapas de severidad y delimitar el área de afectación producida por incendios forestales (Navarro, 2008; Mattar, 2012; Vidal, 2017 y CONAF, 2017). Respecto al incendio La Rufina se cuenta con los datos oficiales entregados por la CONAF (Haltenhoff, 2010) y el trabajo desarrollado por Vidal (2017), resumidos en la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación CONAF, trabajo actual y Vidal.

	CONAF	Trabajo Actual	Vidal
Área afectada [ha]	25.389	25.341	25.675
Diferencia [ha]	-	-48	+286
Diferencia %	-	-0,2%	+1,1%

De la tabla anterior se puede observar que el área de afectación calculado en el presente trabajo se ajusta de buena manera a los datos oficiales de la CONAF y al trabajo desarrollado por Vidal. Respecto a los distintos niveles de severidad obtenidos dentro del área afectada, y tal como señala Vidal (2017), se deben a las diferentes variables geomorfológicas y climáticas presentes en el lugar afectado. Las variables geomorfológicas principales son la altitud, pendiente, exposición, tipo de suelo y vegetación afectada, mientras que las variables climáticas principales son la humedad de la vegetación, temperatura y características del viento (dirección y velocidad). Además, influyen variables como biomasa disponible para combustionar, intensidad (temperaturas alcanzadas y duración), área quemada y tiempo desde el último incendio (CONAF, 2017).

Por otra parte, el índice NDVI permite conocer el estado de la capa vegetal y realizar un seguimiento de la recuperación de esta a través del tiempo. Los resultados presentados indican que al cabo de 2 años de ocurrido el incendio se alcanzan valores similares a los calculados previo al incendio, lo cual se explica por el tipo de vegetación afectada (60% corresponde a matorral, 19% a renoval y porcentajes menores para otros tipos de vegetación) y por la realización de obras de conservación realizadas en el sector de Sierras de Bellavista enfocadas en la restauración hidrológica y forestal de la cuenca (siembra de pastos y reforestación de ciertas especies).

Los resultados de los índices espectrales muestran una relación directa entre el aumento de “suelos sin vegetación” y “vegetación ligera” (índice NDVI) con la presencia de todos los niveles de severidad en el área afectada (índice dNBR) producto del incendio forestal. Al transcurrir los años se muestra una disminución en los niveles de severidad coincidiendo con el aumento de vegetación clasificada como “vegetación moderada” y “vegetación alta”. Los resultados presentados respecto a los índices espectrales pueden ser extendido a un mayor número de años para evaluar la recuperación a largo plazo, pero teniendo en cuenta otras variables climatológicas y la ocurrencia de eventos ajenos al desarrollo normal de la cuenca (incendios forestales, trabajos forestales, etc.).

Hidrológicamente son varios los componentes que se ven afectados por el incendio forestal (aumento de erosión, reducción de infiltración, disminución de rugosidad superficial, disminución de tiempos de concentración, aumento de escorrentía, etc.), por lo que el parámetro CN del modelo lluvia-escorrentía del SCS se ve modificado para captar estos cambios hidrológicos. En ese sentido, existen varios estudios en donde calibran el parámetro CN para la situación post incendio que serán utilizados como bibliografía base (Cyzdik and Hogue 2009; Chen, Berli & Chief 2013; Oliveira & Salla 2017).

En la etapa posterior al de este trabajo el parámetro CN será calibrado para modelar la situación post incendio según los datos fluviométricas y meteorológicos recolectados de estaciones de medición de la DGA y DMC.

REFERENCIAS

- Alonso, D. (2020). *MappingGIS*. Obtenido de <https://mappinggis.com/2015/06/ndvi-que-es-y-como-calcularlo-con-saga-desde-qgis/>
- Ariza, A., Roa, O. J., Serrato, P. K., & León, H. A. (2018). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. *Revista Perspectiva Geográfica*, 23 (1), 105-122. doi:10.19053/01233769.5863.
- Cerrelli, G. A. (2005). *FIRE HYDRO: A simplified method for predicting peak discharges to assist in the design of flood protection measures for western wildfires*. In *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts: Engineering, Ecological, and Economic Challenges* (pp. 1-7).
- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). *Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO-1 ALI sensors*. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903.
- Chen, L, Berli, M. & Chief, K. (2013). *Examining Modeling Approaches for the Rainfall-Runoff Process in Wildfire-affected Watersheds: Using San Dimas Experimental Forest*. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(4), 851-866.
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la tierra desde el espacio*. (No. 528.8 CHU).
- Chuvieco, E. (2009). *Detección y Análisis de incendios Forestales desde satélites de Teledetección*. *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – España*, 103(1), 173-182.
- Cydzik, K. & Hogue, T. S. (2009). *Modeling Postfire Response and Recovery Using the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling Systems (HEC-HMS)*.
- CONAF. (2016). *Rescatando los Ecosistemas Degradados*. *Revista Chile Forestal* N°383. ISSN: 0761190.
- CONAF. (2017). *Análisis de la Afectación y Severidad de los incendios Forestales ocurridos en enero y febrero de 2017 sobre los usos de suelo y los ecosistemas naturales presentes entre las regiones de Coquimbo y Los Ríos de Chile*. Informe Técnico. 56p. Santiago, Chile.
- CONAF-CONAMA (2003). *Monitoreo y Actualización Catastro de Uso de Suelo y Vegetación, Sexta Región*. CONAF-CONAMA, Universidad Austral de Chile, BIOTA, INFOR.
- CONAF-CONAMA-BIRF, P. (1999). *Catastro y evaluación de recursos vegetacionales nativos de Chile: informe regional Sexta Región*. CONAF-CONAMA-BIRF, Universidad Austral de Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Católica de Temuco, Santiago, Chile.

- Galindo, G., Espejo, O. J., Rubiano, J. C., Vergara, L. K., & Cabrera, E. (2014). *Protocolo de procesamiento digital de imágenes para la cuantificación de la deforestación en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Bogotá DC, Colombia.
- García-Chevesich, Pablo A., (2015). *Control de la Erosión y Recuperación de Suelos Degradados*. Outskirts Press
- Haltenhoff Duarte, H. (2010). *Los grandes incendios forestales en Chile 1985-2009*. CONAF.
- Higginson, B., & Jarnecke, J. (2007). *Salt Creek BAER-2007 Burned Area Emergency Response*. Provo, UT: United National Forest. Hydrology Specialist Report. 11p.
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). *Landscape Assessment (LA) Sampling and Analysis Methods*. USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD.
- Livingston, R. K., Earles, T. A., & Wright, K. R. (2005). *Los Alamos post-fire watershed recovery: a curve-number-based evaluation*. In *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts: Engineering, Ecological, and Economic Challenges* (pp. 1-11).
- Mattar, C., Santamaría-Artigas, A., & Durán-Alarcón, C. (2012). *Estimación del área quemada en el Parque Nacional Torres del Paine utilizando datos de teledetección*. *Revista de teledetección*, 38(1), 36-50.
- Navarro, G; Lemus, M; Vásquez, R. & Bravo, R., 2001. *Recuperación hidrológica y forestal de la cuenca poniente del poblado de Sierras de Bellavista*. CONAF. San Fernando, Chile.
- Navarro Cerrillo, R. M., Hayas, A., García-Ferrer, A., Hernández Clemente, R., Duhalde, P., & González, L. (2008). *Caracterización de la situación posincendio en el área afectada por el incendio de 2005 en el Parque Nacional de Torres del Paine (Chile) a partir de imágenes multiespectrales*. *Revista chilena de historia natural*, 81(1), 95-110.
- Neary, D. G., Ryan, K. C., & DeBano, L. F. (2005). *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on soils and water*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-42-vol. 4. Ogden, UT: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 250 p. 42.
- NRCS. (2004). *“Hydrologic soil-cover complexes”*, in Part 630 Hydrology National Engineering Handbook, Natural Resources Conservation Service, Ed. USA: USDA, cap. 9, pp.-1-3.
- Oliveira, J. M. S. & Salla, M. R. (2017). *Modelling the Impacts of Wildfire of Surface Runoff in the Upper Uberabinha River Watersheds Using Hec-HMS*. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 11(1), 88-98.
- Parson, A., Robichaud, P. R., Lewis, S. A., Napper, C., & Clark, J. T. (2010). *Field guide for mapping post-fire soil burn severity*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-243. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 49 p., 243.

Solt, A., & Muir, M. (2006). *Warm fire hydrology and watershed report. Richfield. UT*: US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Region, Fishlake National Forest.

Springer, E. P., & Hawkins, R. H. (2005). *Curve number and peakflow responses following the Cerro Grande Fire on a small watershed*. In *Managing Watersheds for Human and Natural Impacts: Engineering, Ecological, and Economic Challenges* (pp. 1-12).

Stuart, B. (2000). *Maudlow Fire, Burned Area Emergency Rehabilitation (BAER) plan*. Townsend, MT: US Department of Agriculture, Forest Service, Northern Region, Helena National Forest.

US Army Corps of Engineers. (2019). *Hydrologic Engineering Center*. Obtenido de <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

Vidal, P., De Santis, A., Pérez, W., & Honeyman, P. (2017). *Uso de herramientas de teledetección para el análisis de la severidad y estimación de gases de efecto invernadero (GEI) en incendios forestales de gran magnitud. Estudio de caso incendio La Rufina, VI Región del LGB O'Higgins, Chile*. *Revista de Teledetección*, (50), 59-69.

West Consultants Inc.; 2011. *Sediment/Debris Bulking Factors and Post-Fire Hydrology for Ventura County Watershed Protection District, san Diego, California, EEUU*. 184p.