

EVALUACIÓN DEL SERVICIO ECOSISTÉMICO DE RENDIMIENTO HÍDRICO ENTRE LOS AÑOS DE 1994 Y 2016 EN EL MUNICIPIO DE VALLE DE BRAVO, ESTADO DE MÉXICO

Vianney Lovera Pons¹, Iván Ernesto Roldán Aragón², Jesús Sánchez Robles² y Pablo Torres Lima³
Universidad Autónoma Metropolitana de México

RESUMEN

El servicio ecosistémico (SE) de rendimiento hídrico (RH) es vital para la generación de agua dulce y es definido como la redistribución de la precipitación en función de la vegetación. Los cambios en el uso del suelo y vegetación (USyV) tienen efectos directos sobre este tipo de SE. Se estudia el caso del Municipio de Valle de Bravo como una región relevante en materia hídrica y forestal para el Estado de México. Forma parte del sistema Cutzamala, el cual abastece de agua potable a la Ciudad de México. Por su importancia como fuente de agua y por las presiones antrópicas que tienen los bosques en esta región, se evaluó el SE de RH, a partir de un análisis comparativo de USyV de los años de 1994 y 2016, a fin de identificar los efectos de la dinámica de cambio. Se empleó el modelo de rendimiento hídrico anual InVEST® que utiliza diferentes mapas con los atributos biofísicos para cada cobertura, definidos para cada píxel del territorio. Se aplicó un modelo de ANOVA para determinar el efecto que tienen los cambios de USyV en las subcuencas y su interacción con el SE de RH. Los resultados indican que los bosques templados aún persisten en la mayor superficie del municipio, sin embargo, las zonas urbanas se han duplicado, provocado un incremento en el SE de RH. Estos resultados pueden ser útiles en planificación ambiental y programas de ordenamiento territorial.

Palabras clave: Servicios ecosistémicos; Rendimiento hídrico; Cambios en el uso de suelo; Cuencas hidrográficas; InVEST.

Evaluation of the service ecosystem of water yield from an analysis of the landscape in the municipality of Valle de Bravo, Mexico

ABSTRACT

The ecosystem service (ES) of water yield (WY) is vital for the generation of fresh water and is defined as the redistribution of precipitation as a function of vegetation. Changes in land use and vegetation (LU&V) have direct effects on this type of ES. The case of the Municipality of Valle de Bravo is studied as a relevant region in terms of water and forestry for the State of Mexico. It is part of the Cutzamala system, which supplies drinking water to Mexico City. Because of its importance as a source of water and because of the anthropogenic pressures that forests have in this region, the ES WY was evaluated, based on a comparative analysis of LU&V for the years of 1994 and 2016, in order to identify the effects of the dynamics of change. The annual water yield model InVEST® was used, which uses different maps with the biophysical attributes for each coverage, defined for each pixel of the landscape. An ANOVA model was applied to determine the effect of the LU&V changes in the sub-basins and their interaction with the ES WY. The results indicate that temperate forests still persist in the largest area of the municipality, however urban areas have doubled, causing an increase in the ES WY. These results can be useful in environmental planning and land use planning programs.

Keywords: Ecosystem services; Water performance; Land use change; Watersheds, InVEST.

¹Maestría en Ecología Aplicada, Universidad Autónoma Metropolitana. E-mail: hechoenindonesia@hotmail.com

²Departamento El Hombre y su Ambiente, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. E-mail: jeroldan@correo.xoc.uam.mx Y jsanchez@correo.xoc.uam.mx

³Departamento de Producción Agrícola y Animal, Universidad Autónoma Metropolitana Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. E-mail: ptorres@correo.xoc.uam.mx

1. INTRODUCCIÓN

Un ecosistema es una asociación de plantas, animales, microorganismos y su entorno natural; componentes que son interdependientes y que como unidad cumplen procesos y funciones que regulan y mantienen la vida (QUÉTIER *et al.*, 2007), los cuales se convierten en servicios ecosistémicos (SE) al momento de ser utilizados o valorados por el ser humano (DE GROOT *et al.*, 2002). Los bosques generan muchos de estos SE, uno de ellos es el rendimiento hídrico (RH) que es fundamental para la producción de agua dulce (JING *et al.*, 2015) y se define como la fracción superficial de la precipitación que es redistribuida en función de la vegetación (CHEN *et al.*, 2011; JOBBÁGY *et al.*, 2013), misma que contribuye a retener la humedad y regular el escurrimiento. Además de la precipitación y la vegetación existen otros atributos involucrados para que este tipo de servicio pueda ocurrir, entre estos se encuentra la evapotranspiración potencial, la configuración topográfica y geológica de las cuencas (ZHANG *et al.*, 2012), así como los procesos de cambio de las coberturas del suelo debido a las condiciones socioculturales de cada región (GASPARI *et al.*, 2015). El SE de RH es particularmente sensible a los cambios de uso del suelo y vegetación (USyV); en particular, en ausencia de vegetación e inmediatamente después de la lluvia, los caudales superficiales aumentan y generan grandes flujos de agua ocasionando erosión al suelo, turbidez del agua e inundaciones (LATERRA *et al.*, 2011); y por ende, un aporte bajo al sistema hidrológico subterráneo (FARLEY *et al.*, 2005). Derivado de ello el flujo base disminuye aumentando la gravedad de la sequía, acentuándose en lugares donde las lluvias son estacionales y escasas (JING *et al.*, 2015; NAMBIAR y BROWN, 1997).

Evaluar el SE de RH proporciona información relevante para la gestión de los recursos hídricos (GOLDMAN *et al.*, 2010). Para tal fin, existen diversos modelos que simulan los procesos hidrológicos en diferentes escenarios (VIGERSTOL y AUKEMA, 2011), entre ellos, se encuentra el programa de Evaluación Integrada de Servicios Ecosistémicos y Compensación (InVEST, por sus siglas en inglés) desarrollado por las Universidades de Stanford y Minnesota (HAMEL y GUSWA, 2015), que contiene diversos modelos para evaluar SE. Uno de ellos evalúa el rendimiento hídrico anual basado en la curva de BUDYKO (1974), la evapotranspiración potencial y la precipitación media anual (VIGERSTOL y AUKEMA, 2011; HAMEL y GUSWA, 2015).

El modelo InVEST ha sido utilizado en China con el propósito de evaluar el SE de RH en la cuenca del río Lancang (CHEN *et al.*, 2011). En Carolina del Norte se empleó para estimar si los cambios en el uso suelo y cobertura vegetal alteraron el RH en la cuenca del Bosque Nacional de Nantahal (ELLIOTT *et al.*, 2017); y en Argentina fue aplicado para evaluar la distribución espacial del servicio de provisión hídrica en relación con los cambios de uso del suelo (GASPARI *et al.*, 2015). Los resultados de los trabajos antes mencionados han expuesto un impacto negativo marcado y acelerado en el balance hídrico de cuencas y acuíferos, generando daños económicos y ambientales importantes como consecuencia de una clara tendencia del crecimiento de las zonas urbanas que disminuyen los territorios naturales y rurales (ESCOLERO *et al.*, 2009; WU *et al.*, 2017).

Particularmente, el Municipio de Valle de Bravo, Estado de México, alberga abundantes recursos hídricos al concentrar el agua de la región en tres presas que son Tiloxtoc, Colorines y Valle de Bravo (BUNGE *et al.*, 2012); a partir de 1982, éstas se utilizan para abastecer de agua potable a la Zona Metropolitana de la Ciudad de México a través del Sistema Cutzamala, que envía un promedio de 15 m³/s de agua potabilizada (ESCOLERO *et al.*, 2009). Asimismo, Valle de Bravo es una de las regiones forestales más importantes del Estado (CÁRCAMO *et al.*, 2013) y es reconocida a nivel nacional e internacional como uno de los destinos turísticos con mayor afluencia (HERNÁNDEZ *et al.*, 2011).

Actualmente, la región es considerada como un Área de Protección de Recursos Naturales y cuenta con un plan para el manejo hidrológico (LÓPEZ *et al.*, 2011: 36). No obstante, la presión que ejercen diversos sectores socioeconómicos (turístico, agropecuario y forestal legal e ilegal) sobre el uso de suelo (ESCOLERO *et al.*, 2009) incide paulatinamente en el deterioro del bosque (LÓPEZ *et al.*, 2011) y, en consecuencia, repercute en el SE de RH. Se ha observado que las precipitaciones han

originado cárcavas y surcos que aceleran el azolvamiento de los embalses y disminuyen la infiltración natural en la cuenca hidrográfica (RENTERÍA *et al.*, 2006).

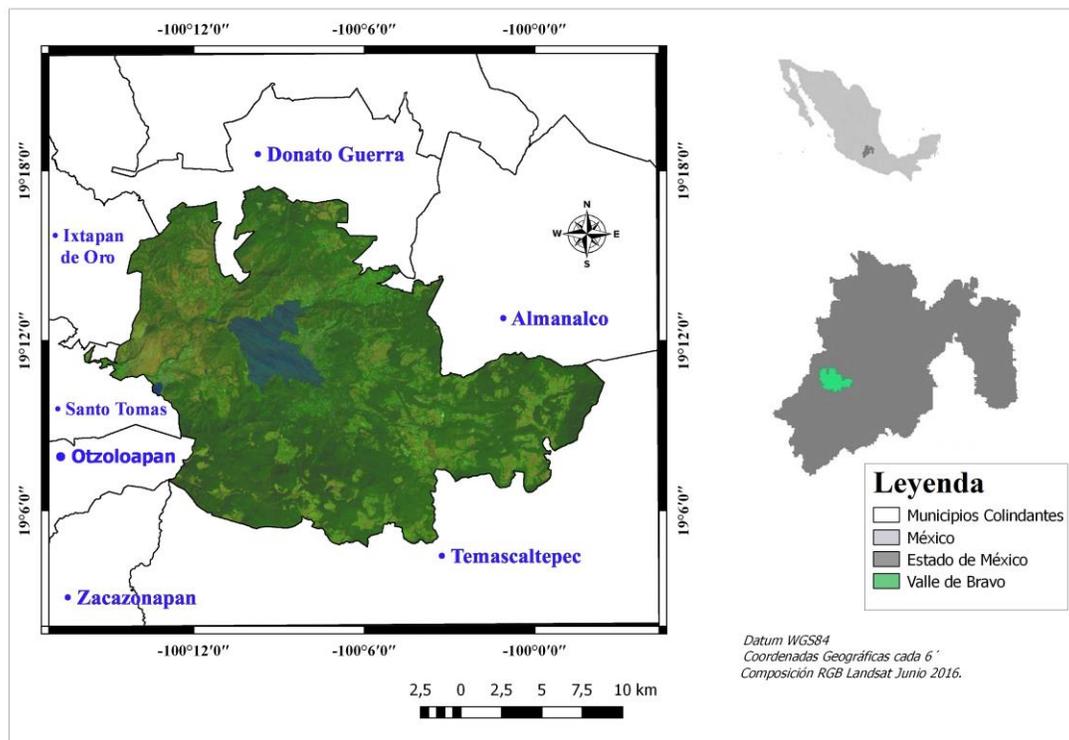
Dada la importancia del Municipio de Valle de Bravo dentro del Sistema Cutzamala y a las tendencias de urbanización que enfrenta, el objetivo del presente trabajo fue explicar cómo las dinámicas de cambio de uso de suelo y vegetación entre los años 1994 y 2016 alteran o modifican el servicio ecosistémico de rendimiento hídrico en este Municipio.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDIO

FIGURA 1

Ubicación geográfica del municipio de Valle de Bravo, Estado de México.



Fuente: Elaboración propia

Valle de Bravo se localiza entre los paralelos $19^{\circ} 03'$ y $19^{\circ} 18'$ de latitud norte y los meridianos $99^{\circ} 57'$ y $100^{\circ} 16'$ de longitud oeste y a una altitud entre 1,200 y 3,100 msnm (INEGI, 2010) en la zona centro de México, con una extensión territorial de 400,32 km² (Figura 1). El clima es templado subhúmedo con lluvias en verano y un rango de precipitación de 1,100 a 1,300 mm/año. La temperatura promedio anual es de 17,5°C, máxima de 32,0°C y mínima de 1,3°C (INEGI, 2010). Sus rasgos orográficos evidencian una morfología montañosa, con rocas metamórficas e ígneas (CÁRCAMO *et al.*, 2013). Predominan los suelos de tipo Andosol, asociados generalmente con Luvisol, Leptosol, Vertisol y Regosol (INEGI, 2010). Debido a la variedad de suelos, relieve y clima, la vegetación de la región es conformada por Bosque de Oyamel, Pino, Encino y Bosque mixto de Pino-Encino, así como pequeños relictos de Bosque Mesófilo de Montaña y de Selva Baja Caducifolia (CONABIO, 2008). La zona de estudio forma parte dos grandes cuencas; la primera es la cuenca

Valle de Bravo-Almanalco en la que el área municipal se extiende en el 61% de esta, el resto de la superficie ocupa 20% de la cuenca Chilesdo-Colorines (INE, 2009; BUNGE *et al.*, 2012).

2.2 CARTOGRAFÍA Y DINÁMICA DE CAMBIO DE USOS DEL SUELO Y VEGETACIÓN (USyV)

Se utilizaron sub-escenas de dos imágenes satelitales Landsat de la zona de Valle de Bravo (Pat-Row 27-47) de julio de 1994 y junio de 2016, obtenidas de la página del U.S. Geological Service (EARTH EXPLORER, 2016), capturadas por los satélites Landsat 5 y Landsat 8, respectivamente con una resolución espacial de 30m. La leyenda de trabajo estuvo constituida por 12 clases tomando como base la clasificación de USyV utilizada por INEGI (2014). El método de clasificación fue supervisado (CHUVIECO, 2002). Para los mapas de USyV se estableció un área mínima cartografiable de 2,25 ha (150 x 150 m). La fiabilidad de la clasificación de 1994 fue obtenida mediante comparación de puntos procedentes de fotografía aérea (escala 1:75,000) de 1994 (INEGI, 1994), en cambio para 2016 se obtuvieron puntos de referencia en la zona de trabajo y de imágenes de Google Earth de 2015 y 2016.

La dinámica de cambio fue generada mediante el cruce de los mapas de USyV de los años mencionados, proceso que fue implementado en el módulo de modelado de cambios del suelo (Land Change Modeler) del software IDRISI (EASTMAN, 2012). A partir de la matriz de cambio, se obtuvo la persistencia total por clase, pérdidas, ganancias, cambio neto y dirección de cambio (LÓPEZ y PLATA, 2009). Para obtener la tasa de cambio de cada clase se utilizó la ecuación de la FAO (2007), que expresa el cambio en porcentaje por año:

$$\delta n = [S_2/S_1]^{1/n} - 1 \text{ (Ec. 1)}$$

Dónde: δn = tasa de cambio, S_1 = superficie en la fecha 1, S_2 = superficie en la fecha 2, n = número de años entre las dos fechas.

2.3 MODELO InVEST DE RENDIMIENTO HÍDRICO

El modelo InVEST® (SHARP *et al.*, 2016) estima el rendimiento anual de agua $Y(x)$. Esencialmente, consiste en el balance hídrico entre la precipitación anual $P(x)$ y la evapotranspiración anual AET (x) por pixel (x) para cada tipo de cobertura del suelo, determinado a partir de la siguiente fórmula (Ec. 2):

$$Y(x) = \left(1 - \frac{AET(x)}{P(x)}\right) \cdot P(x) \text{ (Ec. 2)}$$

El cálculo de la evapotranspiración (Ec. 3) se establece a partir de una aproximación de la curva de BUDYKO (1974), desarrollada por ZHANG *et al.* (2001):

$$\frac{AET(x)}{P(x)} = 1 + \frac{PET(x)}{P(x)} - \left[1 + \left(\frac{PET(x)}{P(x)}\right)^w\right]^{1/w} \text{ (Ec. 3)}$$

En donde la evapotranspiración potencial por pixel para cada cobertura PET (x) (Ec. 4) se define como:

$$PET(x) = K_c(l_x) \cdot ET_0(x) \text{ (Ec. 4)}$$

$K_c(l_x)$ es el coeficiente de evapotranspiración para cada cobertura del suelo y ET_0 la evapotranspiración de referencia en el pixel x .

$w(x)$ (Ec. 5) es un parámetro biofísico que caracteriza las propiedades del suelo y el clima. Como resultado se obtiene un valor adimensional relacionado con el agua disponible para la planta (AWC) y la precipitación en un año $P(x)$. Z es la constante estacional de precipitación, en la que su valor es de 1 cuando las lluvias son en verano y de 25 cuando son anuales (ZHANG *et al.*, 2001).

$$w(x) = Z \frac{AWC(x)}{P(x)} + 1,25 \text{ (Ec. 5)}$$

AWC(x) (Ec. 6) es definido con base en los valores mínimos de la profundidad del suelo a la que se restringe la penetración de las raíces y por la profundidad de enraizamiento. PAWC es el agua disponible para las plantas, es decir, la diferencia entre la capacidad de campo y punto de marchitamiento.

$$AWC(x) = \text{Min}(\text{Rest layer depth}, \text{root depth}) \cdot PAWC \text{ (Ec. 6)}$$

2.3.1 Datos utilizados para la elaboración del modelo de rendimiento hídrico

El mapa de precipitación anual y los mapas de temperatura media mensual se tomaron de la actualización de superficies climáticas mensuales para México realizada por CUERVO *et al.* (2014), los cuales fueron obtenidos de la base de datos del Centro de Recursos IDRISI de la Universidad del Estado de México. Los coeficientes de evapotranspiración (Kc) para cada cobertura del suelo fueron tomados de FAO (1998), mientras que los valores del contenido de agua disponible para plantas AWC(x) se obtuvieron de la Base de Datos Mundial Armonizada sobre el Suelo de la FAO (2012). La evapotranspiración de cada pixel $ET_0(x)$ fue estimada utilizando la siguiente ecuación (Ec. 7) (TALLIS *et al.*, 1993):

$$ET_0 = 13,97dD^2W_t \quad \text{(Ec. 7)}$$

Donde d es el número de días en un mes, D el número promedio de horas luz por mes (en unidades de 12 horas) y W_t (Ec 8) es la densidad saturada de vapor de agua (T = temperatura media mensual en grados centígrados):

$$W_t = \frac{4,95e^{0,062T}}{100} \quad \text{(Ec. 8)}$$

El RH para 1994 y 2016 se estimó empleando los mapas de USyV correspondientes. El plano de cuencas hidrográficas fue generado a partir del modelo digital del terreno (INEGI, 2012) (Figura 2). Para calibrar el modelo de rendimiento hídrico se utilizó como referencia el gasto anual de agua reportado por RENTERÍA *et al.* (2006) para la cuenca El Carrizal (cuenca número 8, ubicada en Cerro Gordo), procedimiento que definió el valor de la constante Z .

El balance total del RH para cada cuenca y el municipio se obtuvo a través de la resta de los totales obtenidos de 1994 respecto a 2016.

2.4 ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN Y RENDIMIENTO HÍDRICO

Dadas las numerosas direcciones de cambio obtenidas entre 1994 y 2016 y con la finalidad de facilitar el análisis estadístico, éstas fueron agrupadas en 10 clases de cambio : tres de ellas incluyeron las áreas persistentes; otra abarcó los cambios donde se presentó una recuperación de la cobertura vegetal; dos más para aquellas que tuvieron una dirección de cambio hacia coberturas transformadas como Agricultura y Pastizal y, finalmente, cuatro clases con cambios hacia Zonas Urbanas y/o Asentamientos Humanos (Anexo 3).

Una vez definidas estas diez clases de cambio, se extrajo una muestra aleatoria de 50 pixeles para cada clase de cambio en cada cuenca, lo cual produjo un total de 3767 pixeles y, para cada uno de estos, se calculó la diferencia en el RH entre 1994 y 2016 a partir de los planos correspondientes. Con la finalidad de determinar si existían diferencias estadísticas en los promedios de la diferencia del SE de RH, se aplicó el siguiente modelo de Análisis de la Varianza (Ec 9).

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + e_{ijk} \quad \text{(Ec.9)}$$

Donde: Y_{ijk} = diferencia en el RH entre un tiempo y otro en cada pixel; μ = media general de la diferencia en rendimiento hídrico; α_i = efecto de la cuenca; β_j = efecto de la clase de cambio; $\alpha\beta_{ij}$ = interacción entre las cuencas y las clases de cambio; e_{ijk} = error aleatorio.

Se realizó la comparación post hoc de pares de medias con ajuste de probabilidad de Bonferroni para mostrar entre cuáles pares de clases de cambio de uso de suelo y vegetación y entre cuáles pares de cuencas ocurrieron diferencias significativas. La significancia fue de 0,05 (MONTGOMERY, 2004). El análisis estadístico se realizó con el programa SYSTAT versión 9.

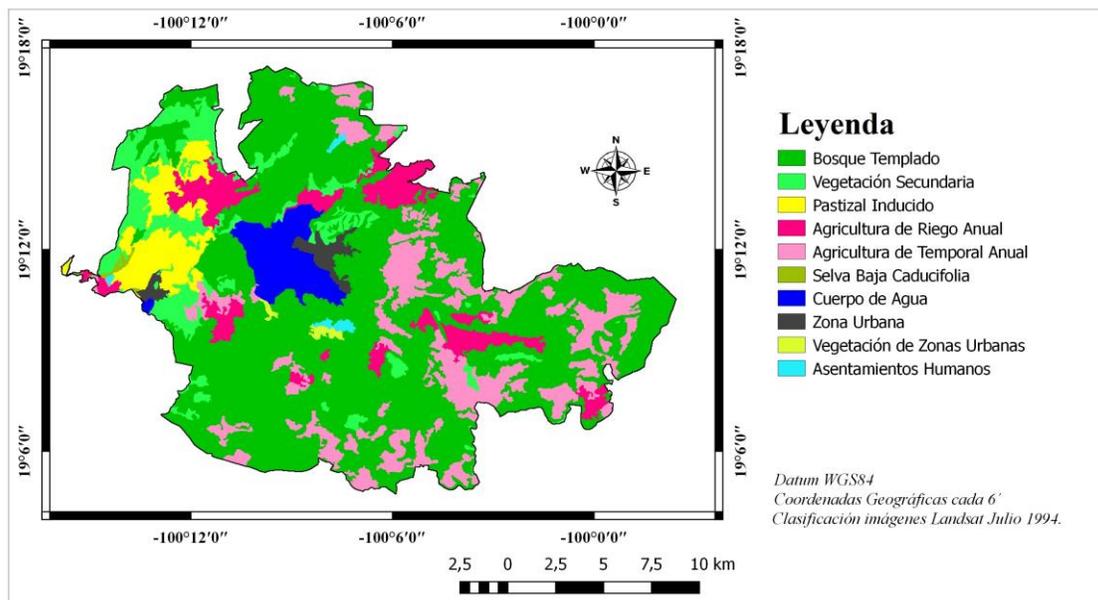
Es importante enfatizar que el resultado de las diferencias en el SE de RH fue obtenido a partir de restar los mapas correspondientes del tiempo uno respecto al tiempo dos, por lo tanto, los valores positivos implican una disminución del SE, caso contrario, cuando los valores son negativos expresan un incremento de este. El valor de cero hace referencia a la no existencia de cambios en el SE entre estos años.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 CAMBIOS DE USO DE SUELO Y VEGETACIÓN (1994-2016)

La fiabilidad de los mapas de USyV para 1994 y 2016 fue de 72% y 87%, respectivamente. Los resultados indican que en 1994 los Bosques Templados ocupaban la mayor superficie municipal, seguidos por la Agricultura (Temporal Anual y Riego Anual) y la Vegetación Secundaria; caso contrario era la Selva Baja Caducifolia que se distribuía en menor superficie (Figura 2).

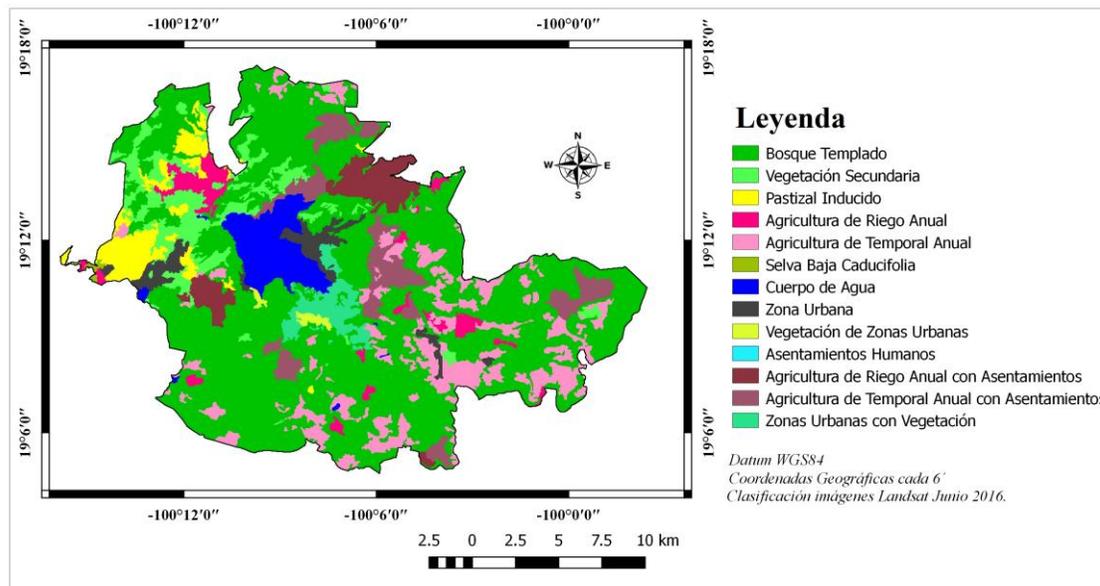
FIGURA 2
Uso de suelo y vegetación de Valle de Bravo para 1994.



Fuente: Elaboración propia

Para el año 2016, el orden respecto a la superficie ocupada por cada clase fue similar, sin embargo, se observó una disminución en el área total de las clases con cobertura vegetal, dando paso a nuevos usos de suelo, tales como Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual con Asentamientos y Zonas Urbanas con Vegetación (Figura 3).

FIGURA 3
Uso de suelo y vegetación de Valle de Bravo para 2016.



Fuente: Elaboración propia

En el año de 1994 el Bosques Templado ocupaba 57,6% (23.055,2 ha) del territorio municipal, para el año 2016 había perdido 571,5 ha y se encontraba en el 56,2% (22.483,7 ha) del territorio, lo que implicó una tasa anual de pérdida de 0,1% (Tabla 1). HERNÁNDEZ *et al.* (2000) mencionan que, desde la década de los 70s del siglo pasado, en la cuenca de Valle de Bravo-Almanalco el Bosque ha pasado por una dinámica de pérdida y recuperación. Las ganancias de la clase Bosque Templado posiblemente se encuentra relacionada con las campañas de reforestación realizadas por el gobierno del Estado de México (PROBOSQUE, 2010) y, por consiguiente, 732,6 ha de Vegetación Secundaria se han transformado en Bosque Templado, de las 2.561,4 ha que perdió esta cobertura durante el periodo de estudio. Otra cobertura forestal relevante en el municipio por la poca extensión que ha ocupado es la Selva Baja Caducifolia, que durante el periodo de estudio ha disminuido considerablemente, al perder 68,94 ha conforme una tasa anual de 2 %, la cual ha sido severamente impactada por los cambios de uso de suelo (BONFILIO *et al.*, 2009). Respecto a la Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual y Pastizal Inducido también se observaron pérdidas de 1.077,75 ha, 2.254,14 ha y 2.898,63 ha y tasas negativas anuales de 1,2%, 4,4% y 1,4%, respectivamente. En este sentido, los valores de pérdida corresponden con los patrones también reportados por BONFILIO *et al.* (2009). Del mismo modo HERNÁNDEZ *et al.* (2011), mencionan que algunas de las causas corresponden al remplazo de las actividades económicas, como la turística, ya que algunos hoteles y empresas se han establecido en lugares donde existían parcelas agrícolas y potreros.

Los Asentamientos Humanos aledaños a la Zona Urbana que se encontraban presentes en el año 1994 han dado paso a nuevos usos de suelo, tales como son las Zonas Urbanas con Vegetación y Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual con Asentamientos. Trabajos como el de LÓPEZ *et al.* (2011) afirman que existe un cambio importante en el uso del suelo, ya que los terrenos se han transformado parcialmente en Asentamientos y Zonas Residenciales. Este proceso de expansión está relacionado con el auge que ha tomado el municipio como destino residencial y turístico (HERNÁNDEZ *et al.*, 2011; CÁRCAMO *et al.*, 2013). Por último, la Zona Urbana presentó una tasa anual de crecimiento del 3,1% a costa de clases como Bosque Templado, Vegetación Secundaria, Selva Baja Caducifolia, Pastizal Inducido y de la Agricultura de Riego Anual y de Temporal Anual (Tabla 1).

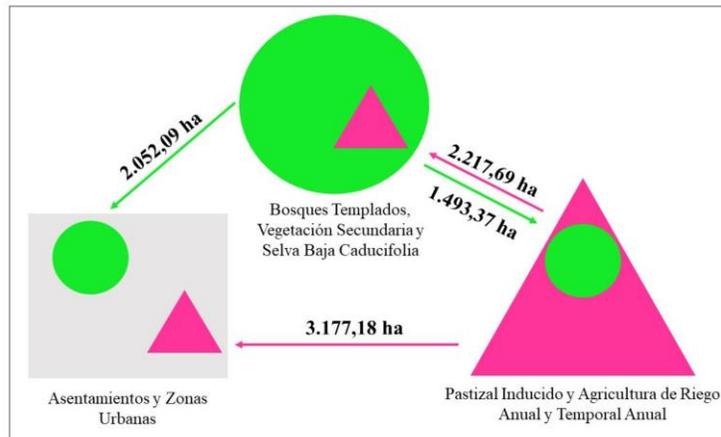
TABLA 1
Superficie y parámetros de cambio de USyV de 1994 a 2016.

USyV	Superficie 1994 ha (%)	Superficie 2016 ha (%)	Persisten cia (%)	Tasa anual (%)	Cambio Total Neto (ha)
Bosque Templado	23.055,2 (57,6)	22.483,7 (56,2)	85,0	-0,1	-571,7
Vegetación Secundaria	3.437,01 (8,6)	2.592,9 (6,5)	25,5	-1,3	-844,1
Pastizal Inducido	2.040,9 (5,1)	1.539,8 (3,8)	47,2	-1,2	-501,2
Agricultura de Riego Anual	2.938,3 (7,3)	1.104,4 (2,8)	23,3	-4,4	-1.833,9
Agricultura Temporal Anual	5.925,6 (14,8)	4.350,3 (10,9)	51,1	-1,4	-1.575,4
Selva Baja Caducifolia	84,3 (0,2)	47,7 (0,1)	18,3	-2,0	-36,6
Cuerpos de Agua	1.743,5 (4,4)	1.879,1 (4,7)	99,5	0,3	135,6
Zonas Urbanas	530,5 (1,3)	1.043,3 (2,6)	96,5	3,1	512,8
Vegetación de Zonas Urbanas	127,7 (0,3)	127,7 (0,4)	100,0	0	23,3
Asentamientos Humanos	148,9 (0,4)	0	0	-100	844,1
Zonas Urbanas con Vegetación	0	954,2 (2,4)	-	-	954,2
Agricultura de Riego Anual con Asentamientos	0	1.515,5 (3,8)	-	-	1.515,5
Agricultura de Temporal Anual con Asentamientos	0	2.370,3 (5,9)	-	-	2.370,3

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la dinámica de cambio en el municipio sigue un comportamiento característico. Al agrupar los cambios de las clases con cobertura vegetal (Bosque Templado, Vegetación Secundaria y Selva Baja Caducifolia) se tiene que estas clases cedieron 1.493,37 ha a áreas transformadas como Pastizal Inducido y Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual y estas a la vez intercambiaron con las primeras 2.217,69 ha. Por otra parte, 5.229,27 ha de los dos grupos antes mencionados se convirtieron en clases asociadas con Asentamientos Humanos y Zona Urbana (Figura 4). Los patrones de cambio en el municipio concuerdan con los mencionados por VEGA Y MÁRQUEZ (2007), quienes reportan que en la cuenca de Valle de Bravo las principales transiciones entre clases ocurren en sitios transformados o en áreas de aprovechamiento debido al abandono de tierras.

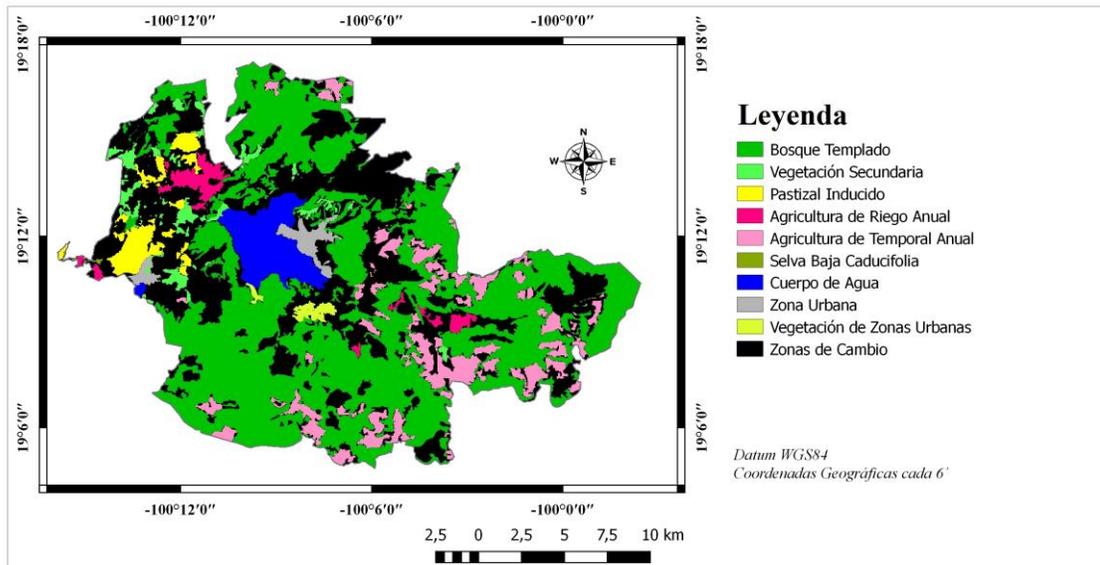
FIGURA 4
Dinámica de Cambios de Uso de Suelo y Vegetación en el municipio de Valle de Bravo



Fuente: Elaboración propia

En el periodo de estudio (1994-2016), el cambio total se observó en 30,99 % del territorio municipal, que en términos de superficie equivale a 12,407 ha, y que expresado en sentido de la persistencia el Municipio presenta un valor de 69,01% (Figura 5). Si bien los cambios son significativos, sucedieron en áreas ya transformadas en la parte este, noroeste y centro. BONFILIO *et al.* (2009) refieren que, entre los años de 1992 y 2002, el cambio total para el estado de México fue de 6,7% con una persistencia del 93,3%, valores que contrastan de forma importante y para un periodo más breve al reportado en este trabajo.

FIGURA 5
Persistencia de usos de suelo y vegetación y zonas de cambio en el municipio de Valle de Bravo, 1994-2016.



Fuente: Elaboración propia

En resumen, se puede decir que en el municipio predominó la superficie forestal, la cual como clase independiente presentó una persistencia del 85%, lo cual tiene múltiples beneficios ambientales

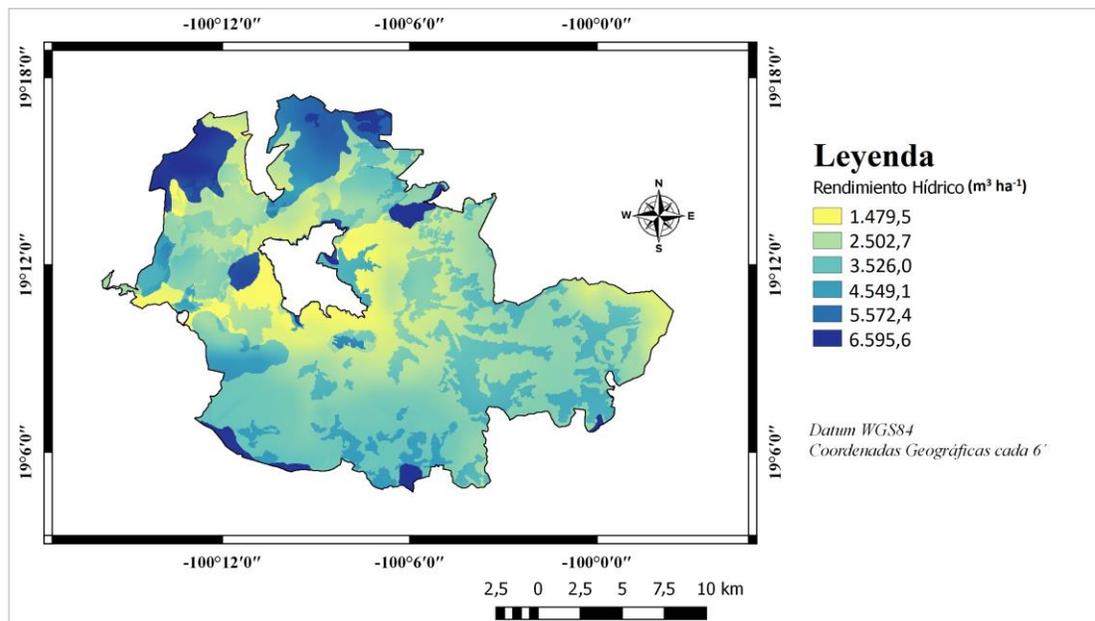
y económicos. No obstante, las zonas boscosas que rodean a las ciudades han sido las más afectadas y, las que aún persisten, se encuentran amenazadas debido a la permanente posibilidad de convertirse en Zona Urbana, patrón de cambio de USyV que ha sido mencionado por RENTERÍA *et al.* (2005) para la zona de estudio.

3.2 RENDIMIENTO HÍDRICO

La constante Z tiene implícita la estacionalidad de las precipitaciones y por ende el SE de RH depende de su valor (GASPARI *et al.*, 2015). ZHANG *et al.* (2001) y CHEN *et al.* (2012) mencionan que la constante puede tomar valores entre 1 y 10, específicamente ZHANG *et al.* (2012) hacen referencia a que en climas templados, éste se ubica entre 3 y 8 puntos. En el caso del municipio de Valle de Bravo la constante Z establecida fue de (3,8), valor que presenta correspondencia con lo mencionado por los autores anteriores, puesto que el clima en la región es templado subhúmedo con lluvias verano.

El modelo de rendimiento hídrico en el municipio para los años considerados estimó valores extremos entre $818,25 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $9.820,46 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, con valores promedio de $3.372,5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y $3.456,6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para 1994 y 2016, respectivamente. Así en el año de 1994 se obtuvo un rendimiento hídrico total de $128.782.039,73 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Figura 6).

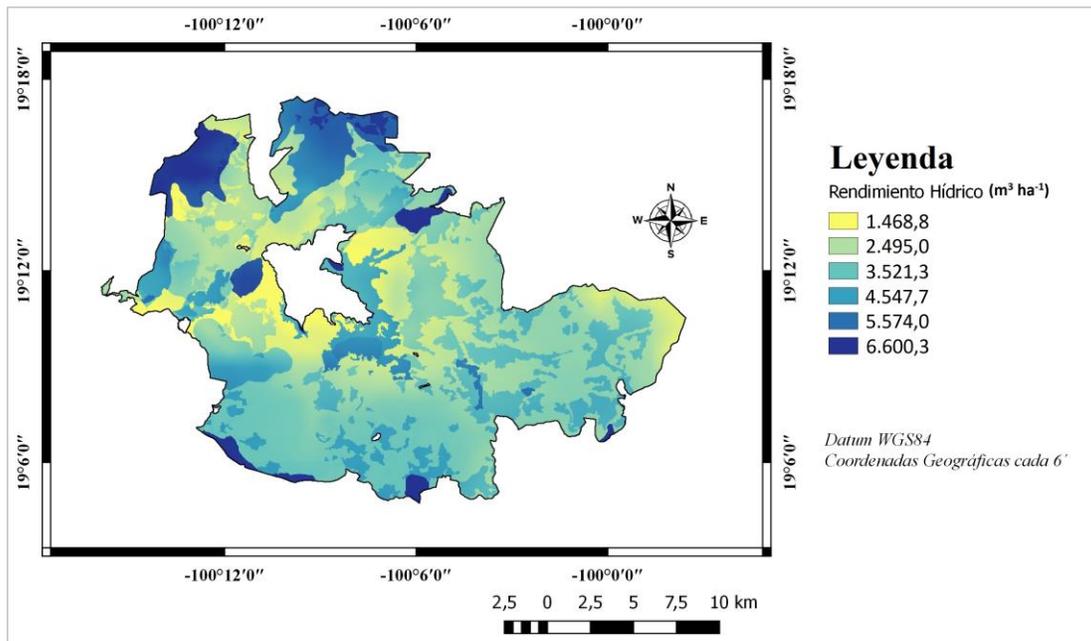
FIGURA 6
Rendimiento Hídrico para los años de 1994.



Fuente: Elaboración propia

En cambio para 2016 este volumen incrementó en $3.211.284,24 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, resultando un total de $131.993.323,97 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (Figura 7). Tomando en cuenta el 100 % de la precipitación total ($490,37\text{E}+6 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$), cifra utilizada en el modelo, el RH para 1994 y 2016 representó 26,2% y 26,9%, respectivamente. Estos valores significan cifras altas, si se considera que bajo condiciones naturales diversos autores (CHANG, 2003; ELLIOTT *et al.*, 2017) han estimado un escurrimiento total entre 9% y 12% del total de la precipitación anual.

FIGURA 7
Rendimiento Hídrico para los años de 2016.



Fuente: Elaboración propia

El incremento o disminución de este servicio puede ser ocasionado por múltiples factores como cambios en la precipitación y en la evapotranspiración potencial; sin embargo, el cambio en el uso de suelo y vegetación es el agente más importante que lo regula (PAN *et al.*, 2013; JING *et al.*, 2015). Cuando nos enfocamos en el rendimiento hídrico para cada una de las clases de uso del suelo y vegetación se tiene que el Bosque Templado al ocupar poco más de la mitad de la superficie del territorio municipal, presentó el mayor aporte entre los años de 1994 y 2016, con un 56,2% y 55,4% respectivamente del rendimiento total. Los valores promedio de esta clase para cada año fueron de $3.372,5 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ y $3.456,6 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ (Tabla 2). Después del Bosque Templado, la Agricultura de Temporal Anual, es la clase que muestra el mayor aporte total de agua para el municipio, con un volumen de $23.508.670,0 \text{ m}^3 \text{año}^{-1}$ (18,2%) y un valor promedio de $3.964,44 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ para 1994; y de $18.222.734,6 \text{ m}^3 \text{año}^{-1}$ (13,8%) con un promedio de $4.188,86 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ en 2016. En el tercer sitio se encuentran aquellas clases relacionadas con la Zona Urbana y Asentamientos; si bien en 1994 aportaron $3.468.891,4 \text{ m}^3 \text{año}^{-1}$, en el año 2016 éste se incrementó a $24.151.174,2 \text{ m}^3 \text{año}^{-1}$ (18,3%), con un ligero incremento en su rendimiento promedio al pasar de $4.274,7 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ a $4.318,8 \text{ m}^3 \text{ha}^{-1} \text{año}^{-1}$. Por otra parte, las clases Vegetación Secundaria, Pastizal Inducido y Agricultura de Riego Anual en conjunto aportaron 22,4% ($28.916.861,0 \text{ m}^3 \text{año}^{-1}$) del total de agua en 1994 y 12,2% ($16.175.695,0 \text{ m}^3 \text{año}^{-1}$) en el año 2016. Finalmente, la clase que menos agua aportó para ambos años fue la Selva Baja Caducifolia (Tabla 2). Desde la perspectiva del ser humano, el incremento de un SE resultaría benéfico; sin embargo, en el caso del rendimiento hídrico un aumento implica la pérdida de capacidad de regulación del sistema ecológico, dada la alteración de uno de los componentes clave como es la vegetación o cobertura vegetal, ya sea esta última de origen natural o antrópico. Autores como COSTANZA *et al.* (2014) y ELLIOTT *et al.* (2017), refieren que la estructura de la cobertura vegetal y su composición de especies vegetales son factores determinantes e influyen en el balance del ciclo hidrológico; es decir, cuando se remueve la cobertura vegetal el agua que comúnmente tendría que seguir la vía de la evapotranspiración y la de infiltración disminuye, de esta forma aumenta el volumen de agua superficial, lo que afecta el flujo base a largo plazo. En caso contrario,

la presencia de una mayor cobertura vegetal mantiene los flujos característicos del ciclo del agua (NAMBIAR y BROWN, 1997; ELLIOTT *et al.*, 2017).

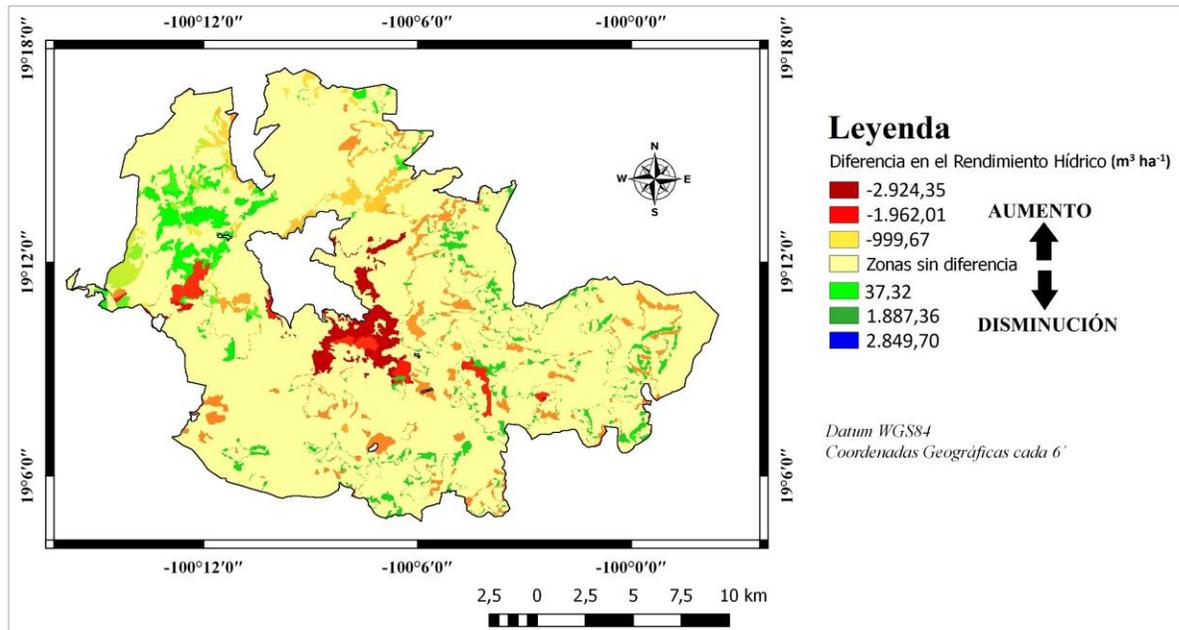
TABLA 2
Rendimiento hídrico total año y promedio por hectárea año de las clases de uso del suelo y vegetación para 1994 y 2016.

USyV	1994		2016	
	m ³ año ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹	m ³ año ⁻¹	m ³ ha ⁻¹ año ⁻¹
Bosque Templado	72.413.930,0	3.140,9	73.143.040,0	3.253,1
Vegetación Secundaria	11.780.140,0	3.421,0	7.685.482,0	2.963,9
Pastizal Inducido	6.315.661,0	3.159,3	4.969.060,0	3.223,8
Agricultura de Riego Anual	10.821.060,0	3.635,6	3.521.153,0	3.188,3
Agricultura de Temporal Anual	23.508.670,0	3.964,4	18.222.730,0	4.188,9
Selva Baja Caducifolia	297.442,6	3.527,1	124.436,8	2.277,8
Zona Urbana	2.313.542,0	4.346,6	4.700.221,0	4.505,2
Vegetación de Zonas Urbanas	645.890,4	5.057,4	759.070,2	5.026,2
Asentamientos Humanos	509.459,0	3.420,3	0,0	0,0
Agricultura de Riego Anual con Asentamientos	0,0	0,0	5.822.621,0	3.842,0
Agricultura de Temporal Anual con Asentamientos	0,0	0,0	8.411.038,0	3.548,4
Zonas Urbanas con Vegetación	0,0	0,0	4.458.224,0	4.672,3
TOTAL	128.605.795,0	2.806,0	131.817.076,0	3.180,8

Fuente: Elaboración propia

Las diferencias en el rendimiento hídrico entre 1994 y 2016 se pueden observar espacialmente en la Figura 8. Con valor de cero (en tono amarillo) se muestran las áreas que no presentaron diferencia en este servicio y que corresponden al 83% del territorio municipal; en tonalidades de verde y azul las áreas en las que el rendimiento disminuyó entre 285,6 m³ ha⁻¹ año⁻¹ y 2.851,7 m³ ha⁻¹ año⁻¹, superficie que corresponde al 6% del área; y en tonalidades de rojo y naranja aquellas zonas donde el servicio aumento entre 355,9 m³ ha⁻¹ año⁻¹ y 2.921,9 m³ ha⁻¹ año⁻¹, que corresponden al 11% del municipio. Es importante hacer énfasis en esta imagen, ya que como fue mencionado en la sección metodológica, las áreas con un aumento del SE de RH se muestran con valores negativos y, las que corresponde a una disminución con valores positivos.

FIGURA 8
Diferencia en el rendimiento hídrico entre 1994 y 2016.

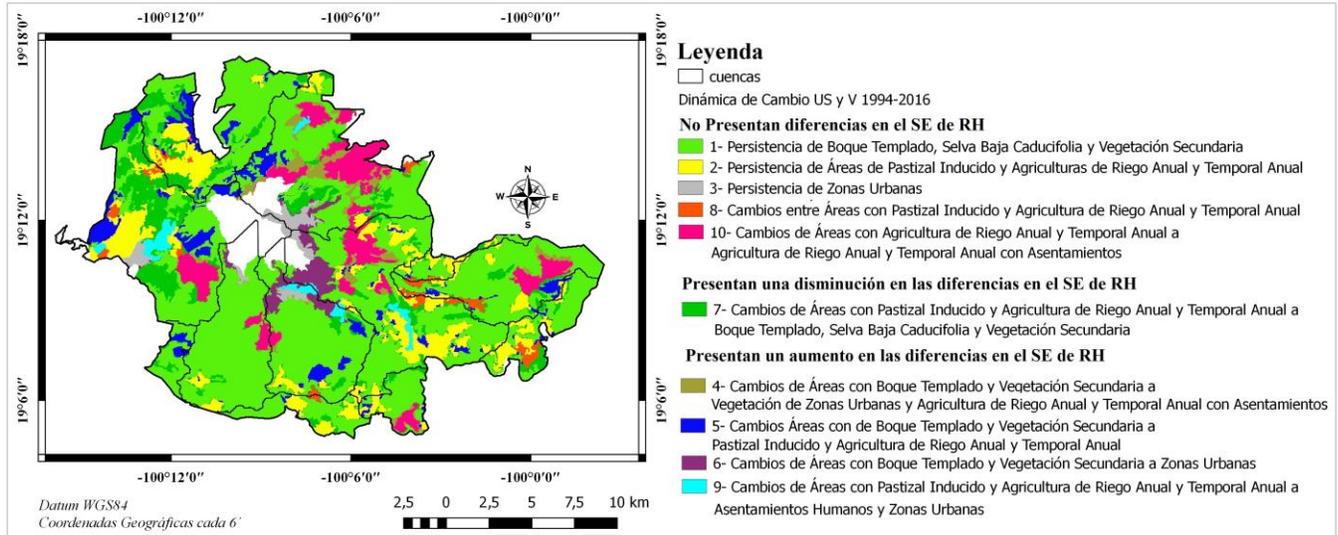


Fuente: Elaboración propia

Al considerar las diez direcciones de cambio de uso del suelo y vegetación (Anexo 3) en función del aumento, disminución o no diferencia del rendimiento hídrico entre 1994 y 2016, se observó que en áreas donde las clases persistieron (clases de cambio uno, dos y tres) y zonas con intercambios entre coberturas ya transformadas (clases ocho y diez) no presentaron diferencias entre uno y otro año. Por otra parte, la agrupación que consideró la dinámica de cambio en áreas con clases de menor a mayor cobertura vegetal (clase de cambio siete, que representa los cambios de Pastizal Inducido y Vegetación Secundaria a Bosque Templado, o bien, de Agricultura de Temporal Anual y Riego Anual a Bosque Templado), mostraron una disminución en el rendimiento hídrico. Caso contrario, el aumento del RH se presentó en aquellas zonas con dirección de cambio de clases hacia menor cobertura vegetal (clases de cambio cuatro, cinco, seis y nueve) como son, por una parte, de Bosque Templado y Vegetación Secundaria a los dos tipos de Agriculturas anuales y, por la otra, de Bosque Templado, Vegetación Secundaria, Agricultura de Riego Anual y de Temporal Anual a Áreas Urbanas o con algún tipo de Asentamiento (Figura 9). Lo anterior se puede corroborar con los valores promedio de las diferencias del SE de RH entre 1994 y 2016 (Anexo 1). En este sentido, se detectó solamente un grupo constituido por las clases de cambio uno, dos, tres, cinco, ocho y diez, que no presentaron diferencias estadísticamente significativas en el RH entre sí, mientras que el resto de las direcciones de cambio tuvieron diferencias estadísticamente significativas entre ellas y con el grupo detectado. Estas direcciones de cambio que presentaron diferencias significativas son la clase de cambio siete constituida por áreas con una recuperación de cobertura vegetal y las clases de cambio cuatro, seis y nueve, asociadas a áreas de Asentamientos y Zonas Urbanas.

FIGURA 9

Clases de cambio de USyV según las diferencias en el rendimiento hídrico entre 1994 y 2016 en el Municipio de Valle de Bravo.



Fuente: Elaboración propia

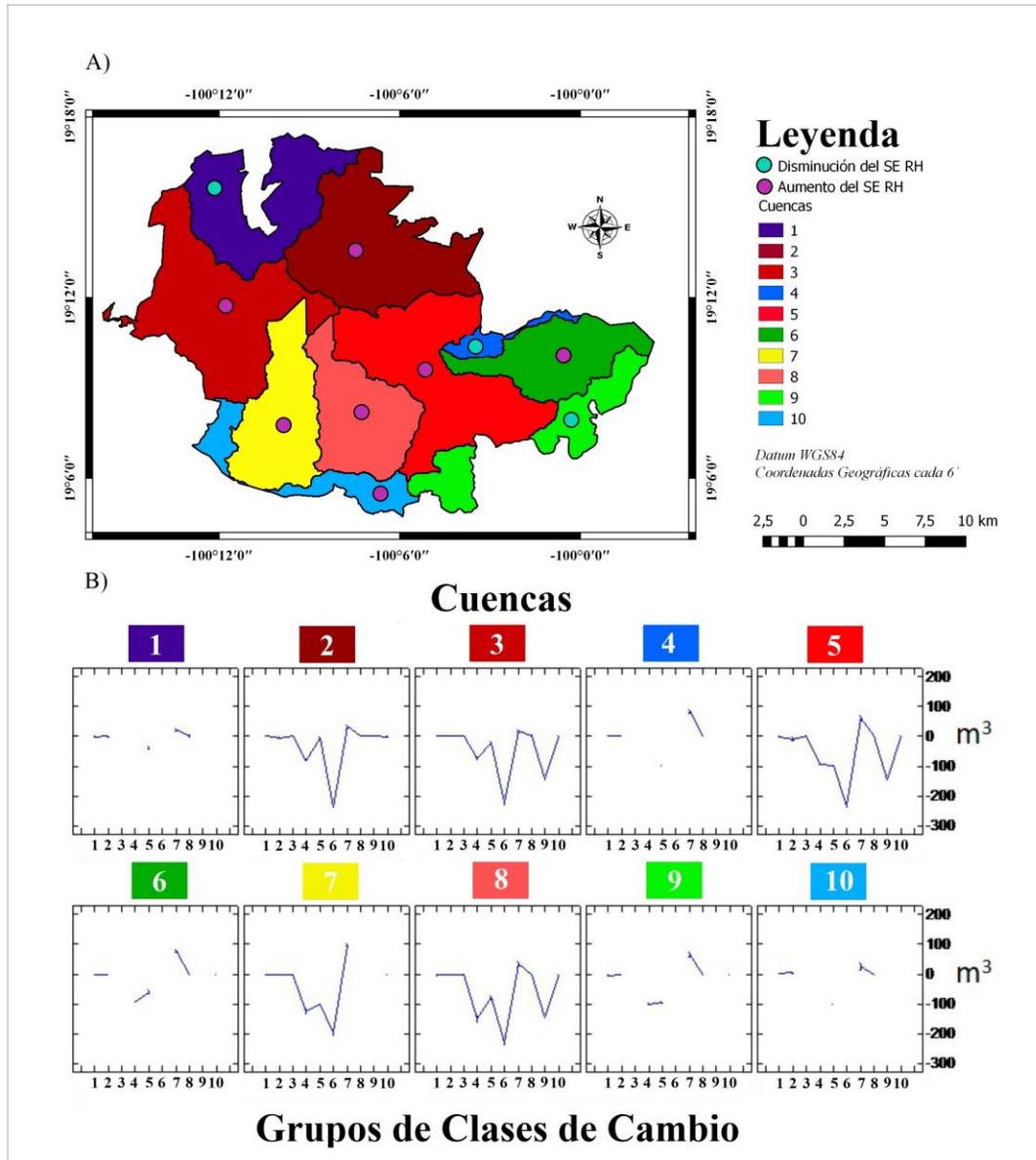
Las dinámicas de cambio del USyV y la intensidad de transformación en la cobertura vegetal, determinan la magnitud en el incremento o disminución del SE de RH, lo cual ha sido documentado por CHEN *et al.* (2011) y ELLIOTT *et al.* (2017). En síntesis y considerando la sucesión de los patrones de cambio para el municipio de Valle de Bravo, las direcciones de cambio asociadas al incremento del RH se registraron en aquellas clases donde disminuyó la cobertura vegetal, como son los cambios de Bosque Templado a Pastizal Inducido y Agricultura de Temporal Anual y Riego Anual y, cambios de Pastizal Inducido y Agricultura de Temporal Anual y Riego Anual a Zonas Urbanas y Asentamientos.

Ahora bien, cuando se consideran las dinámicas de clase de cambio en las distintas cuencas hidrográficas se identifican cuatro patrones característicos. Las cuencas dos, tres, cinco y ocho en colores rojos (Figura 10), se caracterizaron por presentar las diez clases de cambio, entre ellas destacan por su magnitud las clases de cambio cuatro, seis y nueve, que pertenecen a direcciones de cambio de coberturas de Bosque Templado, Vegetación Secundaria y Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual hacia clases asociadas a Zonas Urbanas y Asentamientos. Caso singular es la cuenca siete, en color amarillo, que mostró ocho direcciones de cambio, entre las que sobresalen las clases cuatro y seis. Las cinco cuencas antes mencionadas comparten el espejo de agua de la Presa de Valle de Bravo y en ellas se encuentran las principales zonas de crecimiento urbano. Por otro lado, las cuencas seis y nueve (en colores verdes) presentaron siete clases de cambio y, por último, las cuencas uno, cuatro y diez en colores azules presentaron únicamente cinco clases de cambio (Figura 10 A y 10 B). Espacialmente estas últimas entidades hidrográficas se encuentran hacia los límites del municipio, donde la persistencia de clases y los cambios hacia usos del suelo agrícola fueron predominantes.

El balance total del RH para cada cuenca hidrográfica se muestra en la Figura 10A. En las cuencas uno, cuatro y nueve el balance entre las clases de cambio presentes y su magnitud resultó en la disminución del RH total, lo que implica predominancia de aquellas clases que presentaron una recuperación de la cobertura vegetal, caso contrario resultó en el resto de las cuencas hidrográficas en las que se estimó un aumento del RH.

FIGURA 10

A) Balance total en el RH de cada cuenca hidrográfica (el punto en color azul representa las cuencas donde el RH disminuyó y el punto morado donde el RH aumentó). B) Clases y magnitud de cambio presentes en las cuencas hidrográficas en el municipio de Valle de Bravo.



Fuente: Elaboración propia

Hace algunas décadas no se tenía la suficiente información sobre lo importante que es mantener la vegetación para la generación de agua dulce; se creía que la reducción de los Bosques no provocaba un incremento en el RH y que ningún aumento deliberado de la cobertura forestal causaba una disminución en éste (BOSCH, 1983). Ahora se sabe que la cobertura forestal sirve de compartimento distribuidor de la precipitación desde la atmósfera hacia el suelo (LATERRA *et al.*, 2011) y que cualquier cambio en la precipitación, así como en el USyV por actividades humanas debido a la

aplicación de políticas y ajustes estructurales en el territorio, contribuyen al cambio de este SE (JING *et al.*, 2015). Lo anterior se observa en las diferencias estadísticas del RH en cada una de las cuencas hidrográficas (Anexo 2). En dicha tabla se muestra un primer grupo de cuencas identificadas con la letra a las cuales no presentan diferencias estadísticas significativas, muestran promedios de las diferencias cercanos a cero y están constituidas por clases de cambio persistentes y orientadas a la agricultura. Un segundo grupo heterogéneo de cuencas señaladas con las letras b, c y d presentan promedios de las diferencias superiores al grupo anterior con la característica de mostrar direcciones de cambio dirigidas a zonas urbanas y asentamientos. Finalmente, la cuenca ocho que presentó el promedio de diferencias negativo más alto y que es estadísticamente diferente del resto de las cuencas.

4. CONCLUSIONES

En este estudio comparativo de 22 años las dinámicas de cambio de USyV han mostrado por una parte que los Bosques Templados y la Selva Baja Caducifolia se han transformado en Vegetación Secundaria, Pastizal inducido y Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual. Sin embargo, el mayor número de cambios se han presentado de las clases anteriores hacia clases asociadas con Asentamientos Humanos y Zonas Urbanas. A pesar de estas transiciones, el municipio aún conserva parte importante de sus áreas forestales (56,2%) que contribuyen de forma sostenida al aporte de agua.

Las diferencias en el RH entre 1994 y 2016, muestran que se ha producido un aumento de este SE, asociado con direcciones de cambio de coberturas naturales hacia coberturas de origen antrópico, es decir, cuanto mayor es el nivel de transformación de la cobertura mayor es el incremento en el SE; en sentido opuesto, se observa una disminución de este SE en áreas con transiciones hacia coberturas con vegetación forestal.

Se puede concluir que para el año 2016 el SE de RH aumentó en 7 cuencas, a causa del predominio de direcciones de cambio que favorecieron esta dinámica. Las Zonas Urbanas incrementaron casi el doble de su superficie como una consecuencia de la forma en la que la sociedad se ha apropiado del territorio municipal, particularmente por el aumento de la actividad turística. Cabe destacar que las actividades económicas en la región son una vertiente que puede contribuir con nuevas propuestas de ordenamiento y manejo para conservación de los recursos hídricos y forestales, pero al mismo tiempo pueden convertirse en la gran causa de su degradación.

De forma general los modelos de RH permiten predecir patrones de distribución del SE ante cambios en el USyV y son una herramienta que ayuda a sustentar planes de ordenamiento territorial, sin embargo, es imprescindible considerar el contexto social para la toma de decisiones. De igual forma y para aumentar la validez de los modelos, es necesario contar con estudios de campo que corroboren la información disponible y bases de datos de mayor resolución espacial.

5. AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados en este trabajo forman parte de la tesis Evaluación de los Servicios Ecosistémicos de Rendimiento Hídrico y Turismo de Naturaleza en el Municipio de Valle de Bravo, Estado de México de la Maestría en Ecología Aplicada de la Universidad Autónoma Metropolitana - Unidad Xochimilco, así como del proyecto Evaluación de servicios ecosistémicos a nivel de paisaje en las subcuencas hidrográficas del sistema Cutzamala, Estados de México y Michoacán, financiado por la misma Universidad.

Gracias a la Maestría en Ecología Aplicada por darme esta oportunidad y a cada uno de mis profesores y compañeros por compartir su conocimiento y experiencia, que ahora son parte de mi aprendizaje. Sobre todo, quiero agradecer a mi comité tutorial, por su dedicación, tiempo y paciencia.

6. BIBLIOGRAFÍA

- BONFILIO, N., PINEDA, J., BOSQUE, J., GÓMEZ, M. y PLATA, W. (2009): “Análisis de cambio del uso del suelo en el Estado de México mediante sistemas de información geográfica y técnicas de regresión multivariantes. Una aproximación a los procesos de deforestación”. *Investigaciones Geográficas*, vol. 69, p. 33-52.
- BOSCH, J.M. y HEWLETT, J.D. (1982): “A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration”. *J. Hydrol*, vol. 55, p. 3-23.
- BUDYKO M I. (1974): *Climate and Life*. New York: Academic Press, 1–510. Canadell J, R B Jackson, J B Ehleringer, et al. (1996): “Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale”. *Oecologia*, 108 (4): 583–595. EGOH B, B REYERS, M ROUGET, et al. (2008). “Mapping ecosystem services for planning and management. Agriculture”, *Ecosystems and Environment*, vol. 127, n°1, 2, p. 135–140.
- BUNGE, V., MARTÍNEZ, J. y RUIZ, K. (2012): “Escenarios de la dinámica hídrica de la región de aporte del sistema Cutzamala”. Documento de Trabajo de la Dirección General de Ordenamiento Ecológico y Conservación de Ecosistemas. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, México. http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgioece/Dinamica_Hidrica_Cutzamala.pdf. [Consulta: 17 de Junio del 2016].
- CÁRCAMO, M., RUÍZ, A. y LEÓN, M. (2013): “La acción colectiva para frenar el deterioro forestal de Monte Alto, Valle de Bravo, México”. *Cadernos PROLAM/USP*, vol. 1, p. 104-128.
- CHANG M. (2003): “Forest hydrology. An introduction to water and forests”. Boca Raton (FL): CRC Press.
- CHEN, L., XIE, G., ZHANG, C., PEI, S., FAN, N., GE, L. y ZHANG, C. (2011): “Modelling Ecosystem Water Supply Services across the Lancang River Basin”. *Journal of Resources and Ecology*, vol.2, n°4, p. 322-327. doi: 10.3969/j.
- CHUVIECO, E. (2002): “Teledetección Ambiental: La Observación de la Tierra Desde el Espacio”. Madrid: Ariel.
- CONABIO. (2008): “Caso Valle de Bravo. Marzo 2016, de CONABIO”. http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/cambios_veg/doctos/localizacion_valle.html. [Consulta: 1 de mayo 2016].
- COSTANZA, R., DE GROOT, R., SUTTON, P., PLOEG, S., ANDERSON, S., KUBISZEWSKI, I.,...TURNER, K. (2014): “Changes in the global value of ecosystem services. Global Environmental Change”, vol. 26, p. 152–158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>. [Consulta: 3 de Febrero del 2016].
- CUERVO, A., TÉLLEZ, O., GÓMEZ, M., VENEGAS, C., MANJARREZ, J y MARTÍNEZ, E. (2014): “An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico”. *International Journal of Climatology*, vol. 34, n° 7, p.2427-2437.
- DE GROOT, R., WILSON, M y BOUMANS, R. (2002): “A tipology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. Ecological Economics”, vol. 41, p.393-408.
- EARTHEXPLORER. (2016): USGS science for a changing world. <https://earthexplorer.usgs.gov>. [Consulta: 25 de Enero 2016].
- EASTMAN, J. (2012): “IDRISI Selva Guía para SIG y Procesamiento de Imágenes”. Universidad de Boston: Clark Labs.
- ELLIOTT, K., CALDWELL, P., BRANTLEY, S., MINIAT, C., VOSE, J. y SWAN, W. (2017): “Water yield following forest–grass–forest transitions”. *Hydrol.EarthSyst.Sci.*21: 981–997. doi:10.5194/hess-21-981-2017.
- ESCOLERO, O., MARTINEZ, S., KRALISCH, S. y PEREVOCHTCHIKOVA, M. (2009): “Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático”. Centro virtual del Cambio Climático. www.cvcccm-

- atmosfera.unam.mx/sis_admin/.../agua_escolero_inffinal_org.pdf . [Consulta: 7de julio del 2016].
- FAO. (1998): “Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56”. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>. [Consulta: 2 febrero del 2016].
- FAO. (2007): “Food and Agriculture Organization of the United Nations”. <http://www.fao.org/docrep/009/a0773e/a0773e00.htm>. [Consulta: 14 de Junio del 2016].
- FAO. (2012): “Harmonized World Soil Database (version 1.2)”. http://library.wur.nl/WebQuery/file/isric/fulltext/isricu_t4bb310b7_001.pdf. [Consulta: 16 de Marzo del 2016].
- FARLEY, K., JOBBÁGY, E. y JACKSON, R. (2005): “Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy”. *Global Change Biology*, vol. 11, p. 1565-1576. doi: 10.1111/j.1365-2486.2005.01011.x.
- GASPARI, F., DÍAZ, R., DELGADO, M y SENISTERRA, E. (2015): “Evaluación del Servicio Ambiental de provisión hídrica en cuencas hidrográficas del sudeste bonaerense”. *Rev. Fac. Agron*, vol. 114, p. 214-221.
- GOLDMAN, R., BENITEZ, S., CALVACHE, A., DAVIDSON, S., ENNAANAY, D., MCKENZIE, E. y TALLIS, H. (2010): “Linking People and Nature through Watershed Conservation in the East Cauca Valley, Colombia”. Junio 2016, de TEEB. https://www.naturalcapitalproject.org/pubs/NatCap_Colombia_Water_Fund_Demonstration_TE_EB_2010.pdf. [Consulta: 10 marzo del 2017]
- HAMEL, P. y GUSWA, A. (2015): “Uncertainty analysis of a spatially explicit annual water-balance model: case study of the Cape Fear basin, North Carolina”. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol.19, p. 839–853. doi:10.5194/hess-19-839-2015.
- HERNÁNDEZ, G., MARTÍNEZ, C., MARTÍNEZ, J. y MILLÁN, G. (2000): “Comunicación y Apoyo al Saneamiento de la Cuenca de Valle de Bravo”, *Anuario*, p. 8.
- HERNÁNDEZ, N., ZIZUMBO, L. y VARGAS, E. (2011): “Prácticas ambientales de las empresas turísticas de Valle de Bravo”. *Medellín*, vol. 14, n°3, p. 65-78.
- INE. (2009): “Priorización y recomendaciones de acciones de conservación en las subcuencas del sistema Cutzamala”. http://www.inecc.gob.mx/descargas/cuencas/subcuencas_cutzamala.pdf. [Consulta: 17 de Julio del 2016].
- INEGI. (1994): Fotografías aéreas, escala 1:75,000. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. México. <http://www.inegi.org.mx/>. [Consulta: 9 de mayo 2015].
- INEGI. (2010): “Compendio de información geográfica municipal 2010 Valle de Bravo, México”. Clave Geoestadística 15110.
- INEGI. (2012): Modelos Digitales de Elevación. Valle de Bravo. <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapas/default.html?t=MAP0701000000&ag=15>. [Consulta: 8 de Junio 2015].
- INEGI. (2014): Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). “Guía para la interpretación de cartografía: uso del suelo y vegetación: escala 1:250, 000”, http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/recnat/usuarios/doc/guia_interusuarios.pdf. [Consulta: 15 de Mayo de 2015].
- JING, Y., YONGWEI, Y., YAN, N., ENJUN, M., HONGJI, L. y XIAOLI, G. (2015): “The Temporal and Spatial Evolution of Water Yield in Dali County”. *Sustainability*. Vol. 7. 6069-608. doi:10.3390/su7056069.
- JOBBÁGY, G., ACOSTA, A y NOSETTO M. (2013): “Rendimiento hídrico en cuencas primarias bajo pastizales y plantaciones de pino de las sierras de Córdoba (Argentina)”. *Ecología Austral* vol. 23.n° 2, p. 87-96.
- LATERRA, P., JOBBÁGY, G. y PARUELO, J.M. (2011): “Servicios hídricos de los ecosistemas y su relación con el uso de la tierra en la llanura Chaco-Pampeana”. En Valoración de servicios

- ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Buenos Aires, INTA. pp. 163-183.
- LÓPEZ, V. H. y PLATA, R. W. (2009): “Análisis de los cambios de cobertura de suelo derivados de la expansión urbana de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1990 – 2000”. *Investigaciones Geográficas*, vol. 68. p. 85 - 101.
- LÓPEZ, Y., TREJERO, D., TORRES, A. y LUNA, I. (2011): “Flora del Bosque Mesófilo de Montaña y Vegetación Adyacente en Avándaro, Valle de Bravo, Estado de México, México”. *Bol.Soc.Bot.Méx.*, vol. 88, p. 35-53.
- MONTGOMERY, D. (2004): Diseño y análisis de experimentos. México: LIMUSA.
- NAMBIAR, E. y BROWN, A. (1997): “Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests”. Mayo 2016, de ACIAR. <http://aciar.gov.au/files/node/2204/MN43-part%201.pdf>. [Consulta: 6 de febrero 2016].
- PAN, T., WU, S., DAI, E y LIU, Y. (2013): “Spatio temporal variation of water source supply service in Three Rivers Source Area of China based on InVEST model”. *Appl.Ecol*, vol. 24, n°1, p.183-189.
- PROBOSQUE. (2010): “PRINCIPALES PROGRAMAS FORESTALES DE LA ADMINISTRACIÓN ESTATAL: Capítulo 5”. <http://probosque.edomex.gob.mx/images/Inventario-forestal/InventarioFtal2010Parte2.pdf>. [Consulta: 2 de Marzo 2016].
- QUÉTIER, F., TAPPELLA, E., COTI, G., CACERES, D. y DIAZ, S. (2007): “Servicios Ecosistémicos y Actores Sociales. Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario”. *Gaceta Ecológica*, vol. 84-85. p. 17-26.
- RENTERÍA, D., COTA, R. y ORTEGA, E. (2005): “Plan para La Gestión Integral del Agua y Recursos Asociados de La Cuenca Valle De Bravo, Estado de México”. Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)- Instituto Mexicano De Tecnología Del Agua (IMTA), p. 4-50.
- RENTERÍA, D., COTA, R. y ORTEGA, E. (2006): “Plan para La Gestión Integral del Agua y Recursos Asociados de La Cuenca Valle De Bravo, Estado de México”. Coordinación de Tecnología de Riego y Drenaje Subcoordinación de Conservación de Cuencas Comisión Nacional del Agua (CONAGUA)-Instituto Mexicano De Tecnología Del Agua (IMTA), p.1-103.
- SHARP, R., TALLIS, H. T., RICKETTS, T., GUERRY, A. D., WOOD, S. A., CHAPLIN-KRAMER, R. y HAMEL, P. (2016): “InVEST User Guide”. Marzo 2016, de “The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund”. [http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/InVEST+VERSION+ Documentation.pdf](http://data.naturalcapitalproject.org/nightly-build/invest-users-guide/InVEST+VERSION+Documentation.pdf). [Consulta: 18 de mayo 2015].
- TALLIS, H., RICKETTS, T., GUERRY, A., WOOD, S., SHARP, R., NELSON, E.,... SCHULTZE, E. D. (1993): “Evaporation and canopy characteristics of coniferous forests and grasslands”. *Oecologia*, vol. 95, p. 153-163.
- VEGA, E. y MÁRQUEZ, R. (2007): “Evaluación indirecta del disturbio mediante la combinación de estrategias de modelaje: un ejemplo con la cuenca de Valle de bravo, Estado de México”. http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/395/vega_marquez.html. [Consulta: 3 de marzo del 2016].
- VIGERSTOL, K. y AUKEMA, J. (2011): “Comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services”. *Journal of Environmental Management*, vol. 92, p. 2403-2409. doi:10.1016/j.jenvman.2011.06.040.
- WU, R., LIU, G y WEN, Y. (2017): “Spatiotemporal variations of water yield and water quality purification service functions in Guanting Reservoir Basin based on InVEST model”. *Research of Environmental Sciences*, vol. 30, n°3, p. 406-414. doi: 10.13198/j.
- ZHANG, L., DAWES, W y WALKER, G R. (2001): “Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale”. *Water Resources Research*, vol. 37, n°3, p. 701-708. doi: 10.1029/2000WR900325.

ZHANG, C., LI, W., ZHANG, B. y LIU, M. (2012): “Water Yield of Xitiaoxi River Basin Based on InVEST Modeling”. *J. Resour. Ecol.*, vol. 3, p. 050-054. doi:10.5814/j.

ANEXO 1

Valores promedio de las diferencias estadísticas del RH en las clases de cambio de USyV (La letra “a” indica que no existen diferencias significativas ($p < 0,05$) entre direcciones de cambio).

Dirección de cambio	Promedio	
7	51,98	
8	0,59	a
10	0,039	a
3	0	a
2	-0,93	a
1	-1,01	a
5	-68,87	a
4	-102,92	
9	-107,99	
6	-224,59	

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 2

Valores promedio de las diferencias del RH para cada cuenca hidrográfica (Letras iguales indican que no se detectaron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre las cuencas hidrográficas).

Cuenca hidrográfica	Promedio	
4	0,06	a
1	-2,74	a
6	-11,42	a
10	-13,76	a
9	-18,73	a b
2	-29,34	b
3	-39,56	c
7	-40	c d
5	-52,15	d
8	-58,06	

Fuente: Elaboración propia

ANEXO 3

Grupos de clases de cambio de USyV entre 1994 y 2016.

Cambios hacia Boque Templado, Selva Baja Caducifolia y Vegetación Secundaria		Cambios hacia Pastizales Inducido y Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual		Cambios hacia Zonas Urbanas y/o Asentamientos	
1994	2016	1994	2016	1994	2016
1) Persistencia de Boque Templado, Selva Baja Caducifolia y Vegetación Secundaria		2) Persistencia de Áreas de Pastizal Inducido y Agriculturas de Riego Anual y Temporal Anual		3) Persistencia de Zonas Urbanas	
Bosque Templado	Bosque Templado	Pastizal Inducido	Pastizal Inducido	Zona Urbana	Zona Urbana
Vegetación Secundaria	Vegetación Secundaria	Agricultura de Riego Anual	Agricultura de Riego Anual	Vegetación de Zonas Urbanas	Vegetación de Zonas Urbanas
Selva Baja Caducifolia	Selva Baja Caducifolia	Agricultura de Temporal Anual	Agricultura de Temporal Anual	4) Cambios de Áreas con Boque Templado y Vegetación Secundaria a Vegetación de Zonas Urbanas y Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual con Asentamientos	
7) Cambios de Áreas con Pastizal Inducido y Agricultura de Riego y Temporal Anual a Boque Templado, Selva Baja Caducifolia y Vegetación Secundaria		5) Cambios Areas con de Boque Templado y Vegetación Secundaria a Pastizal Inducido y Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual			
Vegetación Secundaria	Bosque Templado	Bosque Templado	Vegetación Secundaria	Bosque Templado	Vegetación de zonas Urbanas
Pastizal Inducido	Bosque Templado	Bosque Templado	Pastizal Inducido	Bosque Templado	Agricultura de Riego Anual con Asentamientos
Pastizal Inducido	Vegetación Secundaria	Bosque Templado	Agricultura de Riego Anual	Bosque Templado	Agricultura de Temporal Anual con Asentamientos
Agricultura de Riego Anual	Bosque Templado	Bosque Templado	Agricultura de Temporal Anual	Vegetación Secundaria	Agricultura de Riego Anual con Asentamientos
Agricultura de Riego Anual	Vegetación Secundaria	Vegetación Secundaria	Pastizal Inducido	Vegetación Secundaria	Agricultura de Temporal Anual con Asentamientos
Agricultura de Riego Anual	Selva Baja Caducifolia	Vegetación Secundaria	Agricultura de Riego Anual	6) Cambios de Áreas con Boque Templado y Vegetación Secundaria a Zonas Urbanas	
Agricultura de Temporal Anual	Bosque Templado	Vegetación Secundaria	Agricultura de Riego Anual	Bosque Templado	Zona Urbana
Agricultura de Temporal Anual	Vegetación Secundaria	Vegetación Secundaria	Agricultura de Temporal Anual	Bosque Templado	Zonas Urbanas con Vegetación
		Selva Baja Caducifolia	Pastizal Inducido	Vegetación Secundaria	Zonas Urbana
		8) Cambios entre Áreas con Pastizal Inducido y Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual		9) Cambios de Áreas con Pastizal Inducido y Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual a Asentamientos Humanos y Zonas Urbanas	
		Pastizal Inducido	Agricultura de Riego Anual	Pastizal Inducido	Zonas Urbana
		Pastizal Inducido	Agricultura de Temporal Anual	Agricultura de Riego Anual	Zonas Urbana
		Agricultura de Riego Anual	Pastizal Inducido	Agricultura de Riego Anual	Zonas Urbanas con Vegetación
		Agricultura de Temporal Anual	Pastizal Inducido	Agricultura de Temporal Anual	Zona Urbana
		Agricultura de Riego	Agricultura de Temporal	Asentamientos Humanos	Zona Urbana
		Agricultura de Temporal Anual	Pastizal Inducido	Asentamientos Humanos	Zonas Urbanas con Vegetación
				10) Cambios de Áreas con Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual a Agricultura de Riego Anual y Temporal Anual con Asentamientos	
				Agricultura de Riego Anual	Agricultura de Riego Anual con Asentamientos
				Agricultura de Riego Anual	Agricultura de Temporal Anual con Asentamientos
				Agricultura de Temporal Anual	Agricultura de Riego con Asentamientos
				Asentamientos Humanos	Agricultura de Temporal con Asentamientos

Fuente: Elaboración propia.