

RESPUESTA HÍDRICA ASOCIADA AL CAMBIO DE USO DE SUELO EN UNA CUENCA COSTERA DE LA REGIÓN DEL BIOBÍO*K. Martínez Sepúlveda¹, D. Caamaño Avendaño², E. Muñoz Ortiz³***RESUMEN:**

En los últimos años, los cambios de uso de suelo se han concentrado en la zona centro y sur de Chile, siendo el más frecuente la conversión de bosques nativos a plantaciones forestales exóticas de pino y eucaliptus. Estos están asociados a alteraciones en la disponibilidad y calidad del agua en la cuenca respectiva.

El objetivo de esta investigación es cuantificar los caudales para diferentes usos de suelos identificados para los años 2013, 2014, 2015, 2017, 2018 y 2019 en la cuenca del estero Bellavista ubicado en la comuna de Tomé, región del Biobío.

Para esto se obtuvieron las imágenes satelitales de las misiones Landsat 8 y se analizaron las distintas coberturas y áreas de suelo. El cálculo de caudales se realizó mediante el software Water Evaluation And Planning System (WEAP).

Se identificaron 5 tipos de usos de suelos representativos: bosque adulto, bosque medio, bosque joven, urbano y estéril, y se caracterizaron para los años 2013, 2014, 2015, 2017, 2018 y 2019 cuyos caudales medios diarios fueron analizados tanto para un evento de precipitación como para un año completo. El software logra buenos ajustes para caudales observados versus simulados, los cambios en el uso de suelo indican un aumento del caudal peak para las zonas con mayor zona estéril y un aumento del caudal promedio producto del aumento de la actividad forestal en la región.

PALABRAS CLAVES: Cambio de uso de suelo; Modelo hidrológico; WEAP.

ABSTRACT:

In recent years, land use changes have been concentrated in central and southern Chile, the most frequent being the conversion of native forests to exotic pine and eucalyptus forest plantations. These are associated with changes in water availability and quality in the respective basin.

The objective of this research is to quantify the flows for different land use identified for the years 2013, 2014, 2015, 2017, 2018 and 2019 in the Bellavista estuary basin located in the commune of Tomé, Biobío region.

For this, the satellite images of the Landsat 8 missions were obtained and the different coverings and ground areas were analyzed. The flow calculation was performed using the Water Evaluation And Planning System (WEAP) software.

Five types of representative land uses were identified: adult forest, medium forest, young, urban and sterile forest, and were characterized for the years 2013, 2014, 2015, 2017, 2018 and 2019 whose daily average flows were analyzed for both an event of precipitation as for a full year. The software achieves good adjustments for observed versus simulated flows, changes in land use indicate an increase in peak flow for areas with greater sterile areas and an increase in average flow due to the increase in forestry activity in the región.

KEYWORDS: Land use change; Hydrological model; WEAP.

¹ Estudiante, Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, kmartinez@ing.ucsc.cl

² Profesor Guía, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, dcaamano@ucsc.cl

³ Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, CHILE, emunozo@ucsc.cl

1. INTRODUCCIÓN

El cambio de uso de suelo produce transformaciones en los patrones de escorrentía superficial, especialmente cuando se producen tormentas con altas intensidades las que, están asociadas a inundaciones, erosión, difusión de contaminantes, remociones en masa entre otros efectos (Goudie, 1990; Weng, 2002). En la localidad de Bellavista de Tomé, al igual que en las principales ciudades de Chile, se está produciendo una rápida expansión de las superficies urbanas y forestales que, al combinarse con la ocurrencia de intensas lluvias, originan impactos asociados a las crecidas del estero Bellavista.

Los efectos de una lluvia extrema son de diversa índole, destacando inundaciones en los sectores topográficamente más deprimidos de la ciudad, daños a la infraestructura, riesgos a la integridad física de las personas y afectación a las condiciones normales de funcionamiento. Entonces cabe preguntarse por el efecto que genera el cambio de uso de suelo de la cuenca del Estero Bellavista, y por ello este estudio plantea el uso de un modelo de lluvia-escorrentía para cuantificar dichos impactos.

El objetivo de esta investigación es cuantificar los caudales para diferentes usos de suelos para los años 2013, 2014, 2015, 2017, 2018 y 2019 en la cuenca del estero Bellavista.

2. MÉTODOS

2.1 Área de estudio

La cuenca costera e islas entre río Itata y río Biobío se caracteriza por un sistema hidrográfico principal de carácter mixto, estas cuencas se caracterizan por presentar una red de drenaje principalmente ramificada (DGA, 2013). En las cuencas costeras que se ubican entre los ríos Itata y Biobío, en términos generales se puede afirmar que sólo se desarrollan actividades forestales y algunos cultivos de secano, siendo los primeros muy susceptibles a la erosión (CNR, 2013).

El área de estudio se encuentra dentro cuenca costera e islas entre río Itata y río Biobío, corresponde a la cuenca del estero Bellavista que abarca 116 km² (Figura 1) ubicada en la comuna de Tomé, región del Biobío. La cuenca se divide en dos subcuencas alineadas de norte a sur y que drenan a los esteros Nachur y Bellavista, respectivamente. La cuenca del estero Bellavista presenta elevaciones que van desde los 17 m.s.n.m. hasta los 404 m.s.n.m., la vegetación es principalmente del tipo forestal (*Pinus radiata* y *Eucalyptus globulus*), se ubica en los sectores interiores de Punta de Parra, sector Bellavista y la ruta que conecta las localidades de Tomé, Dichato y Pingueral (Sepúlveda R. 2019).

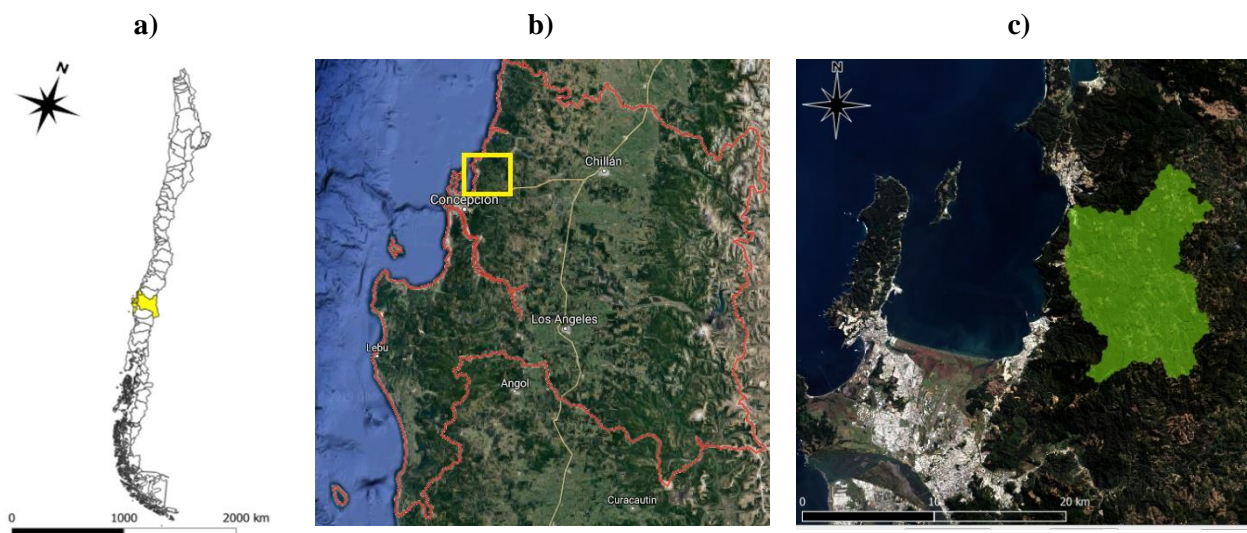


Figura 1: a) Mapa de Chile, b) Ubicación de la región del Biobío, c) Cuenca Bellavista

2.2 Herramienta de cálculo

El presente estudio se realizó mediante el código Water Evaluation And Planning System (WEAP; SEI, 2011) a través del módulo de hidrología para determinar la variación de la producción hídrica de la cuenca para diferentes usos de suelo.

En el modelo se representa el proceso lluvia-escorrentía en una unidad de respuesta hidrológica (URH) por medio de dos estanques con los cuales se busca reproducir los flujos superficiales y subterráneos (SEI, 2011). Esta herramienta unidimensional (Figura 2) se basa en ecuaciones empíricas que describen la evapotranspiración, escorrentía superficial, escurrimiento subsuperficial (flujo intermedio), y percolación profunda.

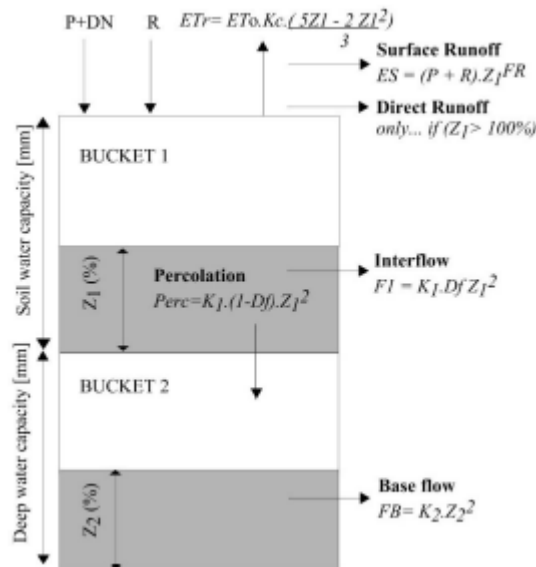


Figura 2: Elementos hidrológicos modelados en WEAP

En la Figura 2 se muestra la conceptualización de WEAP, las diferentes ecuaciones y criterios utilizados para representar la hidrología en una columna unidimensional. Donde P es la precipitación (mm); DN es el derretimiento de nieve (mm); R es la recarga de riego (mm); ETr es la evapotranspiración real (mm); ET_o es la evapotranspiración del cultivo de referencia (mm); K_c es el coeficiente de cultivo (adimensional); Z_1 es el porcentaje de agua en el estanque superior (%); Z_2 es el porcentaje de agua en el estanque inferior (%); K_1 es la conductividad hidráulica del estanque superior (mm día^{-1}); K_2 es la conductividad hidráulica del estanque inferior (mm día^{-1}); Df es la dirección preferencial del flujo (adimensional), que separa el flujo superficial del subterráneo; FR : coeficiente de resistencia a la escorrentía del uso de suelo (adimensional).

Las ecuaciones de balance en cada estanque son (SEI, 2011):

$$Z_{1max} \frac{dZ_1}{dt} = \left[Pe(t) - ET_o(Kc) \frac{5Z_1 - 2Z_1^2}{3} \right] - Pe(t)Z_1^{FR} - Df(K_1)Z_1^2 - K_2(1 - Df)Z_1^2 \quad (1)$$

$$Z_{2max} \frac{dZ_2}{dt} = K_2(1 - Df)Z_1^2 - K_2Z_2^2 \quad (2)$$

donde, $Z_{1m\acute{a}x}$ es la capacidad del estanque superior (mm); Pe es la precipitación y el derretimiento de nieve (mm); y $Z_{2m\acute{a}x}$ es la capacidad del estanque inferior (mm). Estas ecuaciones son empíricas y describen la dinámica de flujo que acontece en los estanques, los mismos que conceptualizan los componentes superficiales, subsuperficial y de percolación profunda del ciclo hidrológico.

La evapotranspiración potencial del cultivo de referencia (ET_o) en mm día⁻¹ se obtiene de la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 1998):

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T-273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (3)$$

donde Rn es la radiación neta (MJ m⁻² día⁻¹); G es la densidad de flujo de calor del suelo (MJ m⁻² día⁻¹); T es la temperatura media diaria (°C); u₂ es la velocidad del viento medida a 2 m sobre la superficie del suelo (m s⁻¹); e_s es la presión de saturación de vapor de agua (kPa); e_a es la presión de vapor (kPa); Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor (kPa °C⁻¹); y γ es la constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

2.3 Datos de entrada

El modelo WEAP requiere la entrada de datos climatológicos y usos de suelos para estimar los componentes del balance hidrológico en cada una de las unidades espaciales básicas que tienen que ser identificadas en el modelo y que representarán los flujos en la cuenca. De esta manera las unidades básicas de modelación corresponden a las zonas de captación y se denominan cuencas, que son definidas a través de procedimientos de delimitación de subcuencas. Cada una de éstas es caracterizada por el uso de suelo (SEI, 2011). Los datos climáticos incluyen registros medios diarios para diferentes periodos de los años 2013, 2014, 2015, 2017, 2018 y 2019. Los datos climáticos requeridos para realizar la modelación incluyen precipitación, temperatura, humedad, velocidad del viento, punto de derretimiento, punto de congelamiento, latitud y cantidad inicial de nieve (en caso de que esta variable sea relevante). Adicionalmente, datos de caudales en estaciones de medición son necesarios para poder comparar los resultados del modelo y realizar las respectivas calibraciones (SEI, 2011).

Los datos de precipitación y caudales medios diarios fueron obtenidos de la estación de la Dirección General de Aguas (DGA) Estero Bellavista en Tomé y combinados con datos medidos in situ para los años comprendidos entre el 2013 y 2019, los datos de temperatura, humedad y velocidad del viento fueron obtenidos de la estación Punta de Parra, ubicada a 4.5 km al sur de Bellavista y administrada por el Instituto de investigaciones agropecuarias (INIA). Para los usos de suelos se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8 de resolución 30x30m obtenidos del USGS (United States Geological Service), los cuales fueron georreferenciadas al sistema de coordenadas UTM WGS-84 HUSO 18 Sur. Posteriormente se procedió a obtener la red de drenaje, delimitar la cuenca y obtener los usos de suelos para los distintos años.

2.4 Clasificación de la cobertura terrestre

El método de clasificación supervisada fue empleado en el procesamiento de las imágenes satelitales, este método consistió en la selección de áreas representativas (ROIs o áreas de entrenamiento) para cada clase de uso de suelo identificada en la imagen. Las ROIs son polígonos dibujados sobre áreas homogéneas de la imagen que se superponen a píxeles pertenecientes a la misma clase de uso de suelo (Congedo, 2017).

El algoritmo de región incremental ha sido ampliamente utilizado como una técnica no paramétrica en reconocimiento de patrones, debido a su sencillez y buen desempeño. El algoritmo clasifica un nuevo objeto almacenando el conjunto de datos del ROI creado, luego calcula la distancia espectral de los píxeles adyacentes al ROI, si estos píxeles adyacentes son similares a los del ROI estos formaran parte de la misma clase. Un parámetro adicional es el ancho máximo, el que corresponde al lado de un cuadrado, centrado en el píxel semilla, el que inscribe el área de entrenamiento (si todos los píxeles tuviesen el mismo valor, el área de entrenamiento sería este cuadrado). El tamaño mínimo es utilizado como restricción para cada banda, seleccionando al menos los píxeles con mayor similitud al píxel semilla hasta que el número de píxeles seleccionados sean iguales al tamaño mínimo (Congedo, 2017).

Un ejemplo de región incremental se puede observar en la Figura 3a ya que el píxel central es usado como semilla, para la región incremental de una banda (Figura 3b) con el parámetro distancia espectral = 0.1; los píxeles similares son seleccionados para crear el área de entrenamiento (Figura 3c y 3d).

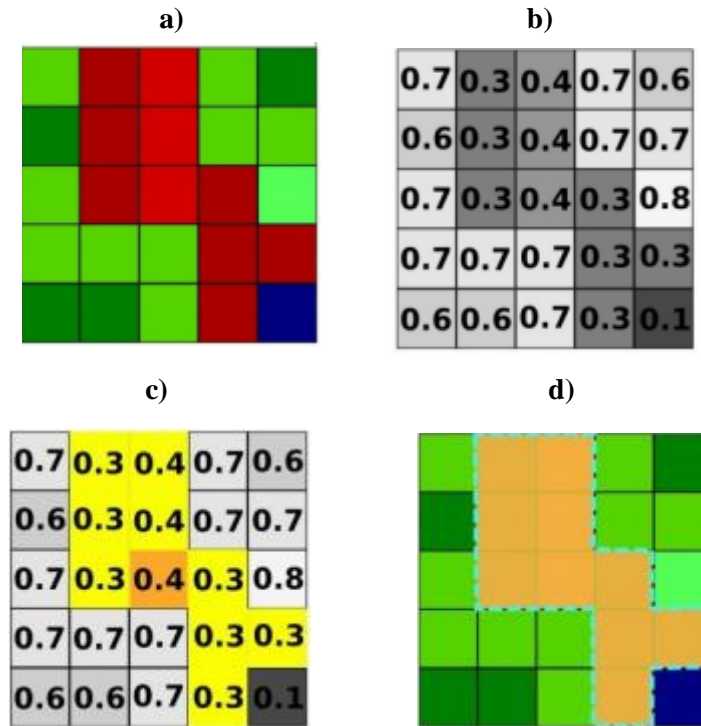


Figura 3: Ejemplo de región incremental

2.4.1 Clases y macroclases

Las clases de uso del suelo se identifican con un código arbitrario (i.e. identificador). Lo que permite la definición de macroclases y clases, correspondientes a los códigos identificadores de cada clase de uso de suelo. Una macroclase es un grupo de ROIs con diferente clase, lo cual es útil cuando se necesita clasificar elementos que tienen diferente firma espectral en la misma clase de uso de suelo. Varias clases pueden ser asignadas a la misma macroclase, pero la misma clase no puede ser asignada a diferentes macroclases. Por lo tanto, las clases son subconjuntos de una macroclase (Congedo, 2017).

2.4.2 Algoritmos de clasificación

Las firmas espectrales (características espectrales) de las clases de uso de suelo de referencia se consideran utilizando los valores de los píxeles de cada ROI con la misma clase o macroclase. La firma espectral es la reflectancia en función de la longitud de onda que cada material tiene de forma única, por lo tanto, puede ser usada para la clasificación de materiales (NASA, 2013). De esta manera, el algoritmo clasifica la imagen completa comparando las características de cada píxel con las características espectrales de las clases de referencia. Los criterios estadísticos de distancia mínima y máxima probabilidad fueron elegidos para construir la firma espectral que permitió clasificar las imágenes según las categorías más representativas en el área de estudio (Chuvieco 1996).

El algoritmo de distancia mínima calcula la distancia Euclídeana (x, y) entre las firmas espectrales de los píxeles de la imagen y las firmas espectrales de entrenamiento, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$d(x, y) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (4)$$

donde x = vector de firma espectral de un píxel de la imagen; y = vector de firma espectral del área de entrenamiento y n = número de bandas de la imagen. Por lo tanto, la distancia es calculada para cada píxel en la imagen, asignando la clase de la firma espectral más cercana de acuerdo con la siguiente función discriminante (Richards & Jia, 2006):

$$x \in C_k \Leftrightarrow d(x, y_k) < d(x, y_j) \forall k \neq j \quad (5)$$

donde C_k = clase de uso de suelo k ; y_k = firma espectral de clase k e y_j = firma espectral de la clase j .

El algoritmo de máxima probabilidad calcula las distribuciones de probabilidad para las clases, relacionado al teorema de Bayes, estimando si un píxel pertenece a una clase de uso de suelo. En particular, las probabilidades de distribución de las clases son asumidas de la forma de modelos normales multivariados (Richards & Jia, 2006). Para utilizar este algoritmo, se requiere un número lo suficientemente alto de píxeles para cada área de entrenamiento, lo que permite el cálculo de la matriz de covarianza. La función discriminante, se calcula para cada píxel como:

$$g_k(x) = \ln p(C_k) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_k| - \frac{1}{2} (x - y_k)^t \Sigma_k^{-1} (x - y_k) \quad (6)$$

donde C_k = clase de uso de suelo k ; x = vector de firma espectral de un píxel de la imagen; $p(C_k)$ = probabilidad de que la clase correcta sea C_k ; $|\Sigma_k|$ = determinante de la matriz de covarianzas de los datos en la clase C_k ; Σ_k^{-1} = inversa de la matriz de covarianzas; y_k = vector de firma espectral de la clase k .

Por consiguiente:

$$x \in C_k \Leftrightarrow g_k(x) > g_j(x) \forall k \neq j \quad (7)$$

2.4.3 Clasificación por firmas de uso de suelo

La clasificación por firmas de uso de suelo permite la definición de umbrales espectrales para cada firma de entrada (un valor mínimo y un valor máximo para cada banda). Los umbrales de cada firma de entrenamiento definen la región espectral perteneciente a cada clase de cobertura del suelo (Congedo, 2017).

Las firmas espectrales de los píxeles de la imagen son comparadas con las firmas espectrales de entrenamiento; un píxel pertenece a la clase X si la firma espectral del píxel está completamente contenida en la región definida por la clase X (Figura 4). En el caso de que algunos píxeles coincidan dentro de regiones superpuestas o fuera de cualquier región espectral, es posible utilizar algoritmos de clasificación adicionales (distancia mínima o máxima probabilidad) considerando las características espectrales de la firma original (Congedo, 2017).

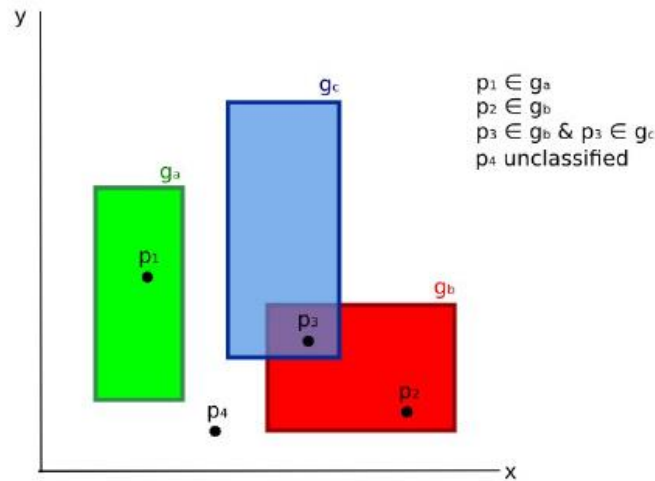


Figura 4: Clasificación por firmas de uso de suelo

En la Figura 5 se muestran los rangos espectrales de tres clases (g_a , g_b y g_c); las líneas de colores dentro de los rangos (el área semi-transparente) representa las firmas espectrales de los píxeles que definieron los límites superior e inferior del rango respectivo. El píxel p_1 (línea interpunteada) pertenece a la clase g_b debido a que su firma espectral está completamente dentro del rango de la clase g_b (en el límite superior). El píxel p_2 (línea entrecortada) queda sin clasificar debido a que su firma espectral no cae completamente dentro de ningún rango. El píxel p_3 (línea interpunteada) pertenece a la clase g_a (Congedo, 2017).

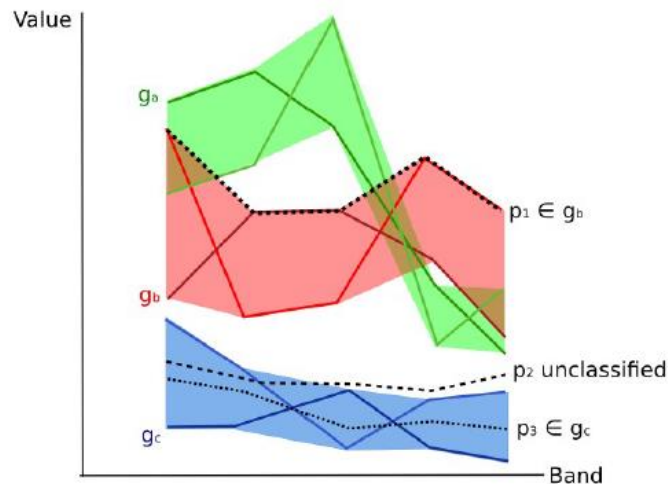


Figura 5: Gráfico de rangos espectrales

Uno de los principales beneficios de la clasificación por firmas de uso de suelo es que es posible seleccionar píxeles e incluir su firma en un rango espectral. Por lo tanto, la clasificación debería ser la representación directa de las clases esperadas para cada firma espectral. Esto es muy útil para la clasificación de una única clase de cobertura del suelo (definida por umbrales espectrales específicos), y dejar sin clasificar el resto de la imagen que no sea de interés para el propósito de la clasificación (Congedo, 2017).

2.5 Criterio de ajuste

El criterio de ajuste se refiere al rendimiento del modelo a través de la comparación de los caudales simulados y observados. En este estudio se utilizaron cuatro criterios de ajuste entre los que destacan:

El coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) (Nash y Sutcliffe, 1970) o Coeficiente de Eficiencia EF2 (Vázquez et al., 2002). Su rango varía desde $-\infty$ a 1 y determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la variación de datos medidos.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{pobs})^2} \quad (8)$$

donde n es el número total de observaciones disponibles en el periodo considerado; Q_{obs} es el caudal observado en el día i ($L^3 T^{-1}$); Q_{sim} es el caudal simulado en el día i ($L^3 T^{-1}$); Q_{pobs} es el caudal promedio de la serie observada ($L^3 T^{-1}$). Si la simulación es perfecta, $NS=1$; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces $NS=0$. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores referenciales del criterio de Nash-Sutcliffe

NS	Ajuste
< 0.5	Insatisfactorio
0.5 – 0.6	Adecuado
0.6 – 0.8	Aceptable
> 0.8	Muy bueno

El coeficiente de determinación (R^2) y que corresponde al mismo que el cuadrado del coeficiente de correlación lineal de Pearson (r) es normalmente considerado en el contexto de regresión lineal entre dos variables, el ajuste esta expresado en la escala de interpretación de la Tabla 2 (Martínez et al., 2009).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{pobs}) * (Q_{sim} - Q_{psim})}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{pobs})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{psim})^2} \quad (9)$$

donde Q_{psim} es el caudal promedio de la serie simulada

Tabla 2: Valores referenciales del criterio R^2

R^2	Ajuste
1	Perfecta
0.9 - 1	Excelente
0.7 - 0.9	Buena

0.5 - 0.7	Regular
< 0.5	Mala

PBIAS del inglés *Percent of bias* mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grande o pequeña que su contraparte (datos observados). El valor óptimo es PBIAS=0, valores positivos PBIAS > 0 indican subestimación del modelo, valores negativos 0 < PBIAS indican sobrestimación del BIAS en el modelo, en el sentido de que tan ancha es la campana en las curvas comparativas simulación vs. observación (López et al., 2012).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs - Qsim) * 100}{\sum_{i=1}^n Qobs} \quad (10)$$

Raíz del error cuadrático medio (RMSE) representa el error en las predicciones del modelo, este indicador es usado frecuentemente y su definición viene dada por:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Qobs - Qsim)^2}{n}} \quad (11)$$

donde Qobs y Qsim representan la muestra (de tamaño n) de los valores observados y los simulados por el modelo, respectivamente. Un valor de RMSE = 0 indica un ajuste perfecto (Ritter et al., 2011).

3. RESULTADOS

Se obtuvo que los usos de suelos más representativos en la cuenca de Bellavista se clasifican en 5 grupos; i) bosque adulto, ii) bosque medio, iii) bosque joven, iv) urbano y v) estéril predominando los dos primeros (Tabla 3). Esto se debe al aumento de las plantaciones forestales en la zona de estudio (CONAF, 2017). El bosque adulto, medio y joven consideran tanto plantaciones forestales como bosque nativo en sus diferentes etapas de crecimiento, el uso de suelo urbano engloba áreas urbanas, industriales y carreteras finalmente el uso de suelo estéril agrupa las áreas sin vegetación producto de la tala a ras o de algún foco de incendio.

En la Tabla 3 desde el año 2013 al 2019 se puede observar que las zonas de bosque adulto y medio son las predominantes en la cuenca de Bellavista alcanzando por lo menos el 70% del área total, siendo el año 2013 el que obtuvo el mayor porcentaje (89.15 %), en cambio el año 2015 obtuvo el menor porcentaje (73.11 %) producto de los incendios ocurridos durante ese año. Además, se puede observar un aumento paulatino de la zona urbana a partir del año 2013 (2.46 %) hasta un 3.28 % del área total de la cuenca en el año 2019.

Tabla 3: Tabla resumen de los usos de suelo en la cuenca Bellavista

	2013		2014		2015		2017		2018		2019	
Clase	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)	Área (km ²)	Área (%)
Urbano	2.85	2.46	2.88	2.48	2.90	2.50	3.36	2.89	3.40	2.93	3.81	3.28
Estéril	4.67	4.02	12.75	10.96	28.29	24.31	7.57	6.51	9.77	8.40	11.54	9.92

Bosque adulto	57.33	49.27	44.11	37.91	54.29	46.66	65.47	56.26	44.55	38.28	67.48	57.99
Bosque medio	46.41	39.88	50.48	43.38	30.78	26.45	32.48	27.91	54.41	46.76	33.38	28.69
Bosque joven	5.09	4.38	6.13	5.27	0.09	0.08	7.47	6.43	4.23	3.64	0.14	0.13

En el año 2014 y 2015 se produjo un aumento de la zona estéril (10.96 % a 24.31 %) en la cuenca producto de los incendios forestales ocurridos en esos años los cuales afectaron a toda la región.

Se calibró el modelo para cada uno de los eventos de precipitaciones (Tabla 4), y se verificó cuál de estas calibraciones representa mejor la respuesta de la cuenca para todas las precipitaciones estudiadas. Los parámetros obtenidos para cada año calibrado y diferentes eventos se indican en la Tabla 5.

Tabla 4: Valores de indicadores numéricos en la cuenca Bellavista

Indicador	2013	2014	2015	2017	2018	2019
PBIAS	-0.154	-0.188	0.226	-0.172	0.217	-0.238
NSE	0.790	0.671	0.838	0.702	0.766	0.753
R ²	0.841	0.825	0.888	0.836	0.814	0.853
RMSE	4.60	5.40	2.47	3.60	3.28	11.88

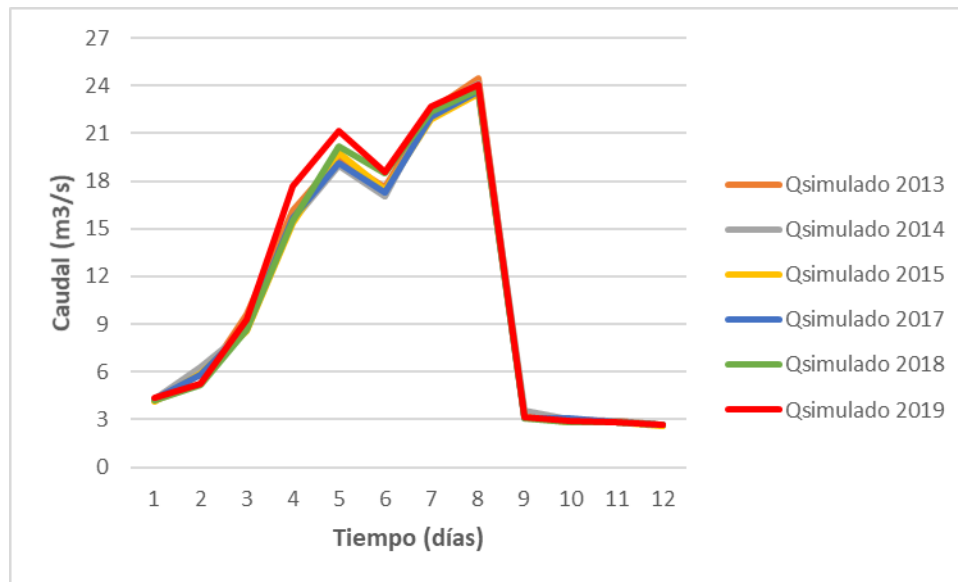
Los indicadores de la Tabla 4 indican que el ajuste entre caudal observado y simulado para los distintos escenarios de la cuenca Bellavista corresponden a un NS aceptables ($0.6 < NS < 0.8$, Tabla 1), R² bueno ($0.7 < R^2 < 0.9$, Tabla 2), PBIAS y RMSE cercanos a cero.

Para indicar la sensibilidad de la cuenca durante los eventos de precipitaciones se combinan los diferentes parámetros calibrados de cada año (filas) con los usos de suelos y precipitaciones de cada año (columnas), los resultados obtenidos se indican en la Tabla 5.

Tabla 5: Coeficiente de Nash-Sutcliffe para diferentes usos de suelos y precipitaciones

		Usos de suelos y precipitaciones					
		2013	2014	2015	2017	2018	2019
Parámetros calibrados	2013	0.79	0.67	0.80	0.69	0.75	0.72
	2014	0.78	0.67	0.81	0.70	0.75	0.71
	2015	0.76	0.65	0.84	0.69	0.79	0.72
	2017	0.77	0.66	0.83	0.70	0.78	0.71
	2018	0.76	0.66	0.84	0.66	0.77	0.72
	2019	0.78	0.67	0.77	0.60	0.72	0.75

La Figura 6 muestra los resultados de los parámetros calibrados del año 2013 con los distintos usos de suelos y precipitaciones indicados en la Tabla 5.


Figura 6: Hidrogramas de caudales simulados para evento de precipitaciones en el año 2013

La Figura 6 presenta dos peak, entre lo que destaca, la simulación del 2019 que indica los caudales más altos, sin embargo, las simulaciones presentaron valores similares ratificando la poca sensibilidad del modelo para un evento de precipitación.

Para complementar la información de los cambios de usos de suelo, se realizó el análisis en la cuenca para el año 2013 de manera anual para contrastar los resultados obtenidos durante los eventos de precipitación mostrados en

la Tabla 4. Es decir, se calibró el modelo y verificaron las diferencias para los usos de suelo de los años siguientes. Los hidrogramas observados y simulados se pueden observar en la Figura 7.

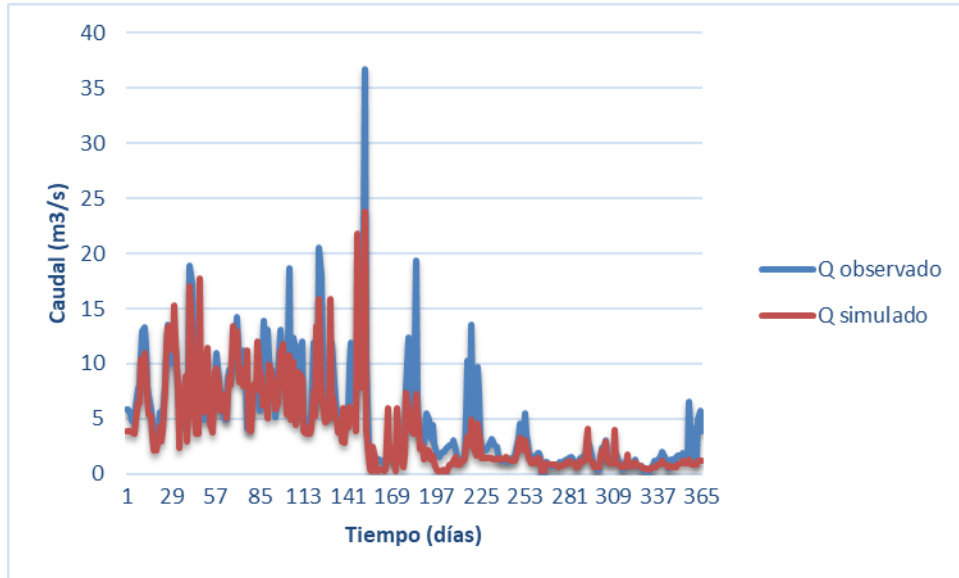


Figura 7: Hidrograma de caudales observados y simulados en el año 2013

Al analizar los cambios de usos de suelo en el año 2013, se obtienen los hidrogramas de las Figuras 8 al 12.

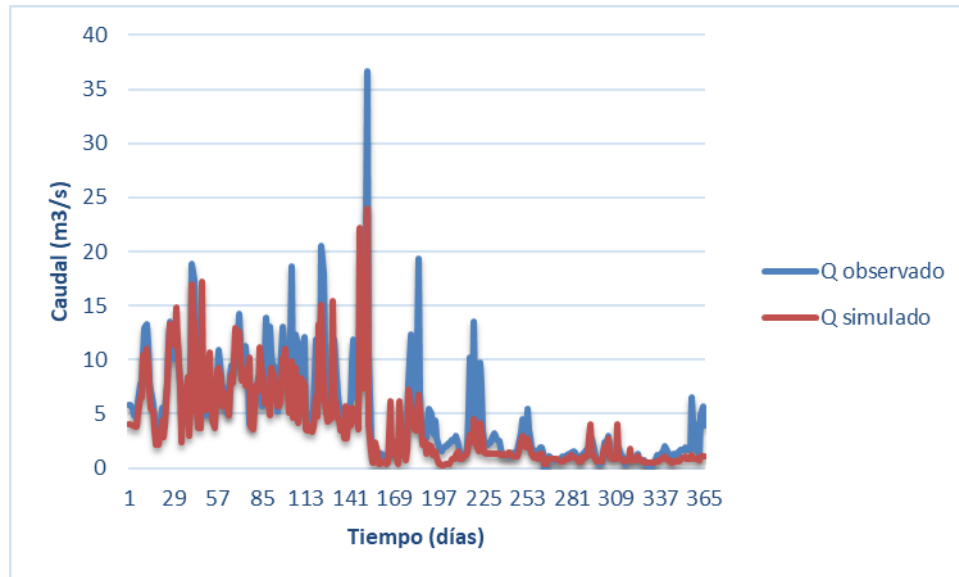


Figura 8: Hidrograma del 2013 con usos de suelo del 2014

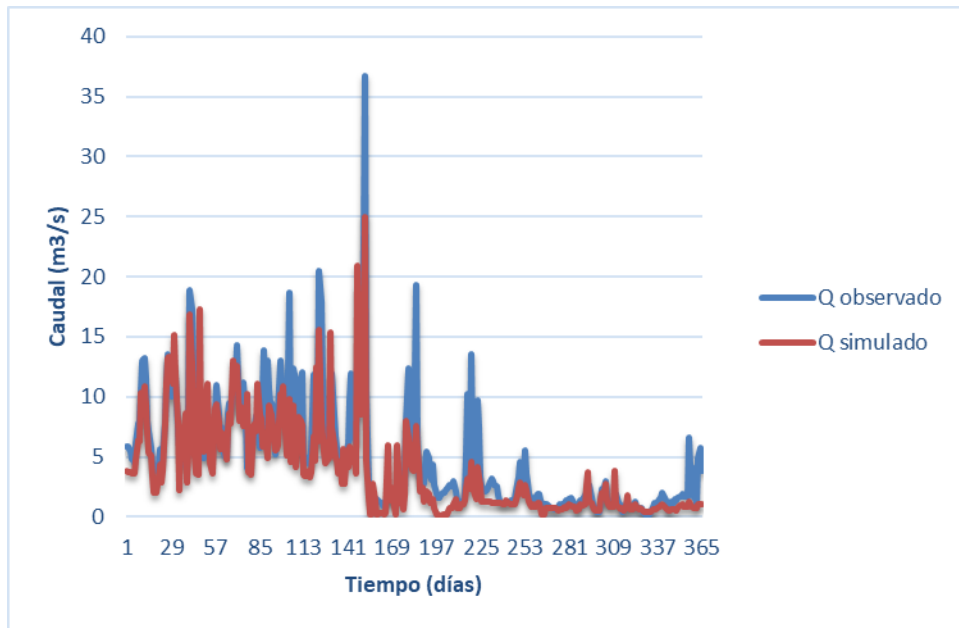


Figura 9: Hidrograma del 2013 con usos de suelo del 2015

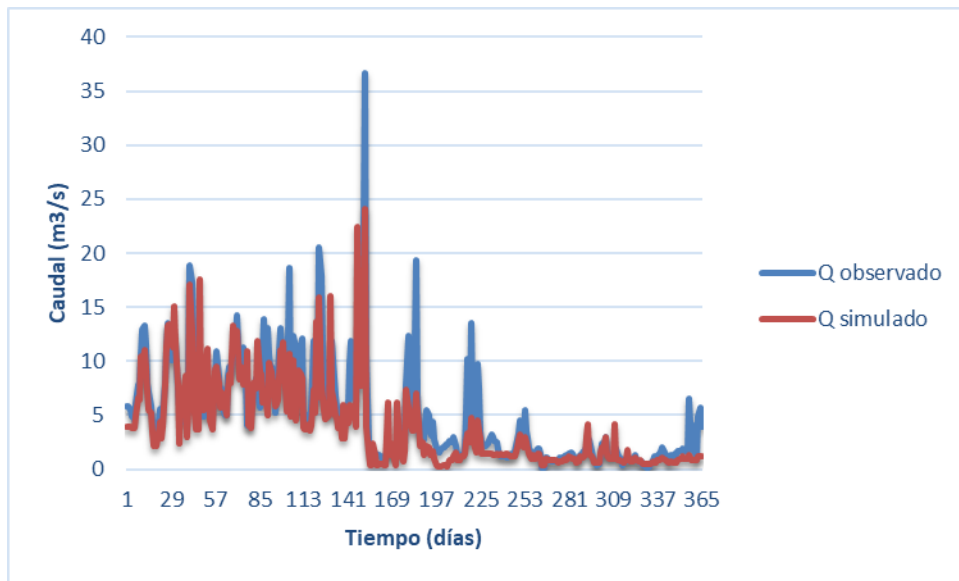


Figura 10: Hidrograma del 2013 con usos de suelo del 2017

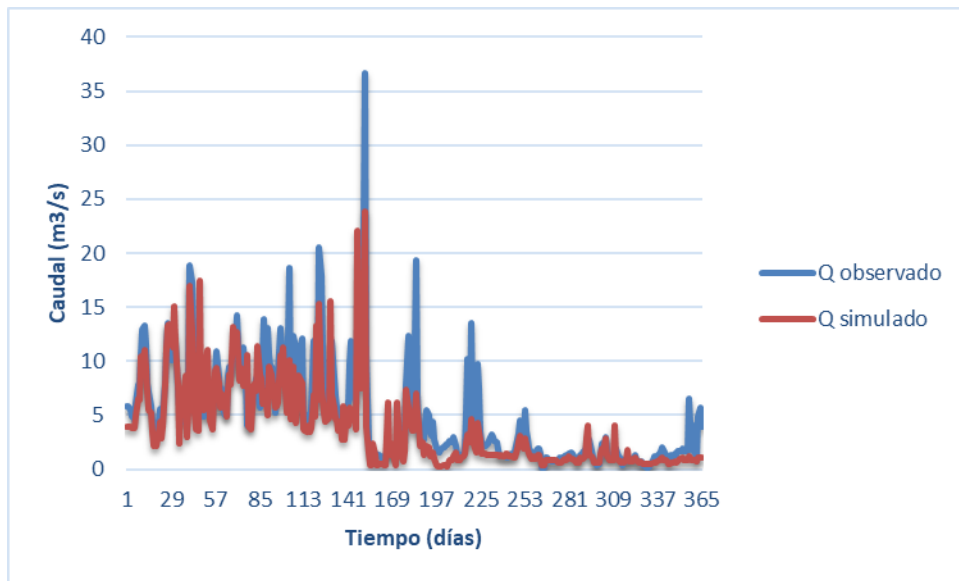


Figura 11: Hidrograma del 2013 con usos de suelo del 2018

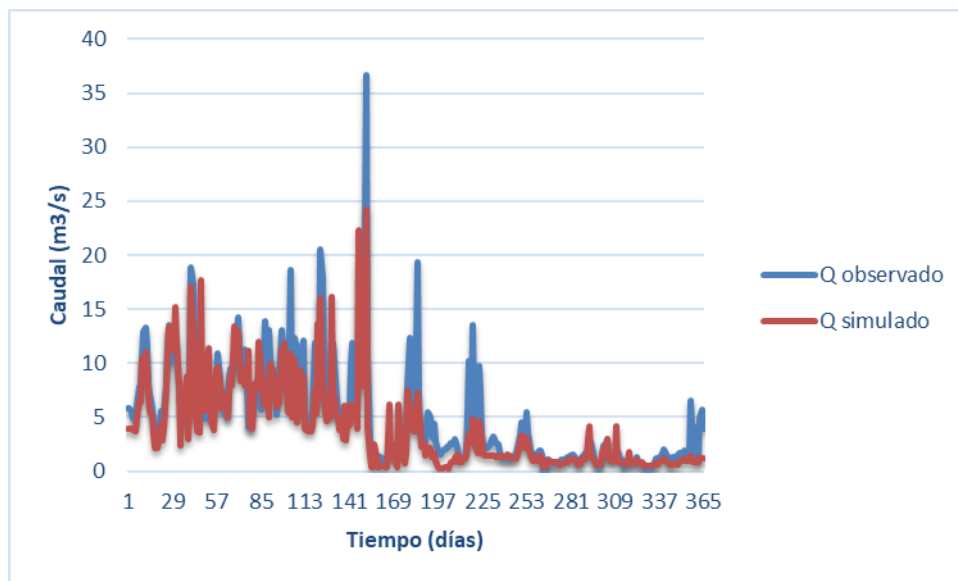


Figura 12: Hidrograma del 2013 con usos de suelo del 2019

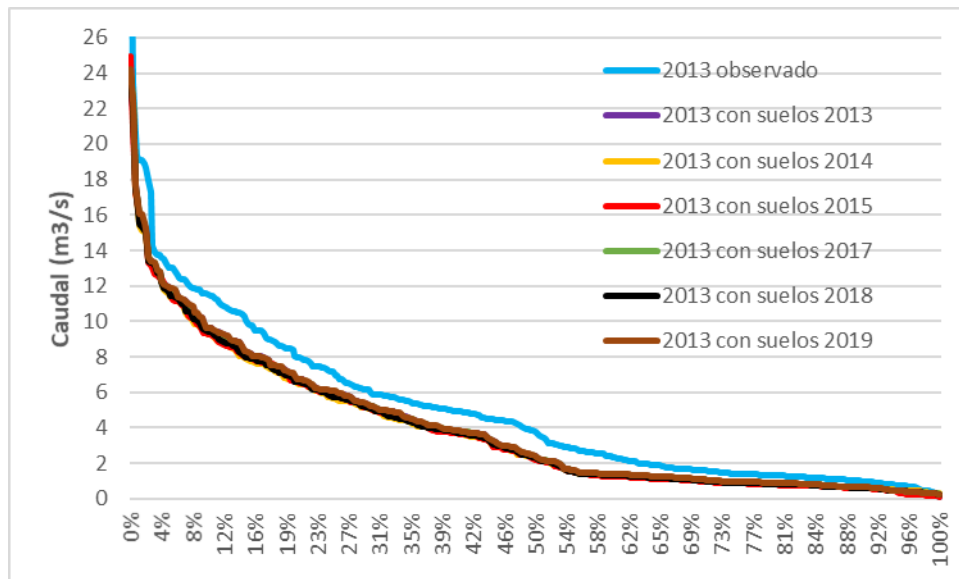
Las Figuras 8 a 12 no permiten observar diferencias significativas entre los caudales simulados, lo que se puede observar en la Tabla 6.

Tabla 6: Valores de indicadores numéricos en la cuenca Bellavista

Indicador	2013 con suelos del 2013	2013 con suelos del 2014	2013 con suelos del 2015	2013 con suelos del 2017	2013 con suelos del 2018	2013 con suelos del 2019
PBIAS	-0.195	-0.227	-0.227	-0.198	-0.218	-0.190
NSE	0.691	0.669	0.690	0.689	0.676	0.695
R ²	0.735	0.729	0.750	0.734	0.731	0.737
RMSE	2.56	2.65	2.56	2.57	2.63	2.55

En la Tabla 6 al igual que en la Tabla 4 no se observan diferencias significativas en los indicadores obtenidos para los diferentes usos de suelo del año 2013, todos los años simulados presentaron ajustes aceptables del coeficiente de Nash-Sutcliffe ($0.6 < NS < 0.8$), un ajuste bueno del coeficiente de determinación ($0.7 < R^2 < 0.9$), y valores de PBIAS y RMSE cercanos a cero.

Para incorporar otro modo de comparación entre los diferentes hidrogramas anuales del 2013 se analizó la curva de duración para los diferentes escenarios el cual se puede observar en la Figura 13.


Figura 13: Curva de duración para el año 2013

En la Figura 13 se puede observar que todos los escenarios subestiman el caudal observado del 2013, sin embargo, sólo los tramos con excedencia superior al 99% fueron superados por algunas simulaciones. El año 2015 presentó el caudal más alto de todos los escenarios simulados con un peak de $24.97 \text{ m}^3/\text{s}$. Entre el 5% y el 50% de ocurrencia los caudales resultan mayores para los usos de suelo de los años 2017 y 2019, predominando los flujos asociados al presente año. Para los caudales entre el 50% y el 100% no se identifica una diferencia

significativa sugiriendo que los usos de suelo producen un efecto mayor en los caudales superiores a los caudales promedio.

CONCLUSIONES

En la cuenca de Bellavista se puede observar un claro dominio de la zona forestal (> 70 % del área de la cuenca) durante los diferentes años estudiados. La cobertura forestal fue afectada producto de los diferentes incendios ocurridos en la región siendo el año 2015 el más representativo, lo que provocó que la zona estéril de la cuenca llegara a los 28.29 km².

Los modelos desarrollados para las crecidas presentaron para los valores medios de los caudales un ajuste con valores de NS entre 0.65 y 0.84, sus rendimientos se pueden catalogar como aceptables. Sin embargo, no fue posible identificar un efecto significativo directo de los usos de suelo sugiriendo que el modelo no es sensible, o no es capaz de representar correctamente los eventos de crecidas.

Los modelos anuales del 2013 presentaron un NS entre 0.67 y 0.70 y sus rendimientos al igual que en las crecidas son aceptables.

Para el escenario anual del 2013 los resultados presentaron para todos los escenarios subestimación en los caudales, lo que se puede observar en la curva de duración ya que sólo en los porcentajes de excedencia superior al 99% se observa una sobreestimación de los caudales. Entre el 5% y el 50% de ocurrencia los caudales resultan mayores para los usos de suelo de los años 2017 y 2019, predominando los flujos asociados al presente año. Para los caudales entre el 50% y el 100% no se identifica una diferencia significativa sugiriendo que los usos de suelo producen un efecto mayor en los caudales superiores a los caudales promedio.

Los parámetros para los escenarios anuales son más sensibles que en los escenarios de crecidas debido al tiempo de simulación necesario para obtener resultados. Finalmente, el uso de suelo del 2015 presentó el caudal más alto lo que se puede atribuir al aumento de la zona estéril en ese año producto de los incendios forestales.

REFERENCIAS

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", Concepción, Chile.

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M. (1998). "Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements", Rome, Italy.

Congedo, L. (2017). Semi-Automatic Classification Plugin Documentation.

Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de teledetección espacial. Tercera edición. Ediciones RIALP S.A., Madrid. 568 pp.

CNR (2013). Diagnóstico del riego y drenaje en la VIII región.

DGA (2013). Levantamiento hidrogeológico en cuencas pluviales costeras en la región del libertador general Bernardo O'higgins y región del Biobío.

DGA (2013). Modelación hidrogeológica cuenca Itata-bajo, región del Biobío.

Duque, L. & Vázquez, R. (2017). "WEAP21 based modelling under climate change considerations for a semiarid region in southern-central Chile".

- Goudie, A.** (1990). The human impact on the natural environment. Oxford: Basil Blackwell.
- Henríquez, C., Azócar, G. & Aguayo, M.** (2006). "Cambio de uso del suelo y escorrentía superficial: aplicación de un modelo de simulación espacial en Los Ángeles", VIII Región del Biobío, Chile
- Lara, A., Solari, M., Prieto, M. & Peña, M.** (2012). "Reconstrucción de la cobertura de la vegetación y uso del suelo hacia 1550 y sus cambios a 2007 en la ecorregión de los bosques valdivianos lluviosos de Chile (35° – 43° 30´ S)", Valdivia, Chile.
- Leiva, C., Caamaño, D. & Fuentes, P.** (2019). "Modelación hidrológica de crecidas desde subcuencas aportantes al estero bellavista", Concepción, Chile.
- López, M., Yacoub, C. & Pérez, A.** (2012). "Calibración del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de Jequetepeque, Cajamarca, Perú", Cajamarca, Perú.
- Martínez, R., Tuya, L., Martínez, M., Pérez, A. & Cánovas, A.** (2009). "El coeficiente de correlación de los rangos de Spearman caracterización", La Habana, Cuba.
- NASA** (2013). Landsat 7 Science Data User's Handbook.
- Richards, J. & Jia, X.** (2006). Remote Sensing Digital Image Analysis. Berlin, Germany.
- Ritter, A., Muñoz, R. & Regalado, C.** (2011). "Capacidad de predicción de modelos aplicados a la ZNS: herramienta informática para la adecuada evaluación de la bondad de ajuste con significación estadística"
- SEI** (2011). WEAP Water Evaluation And Planning System User Guide. Stockholm Environment Institute, 335 p.
- Sepúlveda R.** (2019). "Efectos de los cambios de cobertura de suelo en la hidrología (caudales), aplicados a una cuenca costera de la región del Biobío", Concepción, Chile.
- Vázquez, R.** (2003). Assessment of the performance of physically based distributed codes simulating medium size hydrological systems. Tesis de Doctorado, Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, Bélgica. 335 p.
- Vázquez, R.** (2010). Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano. Maskana 1: 79–90 p.
- Yaguache, L., Vázquez, R.** (2015). "Modelación de la oferta hídrica en una cuenca de montaña tropical en función de su cobertura del suelo", Ecuador.
- Weng, Q.** (2002). Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS, and stochastic modeling. Journal of Environmental Management, 2002, N° 64, p. 273-284.