

Hacia equipamientos urbanos sostenibles: aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana en Bogotá*

Fecha de recepción: 4 de agosto del 2011. Fecha de aceptación: 4 de octubre del 2012

Andrés Torres	
Ingeniero civil, MSc, PhD.	Profesor asociado
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia	andres.torres@javeriana.edu.co
Sandra Méndez-Fajardo	
Ingeniera civil, MSc.	Profesora asistente
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia	sandra.mendez@javeriana.edu.co
Jaime A. Lara-Borrero	
Ingeniero civil, MSc, PhD.	Profesor asociado
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia	laraj@javeriana.edu.co
Jorge Luis Estupiñán Perdomo	
Ingeniero civil, MSc.	jorgeluest@hotmail.com
Héctor Ovidio Zapata García	
Ingeniero civil, MSc.	hozapata@gmail.com
Óscar Mauricio Torres Murillo	
Ingeniero civil	otorres_86@hotmail.com

Resumen Este artículo es el resultado del proyecto de investigación *Aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá (PUJB): caracterización y posibles usos*, y tiene como objetivo identificar los posibles usos de las aguas lluvias de escorrentía para su eventual aprovechamiento como fuente de agua alternativa dentro del campus de la PUJB. Para ello se determinan, por un lado, los escenarios de oferta-demanda del recurso hídrico en el campus y, por el otro, las concentraciones de algunos contaminantes físico-químicos y bacteriológicos presentes en el agua, su variabilidad temporal y las incertidumbres asociadas, comparándolos con los niveles máximos admitidos para los diferentes usos. Adicionalmente, se establecen los requerimientos de infraestructura para el aprovechamiento del agua lluvia de escorrentía para ciertos usos dentro del campus y se puede suplir una demanda máxima del 14% del consumo total.

Palabras clave autor Aprovechamiento de aguas lluvias, balance hídrico, contaminación de aguas lluvias, campus universitario, sostenibilidad ambiental.

Palabras clave descriptor Pontificia Universidad Javeriana, aguas lluvias, escorrentía urbana, utilización del agua, contaminación del agua, ciudades universitarias—aspectos ambientales.

* Producto de la investigación *Aprovechamiento de aguas lluvias en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá (PUJB): caracterización y posibles usos*, ejecutada por el Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente, escalafón B, del Departamento de Ingeniería Civil (PUJB), en la línea Gestión Integral del Recurso Hídrico; financiada por la Vicerrectoría Académica de la PUJB, entre 2007 y 2011, bajo el código 003127. Trabajo de grado: *Requerimientos de infraestructura para el aprovechamiento sostenible del agua lluvia en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá* de la Maestría en Ingeniería Civil, PUJ, 2011; *Identificación de los posibles usos del agua lluvia de escorrentía en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá)*, carrera de Ingeniería Civil, PUJ, 2011. Por sus aportes de información y recursos, se agradece a la Dirección de Recursos Físicos de la PUJB, a la Empresa F.F. Soluciones S. A., al Laboratorio de Pruebas y ensayos del Departamento de Ingeniería Civil y al Centro de Servicios de la Facultad de Ciencias de la PUJB.

Toward Sustainable Urban Equipment:

Utilization of Rainwater on the Campus of the Pontificia Javeriana University in Bogota

Abstract This article is the result of the research *Use of Rainwater at the Javeriana University Campus in Bogota (PUJB): Characterization and Possible Uses*, and has the objective of identify possible uses of rainwater as an alternative source on the PUJB campus. To achieve this objective, physicochemical and bacterial pollutant concentrations, their temporal variability and associated uncertainties were determined. The maximum allowed levels of pollutant concentrations were determined and the infrastructural requirements for the use of rainwater for certain uses at the PUJB campus were established. Results indicate that maximum 14% percent of the overall demand will can be covered with the collected rainwater.

Key words Rainwater harvesting, water balance, rainwater pollution, university Campus, environmental sustainability.

Key words plus Pontificia Universidad Javeriana, rain-water (water supply), urban runoff, water use, water – pollution, university towns - environmental aspects.

Equipamento urbano sustentável:

utilização de águas pluviais no campus da Pontifícia Universidade Javeriana de Bogotá

Resumo Este artigo é o resultado do projeto de pesquisa *Aproveitamento da água pluvial no campus da Pontificia Universidad Javeriana sede Bogotá (PUJB): caracterização e possíveis aplicações*, e tem como objetivo identificar as possíveis aplicações das águas pluviais de escoamento superficial para seu eventual aproveitamento como uma fonte de água alternativa dentro do campus da PUJB, para o qual, são determinadas as concentrações, a sua variabilidade temporaria e as incertezas associadas dos poluentes físico-químicos e bacteriológicos presentes na água pluvial de escoamento superficial dentro do campus da PUJB, determina-se os níveis máximos de concentrações de poluentes permitidos para as diferentes utilizações da água e estabelecer as exigências de infra-estrutura para o aproveitamento da água de chuva de escoamento superficial para certos usos dentro do campus da PUJB, sendo capaz de atender uma demanda máxima do 14% do consumo total.

Palavras-chave Aproveitamento de água pluvial, balanço hídrico, poluição de águas pluviais, campus universitário, sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave descritor Pontificia Universidad Javeriana, água de chuva, escoamento urbano, uso de água, poluição da água, universidade cidades-aspectos ambientais.

Introducción

En el mundo, el aprovechamiento del agua lluvia se ha convertido en todo un incentivo de uso eficiente del agua, como elemento fundamental de gestión para conseguir ciudades más sostenibles (Eisen, 1995; Lehman, 2008). De esta forma, el agua lluvia se está utilizando especialmente para descargas de inodoros, orinales y riego de jardines (Hatt, Deletic y Fletcher, 2006; Neila, 2004, p. 89; Ramírez-Fonseca, 2009; Suárez, García y Mosquera, 2006). Países como Estados Unidos, Suecia, China, Japón, Australia, Indonesia, Alemania, España, Francia, Nigeria y Sudáfrica figuran como líderes en prácticas de aprovechamiento de aguas lluvias, mediante concepciones técnicas, científicas, normativas y socioeconómicas, asociadas a procesos de construcción sostenible (Coombes, Argue y Kuczera, 2000, p. 335; Smet y van Wijk, 2002, p. 129). Especial mención merecen algunas ciudades europeas que se han catalogado como *ciudades verdes*, por ejemplo, Bruselas tiene una política de no desperdicio de agua que, entre otras medidas, incluye subsidios para la instalación y reparación de tanques de aguas lluvias; en Roma se ha implementado una normativa nacional que obliga al uso de aguas lluvias y grises en las nuevas edificaciones, y en Zagreb se pretende que el techo del nuevo terminal del aeropuerto sea diseñado de forma que permita recolectar aguas lluvias para su uso posterior (Siemens AG, 2009). Del mismo modo, Brasil, México y Chile guían en Latinoamérica esta práctica para usos no potables en conjuntos residenciales, escuelas, estaciones de servicios, parques, sistemas de riego, paisajismo y zonas duras (Amat y León, 2008; Bates, 2008; Chen, Attwater y Luo, 2008; Ghisi, Montibeller y Schmidt, 2006; Ghisi, Tavares y Rocha, 2009; May, 2004).

Actualmente en Colombia esta práctica se concentra en experiencias tradicionales de captación por medio de canecas, vasijas y pozos artesanales, para utilizar el agua que cae sobre los tejados de las viviendas para usos no potables (Palacio, 2010; Ramírez-Fonseca, 2009; Sánchez, 2003) y aprovechamientos privados en centros comerciales y de servicios, edificios de oficinas y bloques de apartamentos (Palacio, 2010; Ramírez-Fonseca, 2009).

Son pocas las experiencias científicas que existen en Colombia (Lara, et ál., 2007; Palacio, 2010; Suárez et ál., 2006; Torres, et ál., 2010), en las que se analice la calidad del recurso complementarios a los temas como caudales, recolección y almacenamiento. En la Pontificia Universidad Javeriana sede Bogotá, desde el Departamento de Ingeniería Civil, se han liderado una serie de procesos de investigación conducentes a generar un equilibrio integral entre la construcción de infraestructura y el entorno natural, promulgando el aprovechamiento del agua lluvia como alternativa de suministro para diversos usos no potables en el campus institucional, mediante la utilización de sistemas de drenaje de bajo impacto, intentando generar un nuevo concepto de campus sostenible (Lara et ál., 2007).

Por otro lado, este proyecto se hace relevante en los contextos urbanos, en los cuales los campus universitarios forman parte del equipamiento comunitario y, a la vez, son un elemento urbano de circulación pública relevante en el territorio donde se encuentre construido; de modo que las iniciativas ambientales que desde estos escenarios surgen logran un impacto alto, no solo en las dimensiones de recursos naturales, sino en

el fortalecimiento de capital social y ciudadano, aspectos relevantes para el desarrollo integral de las poblaciones.

El grupo de investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente de la Pontificia Universidad Javeriana concibió un proyecto a través del cual buscó analizar la viabilidad económica y técnica del aprovechamiento del agua lluvia como una alternativa para ciertos usos dentro del campus, en función de la cantidad de agua lluvia potencialmente aprovechable dentro del campus universitario, su calidad y posibles usos. Los estudios iniciaron en el 2004 por medio del análisis de disponibilidad del recurso en el campus, generando balances hídricos con el método de masas oferta-demanda, a partir del cual se concluyó que existen volúmenes suficientes de aguas lluvias en el campus universitario para suplir la demanda de ciertos usos (Lara et ál., 2007).

La siguiente fase consistió en analizar la calidad de las aguas de escorrentía en diferentes zonas del campus, incluidas superficies como cubiertas de diferentes edificaciones, pavimentos, andenes y el campo de fútbol con gramilla sintética, con el fin de definir sus posibles usos, para posteriormente determinar los requerimientos de infraestructura para su aprovechamiento. El propósito de este artículo es presentar los resultados del proyecto, en cuanto a la calidad de agua lluvia disponible y aprovechable, para facilitar la selección de alternativas de aprovechamiento como ejemplo de gestión del agua en un campus universitario sostenible como equipamiento comunitario urbano.

Este proyecto, si bien tendrá un impacto directo en el ámbito privado de la universidad, se pretende que tenga un impacto mayor local y regional, a través 1) de la formación de investigadores en este tema y 2) de la creación de masa crítica mediante la divulgación de la conceptualización de la investigación y sus resultados, especialmente dirigida a los profesionales de la arquitectura y la

ingeniería relacionados con construcción sostenible y sostenibilidad urbana.

Descripción del campo de trabajo

El campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá (PUJB), en el que diariamente circulan cerca de veinte mil personas, cuenta con dieciocho hectáreas de terreno y casi doscientos mil metros cuadrados de construcción (figura 1), donde se asientan cuarenta y seis edificios para usos académicos, administrativos, de parqueaderos y de servicios, capillas, instituciones bancarias y hospitalarias, cafeterías, auditorios, centro de convenciones, y áreas como el campo de fútbol, zonas deportivas, zonas verdes y plazoletas. Algunas de las edificaciones superan los setenta años de construidas (Ciencias Básicas, Hospital San Ignacio, Edificio Central, Biblioteca y alrededores); otras cuentan con aproximadamente cuarenta años (Facultad de Artes, Estudios Musicales, Arquitectura, Medicina y afines), y las más recientes, construidas durante los últimos diez años (campo de fútbol, ingenierías, gimnasio, Psicología, Teología, Edificio Barón, Parqueadero, Edificio Giraldo y Ático).

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) suministra el servicio de agua potable a los 46 edificios que se encuentran dentro del campus principal de la PUJB (no hacen parte el Instituto Geofísico y otros edificios ubicados en diferentes partes de la ciudad), la cual es contabilizada a través de dieciséis micromedidores. La variación de dichos consumos fue analizada y se obtuvo el consumo promedio mensual histórico del campus.

Metodología

La metodología del proyecto se dividió en dos grandes fases: la relacionada con la demanda-oferta hídrica en el campus y la correspondiente a la medición de parámetros de calidad del agua

Figura 1
Imágenes del campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá



de escorrentía, que permitan definir cuáles son los usos para tener en cuenta en una etapa siguiente de diseño e implementación de tratamientos.

Demanda-oferta hídrica en el campus

A fin de evaluar los usos del agua se diligenció una ficha técnica por edificio del campus, de modo que se identificaran los diversos usos que cada unidad académica tenía previsto para el recurso. A cada uso del agua les fueron asignadas tres dotaciones diferentes, de acuerdo con un análisis de escenarios de consumo (mínimo, promedio y máximo), establecidos en diferentes referencias (McCarthy et ál., 2007; Meera y Mansoor Ahammed, 2006).

Adicionalmente, se tuvieron en cuenta las variaciones de la demanda utilizando: a) los caudales admitidos de demanda máxima para las tuberías seleccionadas, b) las demandas de acuerdo con los coeficientes de simultaneidad de los aparatos sanitarios y c) los índices de demanda máxima establecidos en el título B del Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico (RAS 2000). Los consumos se determinaron a través del estudio de la facturación histórica (cuentas contrato 2005-2009) de dieciséis medidores pertenecientes a la EAAB, y que cubren el servicio de agua potable a los 46 edificios que se encuentran dentro del campus, por lo cual fue imposible obtener directamente los valores de consumo de cada edificio. Por otro lado, se analizaron los consumos totales generados en cada escenario, discriminando, a partir del consumo diario, los gastos totales por mes.

Paralelamente, el análisis del escenario promedio determinó la magnitud media de consumo de cada uso del agua en el campus, lo cual se convirtió en la fuente principal para establecer el porcentaje de uso frente al consumo total de agua. La oferta hídrica se evaluó recopilando información de precipitaciones intermensuales de una estación

cercana al campus universitario (estación San Luis). También se analizaron las precipitaciones registradas en dicha estación entre 1936 y 2009. De allí se obtuvieron los promedios mensuales históricos, valores que se multiplicaron por el área total del campus, con lo cual se determinó la oferta promedio mensual de aguas lluvias.

Adicionalmente, se determinaron los coeficientes de escorrentía para las superficies de escorrentía de aguas lluvias y se realizaron diferentes balances hídricos, a fin de examinar los comportamientos de las relaciones oferta-demanda del recurso en el campus universitario. Inicialmente se desarrollaron balances para todo el campus universitario, pero los resultados mostraron la necesidad de dividir el campus en distintas subcuencas potenciales de aprovechamiento, y así distribuir de mejor forma los requerimientos de infraestructura, especialmente de tanques de almacenamiento.

Por otra parte, las demandas para los usos externos se ajustaron de acuerdo con el número de días de no ocurrencia de lluvia (para el riego de zonas verdes) y con los periodos de lavado de fachadas y zonas duras, a través de datos tomados del *Atlas climatológico de Colombia* (Ministerio de Medio Ambiente, 2005) y consultas sobre los periodos regulares de lavado en la universidad, respectivamente. Con este ajuste se redujo la demanda calculada para cada subcuenca y, con ello, el dimensionamiento de los tanques de almacenamiento en las tres subcuencas seleccionadas (campo de fútbol, CJFD-Barón y pasarelas).

Finalmente, se utilizó el *software* WaterCAD (Bentley), con el fin de tener una dimensión de la infraestructura hidráulica, la topología de las redes, los diámetros y materiales óptimos de las tuberías, los accesorios y las válvulas de regulación necesarias, así como los servicios, en cuanto a las presiones dentro de la red y los niveles de agua en los tanques y estructuras de almacenamiento.

Parámetros de calidad del recurso

En esta fase se definieron nueve puntos estratégicos de muestreo de las aguas lluvias de escorrentía, de acuerdo con criterios de cantidad y calidad de agua, así como su ubicación y cercanía a posibles centros de acopio y recolección de aguas lluvias. Los puntos se enumeraron de la siguiente forma (figura 2): 1) sistema de drenaje del campo de fútbol, 2) canal nororiental del campo de fútbol, 3) canal suroriental del campo de fútbol, 4) cubierta del edificio de parqueaderos Don Guillermo Castro, 5) caja de recolección del sótano del edificio de parqueaderos Don Guillermo Castro, 6) cubierta del edificio de la Facultad de Ingeniería José Gabriel Maldonado S. J., 7) cubierta del edificio de aulas Fernando Barón S. J., 8) cubierta del edificio de Talleres de Arquitectura, 9) sumidero del edificio de la Facultad de Psicología Manuel Briceño Jáuregui S. J. Para cada punto de muestreo se analizó la calidad de las aguas de escorrentía correspondientes a dos eventos lluviosos.

Para cada punto de muestreo se planeó llevar a cabo ensayos con el fin de determinar propiedades físicas y organolépticas, al igual que concentración en metales pesados, en constituyentes orgánicos y en constituyentes inorgánicos. Para el punto 9 se midió la contaminación microbio-

lógica, siguiendo los procedimientos indicados en las normas técnicas correspondientes de *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (1998) y la norma ISO 9308-1 (2002) para *Escherichia coli*. Por otro lado, los metales analizados fueron cadmio, mercurio, plata, plomo, cinc, hierro, cobre y níquel; también se midieron elementos como manganeso, sodio, potasio y magnesio. Las mediciones de metales pesados se realizaron en el Laboratorio de Pruebas y ensayos del Departamento de Ingeniería Civil de la PUJB, mediante la prueba de absorción atómica por llama, que generó los hidruros necesarios en el caso del mercurio, según los métodos estándar para la realización de los ensayos.

Con el fin de evaluar el potencial de las aguas de escorrentía muestreadas para ser utilizadas en diferentes usos, se revisaron estándares de calidad y documentos relacionados en los ámbitos nacional (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2007) e internacional (Gilbert et ál., 1982; Pescod, 1992; European Community, 1998 y 2006; Lazarova, Papadopoulos y Bahri, 2004; U. S. Environmental Protection Agency, 2004; MLIT, 2005; World Health Organization, 2006; Asano et ál., 2007). Dichos estándares y documentos proponen una calidad mínima del agua recolectada para diferentes usos teniendo en cuenta parámetros microbiológicos y fisicoquímicos.

Figura 2
Ubicación de puntos de muestreo y del canal de aguas residuales



Fuente: Google Earth, adaptado.

Resultados y discusión

Demanda-oferta e infraestructura

La recopilación de información, en conjunto con el análisis de dotaciones, permitió determinar los consumos de agua para 39 edificios y tres escenarios: mínimo, promedio y máximo, de acuerdo con la gama de usos encontrados en el campus universitario. De esta manera, se logró, por primera vez, la estimación del consumo en cada uno de sus edificios y zonas externas. El consumo de agua varió de 134 L/d para el escenario de consu-

mo mínimo —Edificio 35, Oficina de Vigilancia (frente a biblioteca)— hasta 111,751 L/d para el escenario de consumo máximo —edificios 50, Félix Restrepo; 51, Ángel Valtierra, y 52, Carlos Ortiz S. J.—.

Así mismo, se clasificó el consumo de cada uno de los edificios evaluados, de acuerdo con tres categorías: altos, medios y bajos consumidores. De este análisis se obtuvo que los edificios que demandan mayores volúmenes diarios de agua son: el conjunto de edificios de Ciencias Básicas, la Facultad de Odontología, el edificio de Ingeniería, el bloque de parqueaderos, el Edificio Fernando Barón y el Edificio José Rafael Arboleda: entre 14.971 L/d y 78.051 L/d.

Por el contrario, las oficinas de vigilancia, el edificio Cataluña, los Talleres de Diseño Industrial y la cafetería central se caracterizaron por ser los edificios de menor consumo de agua: 219 L/d a 1978 L/d. Adicionalmente, se pudo determinar —mediante el análisis de consumo— que el lavado de pisos, en conjunto con el riego de jardines externos, la descarga de inodoros, el lavado de zonas duras y los distintos tipos de lavamanos, son los usos que mayor demanda poseen. Así mismo, se pudo analizar que los usos que necesitan esencialmente el agua potable (lavamanos, laboratorios, oficinas, cafeterías, bebida, duchas, jacuzzi y lavado de platos) corresponden tan solo al 20% del total de los usos del campus, valor fundamental para justificar el aprovechamiento de las aguas lluvias para usos no potables.

Por otra parte, los datos de consumos históricos de las cuentas-contrato suministradas por la EAAB sirvieron para contrastar los resultados del análisis de usos del agua en el campus y determinar los consumos reales, los cuales varían mensual y anualmente. Se logró establecer que la demanda mensual promedio en el campus varía de manera sustancial y que se destaca un consumo bimodal. Los periodos de mayor consumo corresponden a

los meses de mayor actividad académica semestral (febrero-mayo y agosto-noviembre), mientras que el consumo se reduce en los periodos intersemestrales (diciembre-enero y junio-julio). El mes de mayor consumo suele ser septiembre, y el de menor gasto, enero. De acuerdo con la información suministrada por la Oficina de Planeación de la PUJB, esto parece justificarse porque la mayoría de los cursos ofrecidos por Educación Continua se realizan en marzo y septiembre. De igual forma, en casi todo enero la Universidad cierra sus puertas, con lo cual el consumo se reduce de modo drástico.

De esta forma, se logró establecer que la PUJB consume en su campus principal aproximadamente 16.650,54 m³ de agua por cada mes, así como 199.806,54 m³ en el año, lo cual equivale a cancelar a la EAAB un valor promedio de \$63.804.880,13 bimensualmente y un total ponderado de \$382.829.280,77 al año. Estos valores se confrontaron con algunas facturas que la Oficina de Administración del Campus suministró, y tanto las cantidades medidas como los valores recaudados son muy similares.

En este sentido, aunque la Oficina de Administración del Campus ha intentado reducir los volúmenes de consumo de agua en la institución mediante estrategias de reducción en la fuente, programas de gestión eficiente del recurso hídrico, campañas de culturización y medidas como la instalación de orinales secos, válvulas mariposa y otros dispositivos ahorradores, estas disposiciones no han permitido una reducción sustancial, puesto que los resultados de las cuentas contrato de la EAAB demuestran que, históricamente, el consumo del agua se redujo entre el 2004 y el 2007; pero aumentó de nuevo entre el 2008 y el 2009, en magnitudes que se situaron por encima del consumo total del 2004. No obstante, la Universidad ha crecido significativamente últimos años, factor que puede ser la razón fundamental del incremento del consumo.

En cuanto a la oferta hídrica, del análisis realizado a los datos de la estación San Luis se estableció que, en promedio, la precipitación anual de la zona es de 1007,6 mm de agua lluvia, cifra muy cercana a las registradas por las estaciones hidrológicas más antiguas de Bogotá: Observatorio Meteorológico de Bogotá (972 mm) y Aeropuerto El Dorado (818 mm) (Ministerio de Medio Ambiente, 2005). Para obtener la máxima oferta hídrica con base en la información registrada por la estación San Luis, los cuales se encuentran en mayor magnitud de precipitaciones anuales, se analizaron datos de un periodo de 67 años.

Se obtuvo la precipitación mensual promedio de la zona y cada magnitud mensual se multiplicó por el área potencial de captación de las superficies escogidas en cada una de las subcuencas, acudiendo a los principios del método racional para el cálculo de los caudales de escorrentía. Por otro lado, según la distribución de las redes de drenaje de aguas lluvias, la ubicación y sentido de las cubiertas y la topografía, se determinaron las áreas potenciales de captación de aguas lluvias en el campus, lo que generó balances de masas obtenidos de acuerdo con las relaciones oferta-demanda de las áreas y usos estipulados.

Según lo anterior, se estableció una serie de escenarios que depende de la relación entre la calidad del agua medida y la calidad requerida para cada uso, comenzado por un escenario en el que la calidad encontrada es adecuada para todos los usos, incluido el consumo humano, y terminando con un escenario que solo contempla los usos externos que son los que requieren una menor calidad: a) aprovechamiento de aguas lluvias para el suministro del 100% de los usos, mediante recolección que incluya el área total del campus; b) aprovechamiento del agua lluvia para usos no potables, a través de una captación en todo el campus; c) uso del agua lluvia para usos no potables, mediante captación en cubiertas y campo

de fútbol; d) aprovechamiento del agua lluvia para usos externos, a fin de suplir el 40% de la demanda total, a través de captación en edificios y campo de fútbol, y e) aprovechamiento del agua lluvia para usos externos, con el fin de sustituir el 38% de la demanda total, a través de captación en edificios, campo de fútbol y zonas duras y verdes.

De esta forma, se analizó de manera detallada la oferta-demanda y se partió de un escenario ideal de aprovechamiento para la totalidad de usos en el campus, seguido de un escenario para usos no potables y, finalmente, de una serie de escenarios para usos externos, con lo cual, adaptando las áreas de cubiertas, campo de fútbol y zonas verdes y duras, se generó el escenario definitivo el cual fue validado mediante el análisis de masas.

Es importante resaltar que las áreas de las cubiertas de los edificios altos y el campo de fútbol, en estos escenarios, resultaron insuficientes para utilizarlos como superficies receptoras de agua lluvia, razón por la cual, además de ellas, fue necesario aprovechar las áreas de plazoletas, caminos y zonas verdes que topográficamente podrían ayudar a elevar los volúmenes de agua para almacenamiento durante los periodos de lluvias. Para este balance final se calculó la medida necesaria del tanque de almacenamiento para albergar los volúmenes de aguas lluvias, a efectos de suplir la demanda calculada, la cual se estimó en 7400 m³, magnitud excesiva, dadas las restricciones físicas del campus.

Por esta razón, y de acuerdo con las necesidades de bombeo en diversas redes y las limitaciones topográficas y de espacio del campus, se decidió generar análisis a través de microcuencas potenciales de aprovechamiento, con el objetivo de examinar la posibilidad de construir diferentes tanques y redes que logran ser operadas por sistemas a gravedad, sin afectar los espacios de uso público existentes en el campus.

Ajuste de demandas

Como se estableció en el marco teórico, los diseños iniciales se calcularon de acuerdo con los volúmenes de oferta y demanda acumulados, producto del análisis de los balances hídricos en las tres subcuencas. El resultado fue que los volúmenes alcanzaron magnitudes críticas (3350 m³, 800 m³ y 215 m³, para las subcuencas campo de fútbol, CJFD-Barón y pasarelas, respectivamente), puesto que, si bien inicialmente se requirió un tanque de 7400 m³, los volúmenes resultantes del proceso de análisis de subcuencas continuaron siendo bastante altos, al tener en cuenta las restricciones físicas del campus (tabla 1).

De acuerdo con el análisis realizado mediante la interacción de plataformas de los programas AutoCAD y ArcGIS, se logró construir el modelo digital de elevaciones del campus universitario, incluidas sus redes. Con base en esto, se decidió que los escenarios por analizar variarán según el

material de la tubería seleccionada (PVC y polietileno de alta densidad [PEAD]) y a la simplicidad de la red (red simple y red mallada) (figura 3). Por su parte, las alternativas correspondieron al análisis de la demanda de acuerdo con la posibilidad de que a) todo el sistema se encontrara funcionando al mismo tiempo (caudal máximo posible), b) se presente una demanda ajustada a través de la aplicación de un coeficiente de simultaneidad de los aparatos sanitarios (caudal máximo probable) y c) se apliquen coeficientes de mayoración para evaluar el sistema ante periodos críticos en un futuro (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000).

Los análisis permitieron establecer que la red de la subcuenca campo de fútbol necesita aumentar de modo significativo los diámetros de sus tuberías para distribuir óptimamente los volúmenes de suministro necesarios, frente a un posible aumento de la demanda permisible. Además, partiendo del hecho de que la mayor parte de los usos del

Tabla 1
Dimensionamiento tanques de almacenamiento

Subcuenca	Tanque núm.	Volumen útil requerido (m ³)	Volumen total tanque (m ³)	Dimensiones		
				Long. (m)	Ancho (m)	Alto (m)
Campo de fútbol	1	843	912	20,0	12,0	3,8
CJFD-Barón	2	434	473	15,0	8,3	3,8
Pasarelas	3	219	242	12,2	6,0	3,3

Fuente: elaboración propia.

Figura 3
Selección de escenarios y alternativas en WaterCAD

Condición	Escenario	Alternativas
A MATERIAL	<ul style="list-style-type: none"> › Tubería en PVC › Polietileno de alta densidad 	› Caudal máximo posible
		› Caudal máximo probable
		› RAS 2.000
B SIMPLICIDAD DE LA RED	<ul style="list-style-type: none"> › Red Simple › Red Medalla 	› Caudal máximo posible
		› Caudal máximo probable
		› RAS 2.000

Fuente: elaboración propia.

agua lluvia en la universidad no serán afectados por el incremento de la población en el campus, puesto que son externos (riego de zonas verdes y lavado de fachadas y zonas duras), no se considera necesario implementar un sistema que incluya la maximización de las demandas, con lo cual se define que para este primer escenario la alternativa más factible, desde el punto de vista técnico, es la correspondiente a la demanda generada por un caudal máximo probable (alternativa b). Si bien es cierto que las demandas en los baños pueden aumentar, debido a un posible crecimiento de la población estudiantil en los años futuros, el sistema campo de fútbol, de acuerdo con los análisis de caudales probables y picos, indudablemente admitiría este aumento sin sufrir cambios hidráulicos importantes, debido a que los volúmenes de entrega son menores en comparación con los usos externos en el campus. Así mismo, el sistema podría soportar la conexión de nuevas redes de distribución para usos como paisajismo y zonas duras de determinada área, sin sufrir alteración alguna, pero con la condición de que no se requiera entregar un caudal constante diario.

Teniendo en cuenta que en el presente proyecto, con excepción de la descarga de sanitarios, la mayoría de los usos de destino del agua lluvia no suplirán una demanda constante, debido a que el riego de jardines, el suministro de agua para pocetas y el lavado de pisos internos, fachadas y zonas duras generarían un gasto periódico, el sistema podría permitir suspensiones ocasionales de servicio, ocasionadas por daños en el sistema o acciones de operación y mantenimiento, sin generar alteración alguna en el normal transcurso de las actividades del campus puesto que, de ser necesario, el actual sistema de suministro de agua potable del acueducto podría atender la demanda que el sistema de agua lluvia pueda dejar de entregar por las anteriores razones (especialmente para la descarga de sanitarios). Con ello no se encuentra necesaria la construcción del sistema mediante redes compuestas.

La identificación de las redes de drenaje en el campus universitario permitió establecer las fuentes potenciales de captación y, a su vez, la adecuación de las redes aductoras desde los puntos de recolección hasta el tanque de almacenamiento. Se recurrió a la utilización de las redes de drenaje pluviales de las estructuras físicas potenciales de captación, adecuándolas para conducir los flujos directamente hacia los tanques de almacenamiento. Así mismo, se separaron las redes no incluidas en el proceso de aprovechamiento y se determinaron las redes de control de excesos a partir de dichos tanques, incluidos estos análisis en el presupuesto de obra final.

Calidad del agua lluvia en el campus

Dentro de los parámetros medidos en los nueve puntos de muestreo, se encontraron algunos valores que no cumplen los estándares de las diferentes referencias normativas consultadas. A continuación se presentan los principales aspectos y su relación con los diferentes usos analizados; los datos se muestran en valores con una confiabilidad del 95%.

En primer lugar, la generalidad de las muestras presentó valores que las hacen no aptas para el consumo humano sin previo tratamiento de potabilización en todos los puntos analizados, por diferentes parámetros en cada caso.

Dentro de los parámetros más restrictivos se encuentran los metales pesados, debido a su toxicidad y potencial factor de generación de cáncer y teratogenicidad o afecciones al sistema reproductivo (Biduhendra, 2002). En este sentido, se observan concentraciones elevadas de plomo (Pb), cadmio (Cd) y mercurio (Hg), las cuales superan los estándares de calidad para riego agrícola y consumo humano (tabla 2).

Parte de la problemática asociada a estos tres elementos es que son fácilmente absorbibles por

contacto dérmico, lo que genera un alto riesgo ocupacional en caso de utilizar agua contaminada con ellos en actividades como lavados de pisos o riego por aspersión; adicionalmente, su capacidad de acumulación en suelos y de bioacumulación en organismos hace que la normatividad mundial exija restricciones altas en su presencia en aguas de riesgo agrícola. La absorción y la acumulación de cadmio, por ejemplo, genera desde deficiencias renales hasta una enfermedad conocida mundialmente como *itai itai*, médicamente diagnosticada como osteoartritis, cuyo caso más conocido es el de Jintsu, Japón, en 1954 (Méndez-Fajardo et ál., 2007).

Por otro lado, en el punto 9 se detectó una contaminación bacteriológica (coliformes fecales, *Escherichia coli*) que, aun cuando no muy elevada, impide el uso del agua dentro del campus: por ejemplo, según MLIT (2005), para descarga de sanitarios u orinales no se deben detectar coliformes totales, y según la U. S. Environmental Protection Agency (2004) y la Resolución 2115 de 2007 para Colombia, para catalogarla como apta para el consumo humano no se deben detectar ninguno de estos dos parámetros (tabla 3).

Tabla 2
Metales pesados que sobrepasan los valores máximos permisibles

Parámetro	Punto 4		Punto 5		Riego agrícola aspersión	Consumo humano (EE. UU.)	Consumo humano (2115/07)
	Prom.	Incert. (%)	Prom.	Incert. (%)			
Pb (mg/L)	0,170	85	0,17	7	<0,5	0,01	0,01
Cd (mg/L)	0,012	13	0,19	16	<0,01	0,005	0,003
Hg (mg/L)	0,130	20	0,15	43	Sin dato	0,001	0,001

Fuente: elaboración propia.

Tabla 3
Valores de ensayos microbiológicos en el punto 9

Parámetro	Prom.	Incert. (%)	Consumo humano (EE. UU.)	Consumo humano (2115/07)
Coliformes fecales (UFC/100 mL)	240	NC	0	0
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 mL)	170	NC	0	0

Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, los puntos 4 y 5 presentaron valores de pH de 6,24 y 6,01 unidades de hidrógeno, con incertidumbres del 2% y del 0,3% respectivamente; valores inferiores a los recomendados por el Decreto 1594 de 1984, norma que regula los estándares de calidad para agua potable en Colombia, el cual recomienda un rango de 6,5 a 8,5 unidades (tabla 4).

Como se puede apreciar en la tabla 4, las concentraciones de sólidos suspendidos totales (SST) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅) son superiores al límite recomendado para los usos menos restrictivos, como riego agrícola superficial o usos ornamentales (U. S. Environmental Protection Agency, 2004); adicionalmente, la turbiedad del agua muestreada es muy superior a las cinco unidades nefelométricas de turbiedad (NTU), recomendadas como valor límite para riego no agrícola o lavado de automóviles (U. S. Environmental Protection Agency, 2004).

De acuerdo con la información de la tabla 5, en todos los puntos muestreados se presentan altas concentraciones de hierro (Fe), que superan los valores límite recomendados para los usos menos

restrictivos como el riego (Ministerio de Salud de Colombia, 1984; U. S. Environmental Protection Agency, 2004), en particular si se quiere evitar el taponamiento de elementos de irrigación causado por la precipitación del metal en las tuberías y accesorios, principalmente cuando se encuentran concentraciones de pH superiores a las 7,7 unidades de hidrógeno (Gilbert et ál., 1982; Pescod, 1992; Lazarova et ál., 2004), como es el caso de los puntos 1, 3 y 9, los cuales presentaron valores medidos de 8,83; 8,4 y 7,85 unidades, respectivamente. Por otro lado, con relación al hierro presente, en la mayoría de los puntos se supera la restricción de 0,20 mg/L para su consumo directo (European Union, 1998).

Análisis preliminar de costos de implementación

El análisis de costos preliminar incluye los resultados tanto de oferta-demanda como los de calidad del agua lluvia de esorrentía estudiada. Debido a que se definió que las aguas lluvias suplirán diversos usos no potables, se buscó una tecnología de

tratamiento, con buena eficiencia de remoción de SST y DBO, empleando filtración en múltiples etapas, con el propósito de valorar económicamente la infraestructura completa para el aprovechamiento. También se recomendó utilizar una película de carbón activado para eliminar las altas concentraciones de hierro. Estos filtros se proponen para cada subcuenca (uno por subcuenca).

Por otro lado, de acuerdo con las alternativas escogidas durante los procesos de modelación hidráulica de redes y la selección de las tecnologías de tratamiento, para cada subcuenca se evaluaron los ítems necesarios, a fin de elaborar los presupuestos de obra. La subcuenca campo de fútbol se diseñó para suplir las demandas de riego en zonas verdes y de lavado de fachadas y zonas duras en la zona baja central del campus, así como el suministro en pocetas y descargas de inodoros en los baños públicos de la cafetería central. El volumen máximo aprovechable es de 16.500 m³ de agua lluvia captadas a través de diferentes superficies potenciales de aprovechamiento, las cuales se localizaron en la zona alta del campus.

Tabla 4
Valores de turbiedad, SST y DBO₅

Parámetro	Punto 2		Punto 3		Punto 9		Sanitario, orinal, ducha, riego, pisos
	Prom.	Incert. (% sobre prom.)	Prom.	Incert. (% sobre prom.)	Prom.	Incert. (% sobre prom.)	
Turbiedad (UNT)	42,4	0,2	72,43	5	32,55	0,30	≤ 5
SST (mg/L)	181,7	2,8	171,10	9	111,70	7,00	≤ 5
DBO ₅ (mg/L)	38,0	0,0	42,70	12	30,00	0,01	≤ 10

SST: sólidos suspendidos totales; DBO: demanda bioquímica de oxígeno; UNT: unidades nefelométricas de turbiedad.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5
Concentraciones de hierro en los cinco puntos analizados

	Puntos										
	3		4		5		7		9		Riego
	Prom.	Incer. (%)	Prom.	Incer. (%)	Prom.	Incer. (%)	Prom.	Incer. (%)	Prom.	Incer. (%)	
	0,68	3	0,31	1	0,46	2	0,13	3	0,48	2	<0,1; <0,5

Fuente: elaboración propia.

En consecuencia, el presupuesto necesario para implementar este sistema fue estimado en \$448.200.453 para el 2010. El sistema incluye los requerimientos de infraestructura adaptados a las recomendaciones del RAS 2000 para aprovechar el recurso hídrico en búsqueda de una mayor sostenibilidad ambiental y económica. Por otro lado, la subcuenca CJFD-Barón fue planteada para suplir las demandas no potables solicitadas en los primeros tres pisos del edificio de la Facultad de Ingeniería, al igual que el lavado de sus fachadas y zonas duras. En esta cuenca se podrían aprovechar alrededor de 5900 m³. Según los requerimientos necesarios para construir el sistema de aprovechamiento en la subcuenca CJFD-Barón, el presupuesto para implementar allí el aprovechamiento de aguas lluvias fue estimado en \$246.776.929,88 para el 2010, utilizando tubería en PVC para las distintas conducciones. Pon ende, el costo total de construcción del sistema de aprovechamiento de aguas lluvias en el campus sería de \$694.967.383. No obstante, teniendo en cuenta que la PUJB cuenta con la oficina de Planta Física como organismo encargado de la planificación del desarrollo físico del campus, algunos de estos ítems (actividades preliminares, tuberías, etc.) podrían reemplazarse por el material que se encuentre en sus bodegas, lo cual establece una clara posibilidad para reducir los costos directos de construcción de los sistemas de aprovechamiento de aguas lluvias.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados de los balances hídricos, se verificó que se presentan altos volúmenes de precipitación. También se evidenció que el agua lluvia es insuficiente para cubrir la demanda total en el campus universitario, sino tan solo un 14% de ésta.

Al diseñar e implementar alternativas de aprovechamiento de aguas lluvias en un campus universitario ya existente, es importante analizar

diferentes escenarios delimitados por subcuencas hídricas que permitan estudiar diferentes volúmenes de tanques que se vayan a construir, particularmente en campus existentes con limitaciones de espacio para tal fin.

Los nueve puntos evaluados presentan una calidad no apta para su empleo en ninguno de los usos previstos dentro del campus sin tratamiento previo, en particular debido a altas concentraciones de turbiedad, SST, DBO₅ y metales pesados, como hierro, plomo, cadmio y mercurio.

Al reemplazar con agua lluvia el agua potable que actualmente se utiliza en actividades como lavado de pisos, fachadas, descarga de sanitarios, riego ornamental, entre otros, se generaría un ahorro promedio anual estimado en \$24'174.754 (US\$12.723), incluyendo un sistema de filtración en múltiples etapas como alternativa de tratamiento. En este sentido, hay que tener en cuenta que en el corto plazo se tendrían que invertir cuantiosas sumas de dinero, lo cual retornará en el corto, mediano y largo plazo en la generación de cambio cultural del aprovechamiento del agua, aspecto relevante para el posicionamiento de las instituciones educativas.

Recomendaciones

Es necesario que los proyectos, tanto urbanos como rurales, que buscan fomentar el aprovechamiento de aguas lluvias implementen en sus metodologías de concepción, diseño, implementación y seguimiento, estrategias de medición de parámetros de calidad, adicionales a las ya históricamente aplicadas de la oferta-demanda del recurso. Por otro lado, es importante que en los campus universitarios ubicados en contextos urbanos se implementen tecnologías de aprovechamiento de aguas lluvias, toda vez que estos ámbitos son, en sí, espacios de formación que impactan en el fortalecimiento de capital social y ciudadano.

Con el fin de implementar estrategias tecnológicas que permitan la planeación y la operación eficiente de sistemas de aprovechamiento del agua lluvia en un campus universitario, es necesario contar con instrumentos que permitan medir caudales en las diferentes edificaciones, así como tener identificada la infraestructura de redes de conducción tanto de acueducto como de instalaciones interiores, de modo que sea fácil identificar diferentes usos y demanda por cada uno de ellos.

No se ha estudiado aún el origen de los contaminantes encontrados; sin embargo, se cree que la presencia de materia orgánica y nutrientes podría estar relacionada con posibles infiltraciones de aguas residuales en la zona oriental del campus. En cuanto a los metales, no se han verificado hipótesis sobre las posibles fuentes de contaminación, como emisiones vehiculares dentro del campus, compuestos de las llantas de los vehículos que pueden quedar en las zonas de escorrentía superficial, contaminación atmosférica propia del sector en una escala más urbana, utilización de químicos en los sembrados de jardines y materas del campus, vertimientos del lavado de carros que se realiza en los sótanos del edificio de parqueaderos, entre otras. Estos aspectos deberán ser estudiados con el fin de concebir estrategias de reducción de la contaminación en la fuente.

Se pretende dar continuidad al estudio por medio de campañas complementarias analizando parámetros de calidad adicionales como: a) grasas y aceites en los puntos relacionados con la presencia de vehículos (4, 5 y 10) y b) compuestos orgánicos volátiles en el punto relacionado con el campo de fútbol, el cual, al ser de césped artificial, tiene varias capas de materiales sintéticos (punto 1). Adicionalmente, los resultados de este estudio de calidad, sumados a estudios de oferta y demanda, servirán de insumo para establecer los requerimientos de infraestructura, con miras a implementar el sistema de aprovechamiento de

aguas lluvias. Posteriormente se implementará un sistema de toma de decisiones con múltiples criterios (calidad, cantidad, costos, beneficios, etc.) para finalmente llevar a cabo los estudios de ingeniería de las soluciones seleccionadas.

Adicionalmente, el estudio exhaustivo de la calidad en los nueve puntos estratégicos seleccionados dará luces sobre la verdadera potencialidad del agua lluvia como fuente alternativa y sobre las posibles fuentes de contaminación.

Por otro lado, es necesario un estudio complementario que evalúe las diferentes alternativas tecnológicas para el tratamiento de las aguas, de acuerdo con los parámetros de calidad tanto encontrados como esperados, según los usos que se proyecten en la planeación estratégica ambiental del campus.

Este proyecto está relacionado con una de las posibles prácticas que compondrían un modelo de gestión y uso eficiente del agua, por lo que se recomienda articularla con otras estrategias, como el reciclaje de aguas grises, tratamiento in situ de aguas residuales, equipos ahorradores de agua, campañas de educación ambiental y uso eficiente del agua.

Bibliografía

Amat y León, C. (coord.), (2008). *El cambio climático no tiene fronteras: impacto del cambio climático en la Comunidad Andina*. Lima: Secretaría General de la Comunidad Andina.

Asano, T.; Burton, F. L.; Leverenz, H. L.; Tsuchihashi, R. y Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications*. New York: McGraw Hill.

Bates, B. (2008). *El cambio climático y el agua* (Documento técnico VI del IPCC). Ginebra: PNUMA.

- Biduhendra, S. (2002). *Heavy metals in the environment*. New York: Marcel Decker.
- Chen, D.; Attwater, R. y Luo, M. (2008). Introduction to rainwater management in Australia and suggestions for China's water problems. *Journal of Chongqing University (English Edition)*, 7 (1), 8-16.
- Coombes, P. J.; Argue, J. R. y Kuczera, G. (2000). Figtree Place: a case study in water sensitive urban development (WSUD). *Urban Water*, 1 (4), 335-343.
- Eisen, J. B. (1995). Toward a sustainable urbanism: lessons from federal regulation of urban stormwater runoff. *Washington University Journal of Urban and Contemporary Law*, 48, 1.
- European Union (1998). Council Directive 98/83/EC of 3 November 1998 on the quality of water intended for human consumption. *Official Journal of the European Communities*, L330/45, 05/12/1998.
- European Union (2006). Directive 2006/7/EC of the European Parliament and of the Council of 16 February 2006 Concerning the Management of Bathing Water Quality and Repealing Directive 76/160/EEC. *Official Journal of the European Union*, L64, 37-51.
- Ghisi, E.; Montibeller, A. y Schmidt, R. W. (2006). Potential for potable water savings by using rainwater: An analysis over 62 cities in southern Brazil. *Building and Environment*, 41 (2), 204-210.
- Ghisi, E.; Tavares, D. da F. y Rocha, V. L. (2009). Rainwater harvesting in petrol stations in Brasília: Potential for potable water savings and investment feasibility analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 54 (2), 79-85.
- Gilbert, R. G.; Nakayama, F. S.; Bucks, D. A.; French, O. F.; Adamson, K. C. y Johnson, R. M. (1982). Trickle irrigation—predominant bacteria in treated Colorado River water and biologically clogged emitters. *Irrigation Science*, 3 (2), 123-132.
- Hatt, B. E.; Deletic, A. y Fletcher, T. D. (2006). A review of integrated storm water treatment and re-use in Australia. *Journal of Environmental Managerial*, 76, 102-113.
- ISO 9308-1 (2002). *Water quality-detection and enumeration of Escherichia coli and Coliform bacteria- Part 1: Membrane filtration method*. s. d.
- Lara Borrero, J. A.; Torres Abello, A. E.; Campos Pinilla, M. C.; Duarte Castro, L.; Echeverri Robayo, J. I. y Villegas González, P. A. (2007). Aprovechamiento del agua lluvia para riego y para el lavado de zonas duras y fachadas en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana (Bogotá). *Ingeniería y Universidad*, 11 (2), 193-202.
- Lazarova, V.; Papadopoulos, I. y Bahri, A. (2004) Code of successful agronomic practice. En V. Lazarova y A. Bahri (eds.), *Water reuse for irrigation: agriculture, landscapes, and turf grass* (pp. 103-150). Boca Raton, FL: CRC Press.
- Lehmann, S. (2008). Sustainability on the urban scale: green urbanism – new models for urban growth and neighborhoods. En *Urban energy transition* (pp. 409-430). Amsterdam: Elsevier.
- May, S. (2004). *Estudo da viabilidade do aproveitamento de água de chuva para consumo não potável em edificações*. São Paulo: Universidad de Sao Paulo.
- McCarthy, D. T.; Mitchell, V. G.; Deletic, A. y Diaper, C. (2007). Escherichia coli in urban stormwater: explaining their variability. *Water*

Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 56 (11), 27-34.

Meera, V. y Ahammed, M. (2006). Water quality of rooftop rainwater harvesting systems: a review. *Aqua-Journal of Water Supply*, 55 (4), 257-268.

Méndez-Fajardo, S.; Lara Borrero, J. A.; Moreno, G. y Ayala, A. (2007). Estudio preliminar de los niveles de cadmio en arroz, frijoles y lentejas, distribuidos en supermercados de Bogotá y plazas de Manizales. *Revista Fitotecnia Colombiana*, 7 (2), 40-47.

Ministerio de Desarrollo Económico de Colombia (2000). *Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico (RAS): revisión 1*. Bogotá: Ministerio.

Ministerio de la Protección Social, Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (2007). Resolución 2115 de junio de 2007.

Ministerio de Medio Ambiente de Colombia (2005). *Atlas climatológico de Colombia*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

Ministerio de Salud de Colombia (1984). Decreto 1594: usos del agua y residuos líquidos. MLIT (2005). *Manual on water quality for reuse of treated municipal wastewater*. Tokyo: Japanese Ministry of Land, Infrastructure, and Transportation.

Neila, J. (2004). Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible: buenas prácticas edificatorias. *Cuadernos de Investigación Urbanística*, 41 (6), 89-99.

Palacio, N. (2010). *Propuesta de un sistema de aprovechamiento de agua lluvia, como alternativa*

para el ahorro de agua potable, en la institución educativa María Auxiliadora de Caldas (tesis de especialización). Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Pescod, M. B. (1992). *Wastewater treatment and reuse in agriculture*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ramírez-Fonseca, J. A. (2009). Construcción verde en concreto: arquitectura bioclimática, sostenible y autosuficiente. *Noticreto: La Revista de la Técnica y la Construcción Colombiana*, (93), 20-27.

Sánchez, L. D. (2003). *Uso del agua de lluvia en la Bocana, Buenaventura*. Trabajo presentado en la Conferencia Internacional Usos Múltiples del Agua: Para la Vida y el Desarrollo Sostenible, Cartagena de Indias.

Siemens AG. (2009). *European Green City Index, assesing the environmental impact of Europe's major cities* (Reporte de investigación). Recuperado el 27 de octubre del 2011, de http://www.siemens.com/press/pool/de/events/corporate/2009-12-Cop15/European_Green_City_Index.pdf.

Smet, J. y van Wijk, C. (eds.), (2002). *Small community water supplies. Technology People and Partnership* (No. 40). IRC.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998), (20th ed.). Washington: American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation.

Suárez, J.; García, M. y Mosquera, R. (2006). *Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia*. Trabajo presentado en el VI Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Água, João Pessoa, Brasil.

Torres, A.; Méndez-Fajardo, S.; López Kleine, L.; Marín, V.; González, J.; Suárez, J. C.; Pinzón, J. D. y Ruiz López, A. (2011). *Evaluación preliminar de la calidad de la escorrentía pluvial, en zonas periurbanas de Bogotá. Actualidad y Divulgación Científica*, 14 (1), 127-135.

U. S. Environmental Protection Agency (2004). *Guidelines for water reuse* (EPA-625/R-04-108).

Washington: U. S. Environmental Protection Agency-U. S. Agency for International Development.

World Health Organization (2006). *WHO guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater* (3a ed., vol. 2). Geneva.