

Estimación sectorial de la huella hídrica de la ciudad de Bogotá generada en el año 2014

Sectorial estimate of the water footprint of Bogotá city generated in the year 2014

Ángela Castillo-Rodríguez¹, Marisol Castro-Chaparro², Álvaro Gutiérrez-Malaxechebarría³, Carmen Aldana-Gaviria⁴

¹ Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

Email: apcastillor@correo.udistrital.edu.co

² Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

Email: lmcastroc@correo.udistrital.edu.co

³ Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia.

Orcid: orcid.org/0000-0002-2306-1610 Email: amgutierrezm@udistrital.edu.co

⁴ Contraloría de Bogotá Email: caldana@contraloriabogota.gov.co

RECIBIDO: Octubre 19, 2017. ACEPTADO: Diciembre 04, 2017. VERSIÓN FINAL: Febrero 20, 2018.

RESUMEN

El presente artículo tiene como propósito presentar la estimación de la Huella Hídrica de la ciudad de Bogotá generada en el año 2014. La huella se define, de manera simplificada, como un indicador de consumo y contaminación de agua dulce. Para ello fueron seleccionados cuatro sectores para evaluar el tipo de huella correspondiente en cada uno: sector doméstico, industrial, agrícola y residuos sólidos. Se siguió la metodología propuesta por Hoekstra et al. La huella hídrica total de los sectores evaluados se estimó en 9 489.58 millones de m³, donde el sector de mayor huella fue el agrícola con 4 555.14 millones de m³, seguido por los sectores doméstico, de residuos e industrial. Finalmente, es posible concluir la insostenibilidad de la huella hídrica y, por lo tanto, la vulnerabilidad de la ciudad frente a la disponibilidad del recurso.

PALABRAS CLAVE: Bogotá; huella hídrica; sostenibilidad; consumo de agua; gestión del agua.

ABSTRACT

This article presents the estimate of the Water Footprint of Bogotá city generated in the year 2014. The water footprint is defined, in a simple way, as an indicator of consumption and pollution of freshwater. Four sectors were selected to evaluate the type of corresponding footprint in each: domestic, industrial, agricultural and solid waste. The methodology proposed by Hoekstra et al. was followed. The total water footprint of the evaluated sectors was estimated in 9 489.58 million m³, where the sector of higher footprint was the agricultural one, with 4 555.14 million m³, followed by the solid waste and industrial sectors. Finally, it can be concluded that the footprint is unsustainable and, therefore, the city is vulnerable considering the availability of the hydric resource.

KEYWORDS: Bogotá; water footprint; sustainability; water consumption; production; water management.

1. INTRODUCCIÓN

El agua está involucrada directamente en todas las actividades realizadas en una ciudad, por lo cual la huella hídrica es una herramienta útil para la formulación de medidas de mitigación y adaptación que permitan mejorar los niveles de sostenibilidad de las actividades humanas, ya que el objetivo de este indicador es medir la intensidad de uso del recurso [1] en síntesis, la huella hídrica es el volumen total de agua utilizado directa o indirectamente para producir cualquier bien o servicio. Según Arévalo[2], este indicador hace posible apreciar la presión ejercida por las actividades domésticas, industriales y agrícolas entre otras, además facilita la evaluación de los diferentes modelos de consumo y sus posibilidades de evolución en función a dicho recurso natural.

La huella hídrica tiene tres componentes, el agua azul definida como el consumo de agua proveniente de fuentes superficiales o subterráneas y por el agua lluvia almacenada por la vegetación se considera agua verde y finalmente, se encuentra el agua gris que se refiere a los volúmenes de agua necesarios para asimilar la carga contaminante con base en las normas de calidad ambiental[3], se recomienda estimarla bajo diferentes parámetros de calidad donde la máxima de estas estimaciones sea la huella gris definitiva[4]. En este caso no se analiza la vulnerabilidad asociada a la contaminación subterránea, ni se hacen modelaciones, contrario a lo presentado por Gómez-Isidro, Gutiérrez-Lozano y Torres [5] y por Blanco, Donado y Barajas[6]. Además, se incluye el concepto de agua virtual, el cual hace referencia al agua proveniente de territorios externos al área evaluada, permite incluir volúmenes de agua que asocian directamente actividades productivas foráneas con los términos económicos internos del área geográfica que se desea estudiar y de esta manera determinar un balance comercial referente al recurso hídrico [7].

Como menciona la WWF [8] la metodología empleada para el cálculo de la Huella Hídrica fue propuesta en 2002 por Arjen Y. Hoekstra del UNESCO - IHE, desarrollada posteriormente por la universidad de Twente y es descrita detalladamente en varios manuales de la Water Footprint Network[8]. Para la aplicación de este indicador en la ciudad de Bogotá se empleó una adaptación de dicha metodología la cual facilita la formulación de políticas, programas y proyectos encaminados a mejorar la gestión del agua.

La presente evaluación incluye cuatro sectores, entre ellos el doméstico que fue analizado mediante un enfoque de consumo, el sector industrial que emplea alrededor del

20% del agua total consumida en un país, el equivalente de un consumo de 130 m³ /persona/año según CONAGUA [9]. Así mismo se tuvo en cuenta el sector agrícola mediante el consumo de productos, lo cual implica aportes de agua virtual que se encuentra constituida por los tres componentes mencionados anteriormente[4]. El agua azul en el caso de animales vivos corresponde al agua de consumo, a la utilizada para limpiar el corral y lavar el animal entre otras mientras que la verde está relacionada con el consumo de alimentos de los animales y el agua gris se asocia con la lixiviación y escurrimiento de nitrógeno en actividades pecuarias. Mientras que para los productos agrícolas el agua azul, verde y gris corresponde a las actividades de riego, al agua lluvia incorporada por los cultivos y a la lixiviación de agroquímicos y fertilizantes, respectivamente [4]. Por último, se tuvo en cuenta la huella hídrica asociada la producción de lixiviados en el Relleno Sanitario Doña Juana como consecuencia de la descomposición de los residuos sólidos.

Una vez cuantificada la huella hídrica total mediante los resultados de los diferentes sectores, se realizó la evaluación de la sostenibilidad de la misma ya que esta arroja información importante respecto al impacto real sobre el recurso debido a que compara la disponibilidad de este con los niveles de consumo y contaminación generados en el periodo de evaluación.

Teniendo en cuenta lo anterior junto con los resultados desagregados de los sectores es posible emplear la huella hídrica como herramienta para comparar los niveles de uso y consumo mediante la huella per cápita con países como Canadá o China que cuentan con huellas por habitante de 2 048.87 y 702.48 m³/año respectivamente según CONAGUA [10]. Además, es una herramienta para el desarrollo de propuestas tendientes a mejorar la sostenibilidad de las actividades antrópicas con base en la interacción existente entre las relaciones sociales, los recursos económicos y naturales para de esta forma comprender al ambiente como un sistema complejo que requiere monitoreo permanente de su estado para así desarrollar y llevar a cabo actividades que propendan por su correcta utilización y conservación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada para estimación de la Huella Hídrica de Bogotá se basa en la propuesta por Hoekstra [4] ya que facilita la evaluación del uso y consumo de agua en ciudades. Esta metodología presenta la siguiente ecuación para la cuantificación de la huella en áreas geográficamente definidas, donde se incluyen los diferentes procesos o sectores presentes en la ciudad.

$$WF_{\text{área}} = \sum WF_{\text{proc}}[q] \quad (1)$$

Dónde:

$WF_{\text{área}}$: Huella Hídrica del área geográficamente definida.

WF_{proc} : Huella Hídrica de los diferentes procesos o sectores.

La cuantificación del consumo de agua en los diferentes procesos está dada por las siguientes ecuaciones y planteamientos.

2.1. Sector doméstico

La estimación de la Huella Hídrica para el sector doméstico se realizó desde el enfoque del consumo, ya que asociadas a este no se encuentran actividades productivas o de proceso. Para este sector se realizó el cálculo de las Huellas Hídricas Azul y Gris para, finalmente, realizar su sumatoria y así obtener la estimación total del sector.

2.1.1. Huella hídrica azul del sector doméstico.

Según Hoekstra [4] se refiere al consumo de los recursos de agua azul, es decir, agua superficial y subterránea. “El consumo” se refiere a la pérdida de agua de la masa de agua disponible en un área de captación. Se estima la Huella Hídrica azul del sector doméstico para un tiempo determinado como lo plantea la Water Footprint Network [4]:

$$[[WFD]]_{\text{Azul}} = \text{Afluente} - \text{Efluente} \quad (2)$$

Dónde:

WFD_{Azul} : Huella Hídrica Azul del Sector Doméstico

Afluente: Es el volumen de agua usada en la actividad evaluada, como aparece en la factura de servicios de agua potable.

Efluente: Es el volumen de agua calculada.

Considerando la delimitación geográfica de la ciudad y que “el agua que no vuelve a la misma zona de flujo, por ejemplo, es devuelta a otra zona de captación o al mar...” [4], (Para la ciudad de Bogotá las cuencas abastecedoras y de recepción de vertimientos no son las mismas), se puede asumir que el efluente de la cuenca es cero, desarrollando la ecuación de la siguiente manera.

$$[[WFD]]_{\text{Azul}} = \text{Afluente} - [[VF]]$$

$$_{\text{EAB}} + VNF + V_{\text{AB}} + [[GP]]_{\text{PTAP}} + V_{\text{SC}} \quad (3)$$

Dónde:

VFEAB = Volumen de agua Facturado por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAB.

VNF = Volumen de agua No Facturado. Calculado como la diferencia entre el volumen de agua suministrado a Bogotá y el volumen facturado por la EAB. Estas pérdidas se generan en los túneles y tuberías que distribuyen el agua a los diferentes usuarios de la ciudad, ya sea por fugaz en el sistema o acometidas ilegales.

VAB = Volumen vendido de Agua en Bloque.

GPPTAP = Gasto de Potabilización en las Plantas de Tratamiento de Agua Potable - PTAP. Se refiere al volumen de agua utilizado en plantas de tratamiento para el mantenimiento y funcionamiento de la planta, principalmente del lavado de filtros y de los drenajes de los sedimentadores y floculadores.

VSC = Volumen de agua Subterránea Concesionada por la Secretaría Distrital de Ambiente - SDA y la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR

2.1.2. Huella hídrica gris del sector doméstico.

La HH Gris se refiere a la contaminación y está definida como el volumen de agua dulce que se requiere para asimilar una carga de contaminantes dados las concentraciones naturales y estándares ambientales de calidad de agua. Es recomendable que la cuantificación se realice bajo diferentes parámetros de calidad y la Huella Hídrica Gris será la máxima entre las Huellas Hídricas Grises calculadas como lo presenta WFN.

En este caso se evaluó la HH Gris para los parámetros de Demanda Biológica de Oxígeno -DBO5 y Sólidos Suspendedos Totales -SST de los vertimientos generados por el sector, de los cuales el resultado de mayor magnitud corresponderá a la HH Gris del sector doméstico.

La HH gris se estima según Hoekstra [4] de la siguiente manera:

$$[[WFD]]_{\text{(Gris)}} = L / (C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}) = ([[Vol]]_{\text{efl}} \times C_{\text{efl}} - [[Vol]]_{\text{afl}} \times C_{\text{afl}}) / (C_{\text{max}} - C_{\text{nat}}) \quad (4)$$

Dónde:

WFDGris: Huella Hídrica Gris del sector Doméstico

Volefl: Corresponde al volumen estimado de vertimientos domésticos que son dispuestos en el alcantarillado. Este volumen corresponde aproximadamente al 85% del agua de uso doméstico[11], del cual el 30% es transportado a la cuenca del río Salitre para su posterior tratamiento y el 70% restante es vertido sin tratamiento a las cuencas de los ríos Tunjuelo y Fucha, afluentes del río Bogotá [12], lo cual diferenciará el volumen del efluente y su respectiva carga para calcular la HH Gris del sector así:

$$WFD_{Gris} = ((V_{efIST} \times C_{efIST}) + (V_{efIPTAR} \times C_{efIPTAR}) - (V_{afl} \times C_{afl})) / (C_{max} - C_{nat}) \quad (5)$$

Dónde:

VoleflST: Volumen de agua vertido Sin Tratamiento a las cuencas de los ríos Tunjuelo y Fucha. (70% del VolafI)

CeflST: Concentración de los vertimientos domésticos en los ríos Tunjuelo y Fucha de los parámetros a evaluar (DBO5, SST), reportados por el Observatorio Ambiental de Bogotá- OAB.

VoleflPTAR: Volumen de vertimientos en la cuenca del río Salitre, después del tratamiento en la Planta de tratamiento de Aguas Residuales - PTAR El Salitre. (30% del VolafI)

CeflPTAR: Concentración de los vertimientos que salen de la PTAR el Salitre después de su tratamiento en los parámetros DBO5, SST, reportados por la EAB.

VolafI: Volumen de agua Vertida por los habitantes de la ciudad. (85% del agua potable consumida en uso doméstico.)

CafI: Concentración de los parámetros DBO5 y SST del agua potable consumida por los habitantes de la ciudad.

Cmax: Los estándares calidad máximos permitidos por la autoridad ambiental. En este caso parámetros objetivo de calidad para el río Bogotá[13].

Cnat: Concentración natural del río Bogotá en los parámetros DBO5 y SST.

El resultado de la ecuación se expresa en Volumen/Tiempo.

2.2. Sector industrial

La huella hídrica del sector industrial según el (CTA, GSI-LAC, COSUDE, & IDEAM [14] cuantifica el volumen de agua que ingresa a un proceso industrial y que finalmente queda contenido en el producto junto con los vertimientos resultantes de la fabricación del mismo por eso el sector evalúa los aportes agua azul y gris en su huella.

2.2.1. Huella hídrica azul del sector industrial.

La huella hídrica azul fue cuantificada empleando el volumen de agua destinada a las actividades productivas de la ciudad este es diferenciado en función al tipo fuente de abastecimiento del cual provenga. En el caso de las fuentes superficiales se tuvo en cuenta el volumen facturado por la EAB y los acueductos privados además del agua en bloque distribuida durante el periodo evaluado y el consumo en distritos de riego, mientras que en cuanto a las fuentes subterráneas se contabilizó el agua procedente de las concesiones de pozos otorgadas por la SDA y por la CAR. La información consolidada se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 1. Volumen de agua consumida en Bogotá – 2014.

Tipo de fuente hídrica de abastecimiento	Descripción	Consumo (m3/año)
Superficial	Acueducto – EAB	13 492 699.80
	Acueductos, agua lluvia.	9 623 306.42
	Agua en bloque	31 170.00
	Distritos de Riego	87 047.00
Subterránea	Pozos – SDA	4 220 367.20
	Pozos – CAR	250 080.48

La información mencionada se aplicó a la resolución de la siguiente ecuación,

$$WF_{Azul} = Afluyente - Efluente \quad (6)$$

Dónde:

Afluente: Volumen de agua destinada a las actividades industriales, la cual se corresponde al suministro proveniente tanto de fuentes superficiales como subterráneas presentadas en la tabla 1.

Efluente: Volumen de agua descargada posteriormente a su utilización. Debido a la hidrografía de la ciudad donde las cuencas abastecedoras y de recepción de vertimientos no son las mismas es posible asumir que el efluente de la cuenca es cero.

2.2.2. Huella hídrica gris del sector industrial.

La huella hídrica gris perteneciente al sector industrial se calculó mediante la ecuación 7 que corresponde al cálculo estandarizado por Hoekstra [4] en el cual se evalúa la capacidad de asimilación de la cuenca frente a la carga contaminante aportada.

$$[WF]_{(Gris)} = L / (C_{max} - C_{nat}) \quad (7)$$

Dónde:

L: Carga contaminante aportada por el sector industrial.

C_{max}: Concentración máxima permitida con base en los objetivos de calidad del agua para la cuenca del río Bogotá a lograr en el año 2020, expedidos por la CAR [13].

C_{nat}: Parámetros fisicoquímicos del recurso hídrico en caso de no existir perturbaciones humanas en la cuenca. En caso de no contar con los parámetros naturales, pero se cree que son bajos es posible asumir este valor como cero.

Se emplearon los datos asociados a la carga contaminante reportados por el sector industrial a la SDA mediante el Registro Único Ambiental – RUA donde se registraron las características de las aguas residuales de tipo industrial de 1 122 establecimientos de los 8 991 que generan vertimientos en la ciudad de Bogotá [15], de estas fue seleccionada una muestra de 96 empresas que contaban con datos de los parámetros de DBO5 y SST con el fin de estandarizar los parámetros utilizados en la estimación de la huella. Posteriormente la muestra se extrapolo para el 100% de las industrias generadoras de vertimientos en el distrito capital.

Una vez realizada la estimación con cada uno de los parámetros seleccionados se tomó el resultado de mayor magnitud como huella hídrica gris para el sector.

La Huella Hídrica total del sector consiste en la sumatoria de las huellas azul y gris del mismo como se muestra en la siguiente ecuación.

$$[WF]_{Ind} = [WF]_{Azul} + [WF]_{(Gris)} \quad (8)$$

2.3. Sector alimentos

El consumo de recurso hídrico del sector de alimentos se cuantifica mediante la Huella Hídrica indirecta de los productos consumidos en el área de estudio según la ecuación 9. Para esto, se tienen en cuenta diversos grupos de alimentos junto a su equivalencia hídrica la cual fue determinada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura - FAO.

$$[WF]_{alimentos} = \sum_p [(Cp * [EqH]_{prod})] \quad (9)$$

Dónde:

Cp: Cantidad de productos consumidos.

[EqH]_{prod}: Huella Hídrica equivalente del producto.

La huella hídrica del sector de alimentos se obtuvo a partir de la información de consumo de productos agrícolas, de origen animal y algunos productos procesados en la ciudad. Los datos reportados por el DANE [16] corresponden a la central de abastos Corabastos, la cual suple el 30% de la demanda alimenticia de la ciudad de Bogotá, esto con base en las estimaciones del DANE [16].

La muestra de alimentos empleada para realizar el cálculo de la huella hídrica fue seleccionada a partir del seguimiento realizado por parte del DANE [16] a 144 productos de la central de abastos Corabastos los cuales equivalen a 1 759 035 Toneladas, esta muestra fue seleccionada teniendo como criterio su existencia en la base de datos de equivalentes hídricos de la Water Footprint Network – WFN[17] por lo cual en el cálculo fueron incluidos 126 tipos de productos que corresponden 1 749 019 Toneladas en el año 2014 que a su vez representan el 99.43% del total de datos aportados por el DANE (Tabla 2).

La equivalencia hídrica establecida por FAO en los estudios realizados por Hoekstra & Mekonnen[17] [18] mediante la metodología desarrollada por los mismos, esta se ejecutó empleando el modelo CROPWAT 8.0 para calcular las necesidades hídricas de los cultivos y las necesidades de riego con base en datos del suelo, clima y tipo de cosecha [17]. La Huella Hídrica Gris de la producción agrícola y sus derivados, se basa en un indicador del volumen de la contaminación de agua dulce, que es estimada con base en la cuantificación del volumen de agua necesario para asimilar los nutrientes que alcanzan fuentes de hídricas superficiales o subterráneas [17].

Tabla 2. Distribución de alimentos en Corabastos – 2014.

TIPO DE PRODUCTO	CANTIDAD TOTAL (Ton)	PARTICIPACIÓN %	CANTIDAD MUESTRA (Ton)	PARTICIPACIÓN MUESTRA %
Verduras y hortalizas	652 586.00	37.10	652 586.00	37.10
Tubérculos, raíces y plátanos	512 129.00	29.11	512 129.00	29.11
Frutas	452 568.00	25.73	452 568.00	25.73
Granos y cereales	76 493.00	4.35	76 493.00	4.35
Procesados	60 273.00	3.43	51 984.00	2.96
Lácteos y huevos	1 972.00	0.11	1 972.00	0.11
Carnes	1 431.00	0.08	1 287.00	0.07
Pescados	1 583.00	0.09	-	-

Fuente: Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE.

2.4. Disposición de residuos sólidos

La descomposición de residuos sólidos en el Relleno Sanitario Doña Juana produce lixiviados diariamente. Este volumen es tratado en la Planta de Tratamiento de Lixiviados generando una Huella Hídrica Gris, la cual se calculó de la siguiente manera:

$$[WPPTL]_{(Gris)} = L / (C_{max} - C_{nat}) \quad (10)$$

Dónde:

L: Concentraciones mensuales de grasa y aceites, DBO5 y fenoles de los lixiviados tratados, el caudal y el volumen tratado mensualmente, reportado por la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos – UAESP[19].

C_{max} : Concentración máxima permitida por la autoridad ambiental para los parámetros de calidad evaluados [13]

C_{nat} : Concentración Natural del río Tunjuelo.

2.5. Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica

2.5.1. Análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica azul.

La Huella Hídrica de la ciudad se evalúa con base en la disponibilidad de agua azul mensual o agua disponible real utilizada para uso y consumo dentro de la misma, mediante la comparación de ambas. Lo anterior se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$[Sostenibilidad \text{ de la Huella Hídrica }]_{Azul} = \left(\sum [Huella \text{ Hídrica } Azul] \right) / (Disponibilidad \text{ Natural}) \quad (11)$$

Según los resultados obtenidos es posible realizar la evaluación del impacto ambiental de la Huella Hídrica sobre la ciudad teniendo en cuenta los siguientes rangos:

Tabla 3. Rangos de evaluación del impacto de la huella hídrica azul

Rangos	Interpretación
Mayor a 1	Bajo
Mayor a 1.5	Moderado
Mayor a 2	Alto
Mayor a 4	Muy Alto

Fuente: [13].

****** Si la división es menor a 1, entonces se puede concluir que el impacto ambiental en cuanto al consumo de agua no existe o no es significativo.

2.5.2. Análisis de la sostenibilidad de la huella hídrica gris.

La sostenibilidad de la Huella Hídrica Gris, se cuantifica con el volumen de agua natural y la Huella Hídrica Gris total de la ciudad; este valor se denomina índice de contaminación hídrica.

$$\text{Índice de Contaminación Hídrica} = (Huella \text{ Gris Total}) / (Disponibilidad \text{ real de Agua}) * 100 \quad (12)$$

Para la evaluación del impacto de la Huella Hídrica Azul y Gris se tomó como referencia el Suministro Confiable Continuo (SCC) de agua que corresponde a 17.04 m3/s reportados por la EAB [12].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Sector Doméstico

3.1.1. Huella hídrica azul del sector doméstico.

La Huella Hídrica Azul del sector doméstico estimada

para las etapas de potabilización, distribución y consumo de agua corresponde a 488.81 millones de m³ para el año 2014, la cual está distribuida entre Huella interna y externa de la siguiente manera.

Tabla 4. Huella hídrica azul sector doméstico Bogotá D.C. 2014.

Tipo de fuente hídrica de abastecimiento	Descripción	Medio de Abastecimiento	Huella Externa (m ³ /año)	Huella Interna (m ³ /año)	Fuente de Información
Superficial	Volumen Facturado	EAB	262 764 404.00		EAB
	Volumen no Facturado	EAB	160 220 000.00		
	Agua en Bloque	EAB	29 280 000.00		
	Consumo para Potabilización	EAB	15 147 507.00		
Subterránea	Pozos	Concesión SDA		400 809.00	SDA
	Pozos	Concesión CAR		20 999 759.33	CAR
SUBTOTAL			467 411 911.00	21 400 568.33	
TOTAL				488 812 479.33	

Fuente: Autores.

El 55 % de la Huella Hídrica Azul del sector doméstico corresponde a 262.76 millones de m³ de agua al año, los cuales son transportados a los usuarios a través del sistema de acueducto quienes facturan por el servicio, sin embargo, en este proceso se generan pérdidas tanto técnicas como comerciales, que pueden ser por fallas en

las líneas de conducción y distribución, en los tanques de almacenamiento o producto de acometidas ilegales. Estas pérdidas contabilizadas como Volumen No Facturado alcanzan los 160 220 millones de m³ al año (tabla 4), y representan cerca del 33% de la Huella Hídrica Azul del sector (Figura 1).

Tabla 5. Volumen de vertimientos y concentración Bogotá D.C., 2014.

Huella Hídrica (HH)	Volumen (m ³)	Carga Contaminante SST (Ton/año)	Carga Contaminante DBO (Ton/año)	Huella Hídrica Gris año	
				SST (m ³)	DBO5 (m ³)
HH Sin Tratamiento	293 420 927.65	66 152.81	62 315.90	1 653 820 497.87	1 246 318 187.13
HH Tratamiento PTAR Salitre	124 341 670.00	23 357.93	14 208.07	583 948 190.53	284 161 539.86
Total	417 762 597.65			2 237 768 688.39	1 530 479 726.99

Fuente: Autores.

3.1.2. Huella hídrica gris del sector doméstico.

La Huella Hídrica Gris de sector doméstico corresponde al resultado de la máxima entre las dos huellas evaluadas (tabla 5), siendo este valor el de SST.

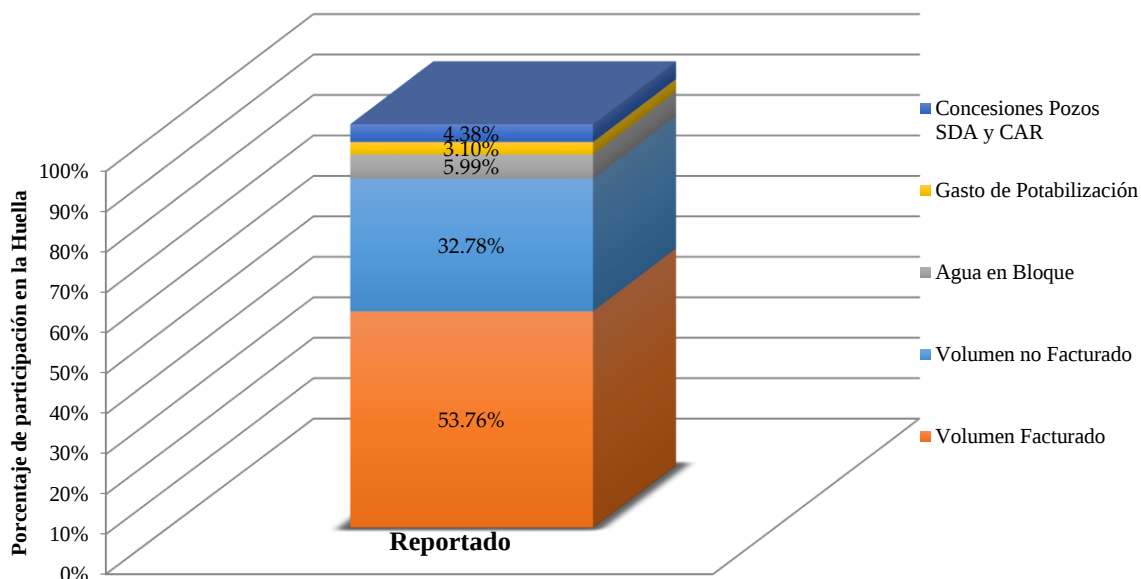
La Huella Hídrica Gris del sector se valoró en 2 237.76 millones de m³, equivalente a la cantidad de SST presentes en los ríos Tunjuelo, Salitre, Fucha y Torca. Por los vertimientos de uso doméstico que son transportados al río Bogotá cada usuario del servicio de alcantarillado debe pagar la tasa retributiva equivalente según su estrato.

3.1.3. Huella hídrica total del sector doméstico.

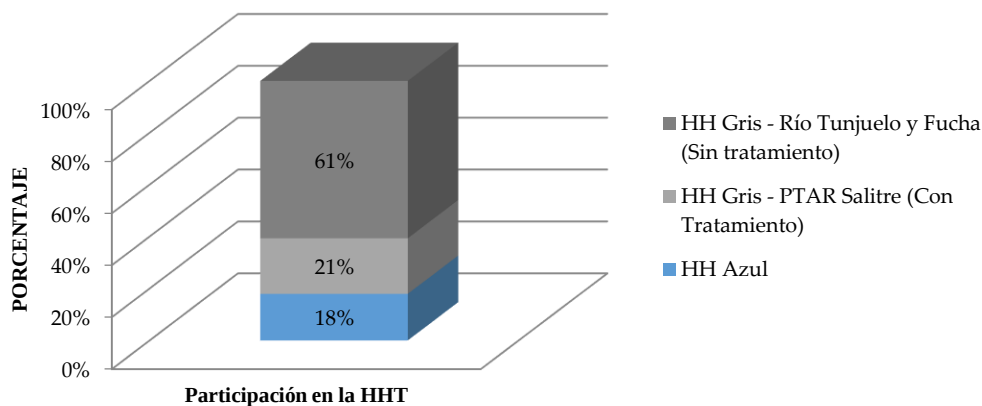
La Huella Hídrica total del sector doméstico de la ciudad en el año 2014 fue estimada en 2 726.58 millones de m³, de los cuales el 82 % pertenece a Huella Gris y 18% a

Huella Azul (Figura 2). Esta diferencia se debe a la carga contaminante presente en los vertimientos, pues se necesitaría mayor cantidad de agua para devolverlos a los parámetros de calidad iniciales.

Se evidenció que la carga contaminante aportada por los vertimientos los ríos Tunjuelo y Fucha que serán tributados al río Bogotá son de mayor magnitud que los del río Salitre, lo que está directamente relacionado con la presencia de la PTAR que logra remover una parte de la carga. Esto altera significativamente el volumen de la Huella de la ciudad.

Figura 1. Porcentaje de participación en la HH Azul del sector doméstico de Bogotá – 2014


Fuente: Autores.

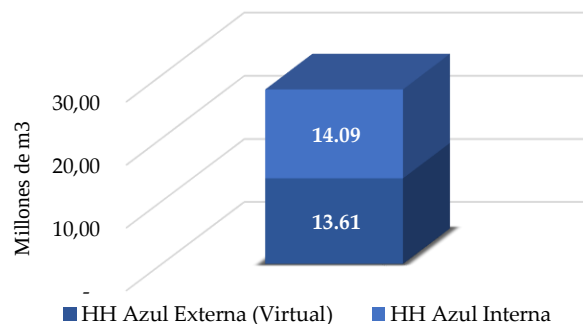
Figura 2. Porcentaje de participación en la huella hídrica total del sector doméstico de Bogotá – 2014.


Fuente: Autores.

3.2. Sector Industrial

La huella hídrica azul correspondiente al sector industrial es de 27.70 (Figura 3) millones de m³/año de los cuales el 49.13% corresponde a agua virtual y el restante 50.87% se debe a volúmenes de agua captada de las fuentes internas de la ciudad, las cuales también son utilizadas y pertenecen a municipios adyacentes como consecuencia a las formaciones hidrogeológicas de la región.

De otra parte, el aporte de agua gris del sector industrial es de 873.73 millones de m³/año del cual el 12.48% corresponde al sector industrial controlado por la SDA y el 87.52% es aportado por industrias que no cuentan con registro de vertimientos, como se aprecia la siguiente tabla.

Figura 3. Huella azul interna y externa del sector industrial de Bogotá y controlado por la SDA – 2014.**Fuente:** Autores.**Tabla 6.** Huella hídrica gris sector industrial de Bogotá.

INDUSTRIAS				DBO (5 días)	SST	HUELLA HÍDRICA TOTAL (m³/año)
TIPO	Nº	MUESTRA	%			
CON REGISTRO	1122	96	1.07	9 329 185.23	3 989 917.96	873 736 504.35
SIN REGISTRO	7869					
TOTAL	8991		100	873 736 504.35	373 680 754.05	

Fuente: Autores.

Como fue mencionado anteriormente el sector industrial consumió 27.70 millones de m³/año, que corresponden a agua azul, los cuales posteriormente se transformaron en vertimientos que requieren volúmenes de agua mayores para lograr la dilución de la carga contaminante para así regresar el agua empleada a los parámetros de calidad fijados por la legislación[13], se debe tener en cuenta que el parámetro que representa la Huella Hídrica es la DBO (5). Teniendo en cuenta lo anterior se realizó el cálculo de la huella total del sector la cual equivale a 901.44 millones de m³/año.

3.3. Sector alimentos

La huella Hídrica de la muestra seleccionada para el sector de alimentos es de 1 358.76 millones de m³/ton/año las cuales corresponden al 99.43% de los alimentos suministrados por la central de abastos, por tanto, la huella del total de los alimentos provenientes de Corabastos en Bogotá es de 1 366 millones de m³/ton/año. Teniendo en cuenta lo anterior y el porcentaje de abastecimiento reportado por el DANE [16] de la central de abastos que se encuentra alrededor del 30% de la demanda de los habitantes de la ciudad se realizó una extrapolación con el fin de determinar la

huella hídrica total del sector para el año 2014 la cual equivale 4 555 millones de m³/ton/año.

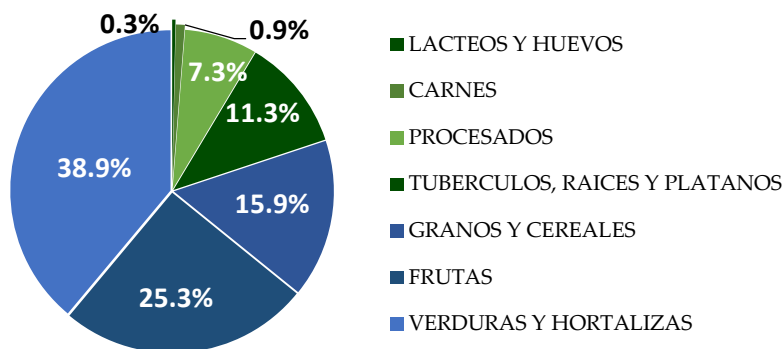
La huella hídrica del sector de alimentos de Bogotá en el año 2014 se compone en un 38.9% por aportes del grupo de verduras y hortalizas seguido por el grupo de las frutas con un 25.3% ya que la cantidad suministrada de productos pertenecientes a estos grupos de alimentos por parte de la central de abastos es significativamente mayor a la cantidad productos de origen animal como carnes, huevos y lácteos.

La Huella Hídrica Total para el sector de alimentos de la ciudad de Bogotá en el año 2014 está constituida en mayor proporción por agua verde, la cual aporta el 82% del volumen empleado en el sector, donde la mayor parte es debida a incorporación de agua natural a los cultivos o consumo de forma indirecta debido a la demanda nutricional de los animales, a esto se encuentra ligada la proporción de agua azul empleada en el sector, la cual corresponde el 7% de total de la huella, la relación se debe al utilización riego como actividad complementaria en la producción de los alimentos consumidos por los habitantes de la ciudad y en los usados como insumos para la producción de alimentos de origen animal además

del agua empleada en el ciclo productivo de los alimentos procesados. Finalmente, la Huella Gris aporta un 11% a la Huella del Sector, esta se encuentra repartida en contribuciones del sector agrícola por parte de los fertilizantes, plaguicidas y defoliantes empleados y del

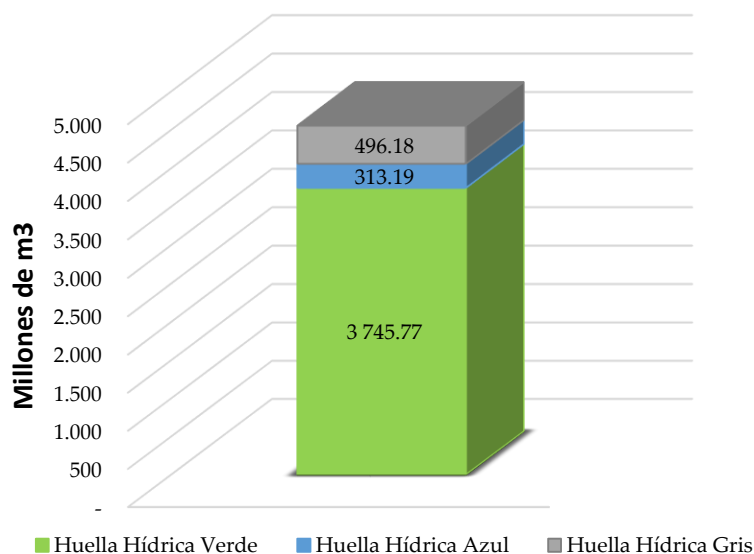
sector pecuario debidas a los desechos generados por el ganado productor (Figura 5).

Figura 4. Aporte a la huella hídrica por grupo de alimentos – 2014.



Fuente: Autores.

Figura 5. Huella hídrica sector de alimentos – 2014.



Fuente: Autores.

Teniendo en cuenta que la huella correspondiente a este sector se basa en un enfoque de consumo es posible afirmar que la huella hídrica con relación a los habitantes de la ciudad de Bogotá es aproximadamente de 1 642 l/habitante/día, teniendo en cuenta la encuesta multipropósito realizada por la Secretaría Distrital de Planeación [20] donde la población estimada para el año 2014 es de 7 794 463 habitantes.

3.4. Disposición de residuos sólidos

Durante el año 2014, en el relleno sanitario de Doña Juana fueron dispuestos un total de 2 355 823.00 toneladas de residuos sólidos y se generaron 161.31 millones de m3 de lixiviados. La planta de tratamiento de Lixiviados Doña Juana trató caudales promedio mensuales entre 9.48 y 23.01 l/s. [19] La Huella Hídrica de mayor relevancia fue la presentada por grasas y

aceites, la cual se estimó en 1306.42 millones de m3 al año.

3.5. Análisis de sostenibilidad de la huella hídrica azul y gris

Según lo propuesto por Hoekstra se puede concluir que el impacto ambiental en cuanto al consumo de agua azul es moderado. En cuanto al impacto de la huella hídrica gris se puede considerar que se necesita 9 veces la

cantidad de agua de abastecimiento para asimilar la carga de contaminantes dados las concentraciones naturales y estándares ambientales de calidad de agua.

Tabla 8. Análisis de Sostenibilidad de la Huella hídrica

Sostenibilidad de la Huella Azul	1.54
Índice de contaminación hídrica	9.14

Fuente: Autores.

Tabla 7. Huella hídrica gris sector de disposición de residuos sólidos.

Mes	Q tratado m3/seg	Concentración del vertimiento			Huella Hídrica Gris		
		DBO5 (g/m3)	Grasas y Aceites (g/m3)	Fenoles (g/m3)	DBO (m3/seg)	Grasa y Aceites (m3/seg)	Fenoles (m3/seg)
Ene	0.38	44.45	2.10	0.03	0.17	0.40	0.06
Feb	0.36	37.98	2.13	0.02	0.14	0.38	0.04
Mar	0.40	26.45	4.58	0.06	0.11	0.92	0.12
Abr	0.39	25.00	6.38	0.06	0.10	1.25	0.12
May	0.24	43.83	5.23	0.04	0.11	0.63	0.05
Jun	0.39	469.50	11.78	0.17	1.82	2.29	0.32
Jul	0.67	1 313.00	42.82	0.27	8.80	14.35	0.89
Ago	0.61	949.00	25.98	0.88	5.77	7.89	2.66
Sep	0.48	677.00	14.50	0.35	3.26	3.49	0.84
Oct	0.48	1 023.00	17.50	0.68	4.94	4.22	1.65
Nov	0.35	1 143.00	6.20	0.15	3.95	1.07	0.26
Dic	0.36	1 211.00	24.90	0.07	4.40	4.53	0.13
Total HH (m3/seg)					33.56	41.43	7.14
Total HH (m3/año)					1 058 295 829.80	1 306 422 813.16	225 026 927.95

Fuente: UAESP, 2015 Cálculos: Autores.

3.6. Huella hídrica total

La huella hídrica de la ciudad de Bogotá de los sectores doméstico, industrial, alimentario y de residuos sólidos en el año 2014 correspondió a 9 489 587 694.93 m3 de los cuales el sector que más aporta es el agrícola, seguido por el doméstico, residuos sólidos y el sector industrial.

La huella hídrica para la ciudad de Bogotá está compuesta en mayor proporción por aportes de agua gris con el 51.78% de los mismos, estos son generados

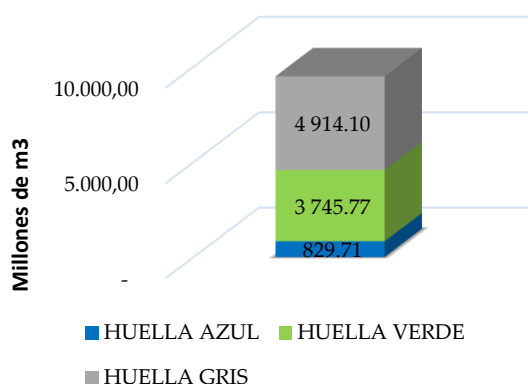
principalmente por el sector doméstico, seguidos por el volumen de agua requerido en la disposición de Residuos sólidos y el sector industrial, mientras que el volumen de agua verde, 39.47 % de la huella hídrica, es debido en gran parte a las actividades relacionadas con el sector alimentario que a su vez es el que más contribuye a la huella total de la ciudad. El componente con menor volumen dentro de la huella hídrica corresponde al agua captada de fuentes hídricas superficiales destinada al cubrimiento de la demanda de los diferentes sectores de la ciudad, que aporta el 8.75% restante. (Figura 6).

Tabla 9. Huella Hídrica Multisectorial de Bogotá. Año 2014.

Sector	Huella Azul m3	% del total	Huella Gris m3	% del total	Huella Verde m3	% del total	Huella Total millones de m3	% del total
Agrícola	313.19	3.30%	496.18	5.23%	3 745.77	39.47%	4 555.14	48.00%
Doméstico	488.81	5.15%	2 237.77	23.58%	0.00	0.00%	2 726.58	28.73%
Industrial	27.70	0.29%	873.74	9.21%	0.00	0.00%	901.44	9.50%
RSDJ	0.00	0.00%	1 306.42	13.77%	0.00	0.00%	1 306.42	13.77%
Todos los sectores	829.71	8.74%	4 914.10	51.78%	3 745.77	39.47%	9 489.59	100.00%

Fuente: Autores.

Los resultados muestran la gran importancia que reviste el tratamiento de las aguas residuales y de los vertimientos de lixiviados para reducir la huella hídrica gris y por esta vía la huella hídrica total de la ciudad.

Figura 6. Huella hídrica total para la ciudad de Bogotá, D.C.

Fuente: Autores.

La huella per cápita en la ciudad es de 1 217.48 m3/año teniendo como referencia la encuesta multipropósito realizada por la Secretaría Distrital de Planeación [20] para el año 2014, donde la población de la ciudad es de 77944630 habitantes.

Para realizar una comparación adecuada con los resultados obtenidos en otras áreas geográficamente definidas es necesario incluir la totalidad de los sectores involucrados, sin embargo cabe mencionar que la huella de países latinoamericanos como Brasil y México se encuentra alrededor de 1 381.32 y 1 357.31m3/año por habitante para el año 2014 según CONAGUA[10], lo cual ubica a Colombia con base en el comportamiento Bogotá como ciudad principal, en una posición cercana a estos países.

4. CONCLUSIONES

La aproximación a la estimación de la Huella Hídrica de Bogotá permitió examinar de manera general el manejo, la gestión pública del agua en la ciudad y el uso del recurso para desarrollar actividades económicas, productivas y de servicios en diferentes sectores de la ciudad.

Se evidenció la falta de información asociada al uso del recurso hídrico en la ciudad por parte de las entidades responsables de su administración, como el caso de la SDA que solo tiene conocimiento de la cantidad de agua que consumen y los vertimientos que 1 122 establecimientos de los 8 991 presentes en la ciudad; y la EAB que tiene pérdidas de agua de 160.22 millones de m3 por fallas en el sistema de distribución, acometidas ilegales y fraudes en los medidores, los cuales no se sabe en qué lugar se encuentran. Así mismo, la Huella Hídrica per cápita de la ciudad es bastante alta comparada con ciudades de similar población, a pesar las cuantiosas sumas de dinero que invierte la SDA y la EAB para la gestión del recurso.

De igual manera, la estimación de la cantidad de recurso hídrico consumido en la ciudad permitió comparar los patrones de uso del agua entre sectores, lo cual reveló que la mayor cantidad de recurso aprovechado está compuesto por el consumo de alimentos con un 48% del total de la huella, los cuales provienen en su mayoría de otras regiones del país; que este consumo, sumado a otros productos generan residuos sólidos y a su vez lixiviados cuando son dispuestos en el relleno sanitario Doña Juana, los cuales representan el 13.77 % del total de la huella. Es decir, que sólo el consumo productos y la generación de residuos sumados constituyen el 61.77 % de la Huella Hídrica.

Por tipo de Huella se pudo distinguir que la Huella Hídrica Gris hace el mayor aporte, con un 51.78 % del total, y un índice de contaminación de 9.14, lo que revela que en todos los sectores de la ciudad se contamina diariamente el recurso, y se necesitaría nueve veces la cantidad de agua de abastecimiento para llevarla a las condiciones establecidas por la legislación vigente. Igualmente, se refleja la baja responsabilidad ambiental de las industrias para el tratamiento de sus vertimientos, ya que solo algunas industrias poseen planta para este fin del total en la ciudad, sumado a incapacidad de las plantas para tratar el caudal total de vertimientos generados en la ciudad.

Así mismo, se puede considerar que aunque en el análisis de la huella hídrica azul se encontró un impacto moderado, la ciudad de Bogotá es altamente dependiente del agua de otras regiones, puesto que en su mayoría, los alimentos consumidos no se producen dentro de la ciudad y el agua para consumo proviene de otra cuenca pues las fuentes de agua pertenecientes al Distrito no suplen la demanda de los diferentes sectores, lo cual indica la vulnerabilidad que presenta la ciudad con relación al abastecimiento de agua ya que este se realiza a partir de fuentes externas haciendo a Bogotá insostenible frente al recurso.

Lo anterior abre el panorama frente al futuro del recurso hídrico de la ciudad, pues si se considera la dependencia del agua frente a otras regiones, el aumento de la población y sus patrones de consumo, y que no se le da un tratamiento adecuado a los vertimientos generados, Bogotá se enfrentaría a la posibilidad de escasez del agua, al riesgo de desabastecimiento de alimentos y agua para el consumo en general a su vez de poner en riesgo la producción industrial; como a la responsabilidad por la deuda de agua no cuantificada ni valorada con otras regiones, bien sea por la importación de agua, como por la contaminación que estas fuentes.

Por último, los resultados presentados en este artículo pretenden servir como herramienta de análisis y discusión en todos los niveles políticos, mostrar una visión general del uso del recurso en la ciudad, e indicar los sectores en los que se genera mayor huella para que se tengan en cuenta en la priorización de medidas de manejo y se contribuya a disminuir la Huella Hídrica de la ciudad. De igual manera, se reitera la falta de información y la dificultad en el acceso concerniente al manejo del agua que limita considerablemente los estudios y genera incertidumbre en su elaboración. Para posteriores análisis se recomienda que se consideren

otros sectores y niveles adicionales como la huella indirecta que se genera en la fabricación de diversos productos que se consumen en Bogotá, lo que conlleve a tener un inventario de cada una de las actividades que generan algún impacto ambiental.

5. REFERENCIAS

- [1] J. M. García Fernández y L. Cantero Corrales, «Indicadores globales para la evaluación del uso sostenible del recurso agua: Caso cubano», *Volunt. Hidráulica*, vol. 99, pp. 1-16, 2007.
- [2] Arévalo D, «Una mirada a la agricultura de Colombia desde su Huella Hídrica», *Wwf*, p. 67, 2012.
- [3] Waterfootprint, «Manual de Evaluacion HH», 2002.
- [4] M. M. Mekonnen y A. Y. Hoekstra, «The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop products», *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 15, n.º 5, pp. 1577-1600, 2011.
- [5] S. G. Isidro, F. J. Gutiérrez Lozano, y C. M. Torres, «Vulnerabilidad, amenaza y peligro a la contaminación de las aguas subterráneas en la región de Bucaramanga.», *Rev. UIS Ing.*, vol. 10, n.º 1, pp. 51-62, 2011.
- [6] C. Blanco-Mayorga; L. Donado; D.A. Barajas, «Estudio del comportamiento de solutos reactivos en acuíferos confinados bajo diferentes condiciones de cinética química», *Rev. UIS Ing.*, vol. 8, n.º 1, pp. 77-90, 2009.
- [7] J. F. Schyns y A. Y. Hoekstra, «The added value of Water Footprint Assessment for national water policy: A case study for Morocco», *PLoS One*, vol. 9, n.º 6, pp. 1-25, 2014.
- [8] WWF, «L’empreinte eau de La France», 2012.
- [9] Conagua, «Estadísticas del agua en México», 2011.
- [10] «Huella hídrica en países seleccionados.», 2014. [En línea]. Disponible en: http://201.116.60.25/sina/index_jquery-mobile2.html?tema=huellaHidrica.
- [11] Ministerio De Desarrollo Económico, «Dirección de agua potable y saneamiento básico.» REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BASICO “.» p. 2000, 2000.
- [12] Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá - EAB. Obtenido de En respuesta a requerimiento de

contraloría de Bogotá mediante oficio EAB E-2015042744. 2015. 2015.

[13]C. A. R. de Cundinamarca, *ACUERDO NUMERO 043 DE 2006 de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, CAR*. Colombia, 2006.

[14]«Evaluación multisectorial de la huella hídrica en Colombia», 2015.

[15]«Entrevista en respuesta a solicitud de la Contraloría de Bogotá.», 2015.

[16]DANE, «Obtenido de Respuesta a Solicitud de la Contraloría de Bogotá. 2015». 2015.

[17] a Y. M.M. Meconnen, Hoekstra, «The green, blue and grey water footprint of farm animals and animal products», *Unesco*, vol. 1, n.º 16, p. 80, 2010.

[18]A. Y. Hoekstra, A. K. Chapagain, M. M. Aldaya, y M. M. Mekonnen, *The Water Footprint Assessment Manual*. 2011.

[19]«Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos – UAESP, En respuesta a requerimiento de contraloría de Bogotá mediante oficio UAESP 20154010063781. 2015». p. 2015, 2015.

[20]«Secretaría Distrital de Planeación - SDP. “Encuesta multipropósito 2014” 2015.» p. 2015, 2015.