



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**Metabolismo social para el
manejo sostenible de los
recursos naturales. El agua
en la Cuenca Alta del Río
Bogotá**

Carolina Tobón Ramírez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ciencias Económicas
Instituto de Estudios Ambientales
Bogotá, Colombia
2013

**Metabolismo social para el
manejo sostenible de los
recursos naturales. El agua
en la Cuenca Alta del Río
Bogotá**

**Carolina Tobón Ramírez
905145**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito
parcial para optar al título de:
Magíster en Medio Ambiente y Desarrollo

Director (a):
Ph.D. Nohra León Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Instituto de Estudios Ambientales
Facultad de Ciencias Económicas
Bogotá, Colombia
2013

Esta investigación está dedicada a mi familia que ha sido guía, motivación y orgullo de vida.

Agradecimientos

A mis padres y hermano quienes con su apoyo incondicional y ejemplo han hecho posible mi realización en el camino de la investigación.

A Nohra León por su acompañamiento riguroso y orientación.

A Stefania Gallini y al proyecto "Sustainable Farm Systems. Long-term Socio-ecological Metabolism in Western Agriculture" porque gracias a ellos he tenido la oportunidad de conocer más a fondo las teorías y metodologías del metabolismo social en la práctica y de nutrir mi conocimiento y mi proceso investigativo de experiencias a nivel internacional.

A los campesinos de la cuenca alta del río Bogotá que aportaron a esta investigación su conocimiento. Especialmente a los curtidores del municipio de Villapinzón porque fueron ellos quienes inspiraron mi preocupación por el río Bogotá y a la vez la esperanza de una recuperación.

A las administraciones municipales e instituciones como CAR, EAAB, IGAC quienes aportaron información muy útil para este estudio.

Resumen

Esta investigación tiene por objetivo generar criterios derivados del metabolismo social que permitan analizar la sostenibilidad del manejo de un recurso natural como el agua. El escenario de análisis es la cuenca alta del río Bogotá a partir de la segunda mitad del siglo XX debido a su importancia en términos de manejo de agua tanto para la ciudad de Bogotá como para la sabana. Los principales factores analizados que históricamente han ejercido una fuerte presión sobre este sistema natural en términos de manejo de agua son la actividad del curtido de pieles, la floricultura y la industria, actividades que han intensificado el consumo de agua y por lo tanto sus vertimientos al río en los últimos veinte años. Las tendencias de metabolismo de agua crecientes en esta región la han hecho insostenible en términos de consumo y de excreción por lo que es indispensable que se generen estrategias integrales para conducir el sistema hacia trayectorias sostenibles, de lo contrario se verán afectados servicios ecosistémicos importantes para la población y una parte importante de la base natural de la que depende la ciudad.

Palabras clave: Metabolismo social, Metabolismo hídrico, Sostenibilidad, Manejo de agua, Río Bogotá.

Abstract

This research has the purpose to generate criteria from the social metabolism theories that allow analyzing the sustainability of natural resource management, especially of the water management. The scenario to analyze is the upper basin of the Bogota River since the second half of twentieth century due to the importance in terms of water management for Bogota city and the savannah region. The main factors analyzed that historically have had a deep pressure over water management are tanning activity, flower plantations and industry. These activities have increased the water consumption and the discharges over the river in the last two decades. The increase trends of water metabolism in the study region have created conditions of unsustainability in terms of consumption and discharges. For that reason, it is urgent to generate integral strategies of management to drive the system throughout sustainable paths. On the contrary, important environmental services for human being will be affected and also the natural basis that supports the city of Bogota.

Keywords: Social metabolism, Water metabolism, Sustainability, Water management, Bogota River

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract	X
Lista de figuras	XIII
Lista de tablas	XV
Lista de Anexos	XVI
Lista de Acrónimos	XVII
1. Las relaciones naturaleza-sociedad y el metabolismo social.....	5
1.1 Las relaciones naturaleza-sociedad.....	5
1.2 Perspectivas del metabolismo desde lo natural.....	7
1.3 El metabolismo de la sociedad.....	9
1.4 El metabolismo del agua.....	13
1.5 La sostenibilidad en el metabolismo social.....	15
1.6 Desafíos del metabolismo para América Latina.....	17
2. Tendencias en los estudios de metabolismo social.....	19
3. Paso a paso en el metabolismo social del agua.....	23
3.1 Generación de criterios de sostenibilidad derivados del metabolismo social	26
3.2 Modelo conceptual del sistema ambiental de estudio.....	26
4. Metabolismo social del agua en la Cuenca Alta del Río Bogotá...30	
4.1 Generación de criterios de sostenibilidad derivados del metabolismo social	30
4.2 Modelo conceptual del sistema de estudio.....	36
4.2.1 Definición del sistema de análisis	36
4.2.2 Caracterización física y ecológica del sistema	37
4.2.3 Perfil histórico, social y económico del sistema	50
4.2.4 Factores direccionadores del uso del agua en el territorio.....	59
4.2.5 Modelo conceptual del sistema	77
4.3 Bases para el análisis de sostenibilidad del manejo del agua en el sistema de estudio	81
4.3.1 Modelos conceptuales para el metabolismo del agua. ..	81
4.3.2 Sostenibilidad ambiental	86
5. Conclusiones y recomendaciones.....	99
5.1 Conclusiones.....	99

5.2 Recomendaciones	100
ANEXOS	102
Bibliografía.....	122

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1 Proceso metabólicos entre sociedad y naturaleza	10
Figura 2 Interrelaciones entre sistemas co-evolutivos	13
Figura 3 Esquema metodológico de la investigación	25
Figura 4 Procesos metabólicos con recirculación de residuos	34
Figura 5 Proceso metabólico del agua	34
Figura 6. Balance oferta-demanda en las sub-cuencas de estudio .	45
Figura 7 Población por municipio entre 1964 y 2005	56
Figura 8 Comparativo de población por años censales (1964 a 2005)	57
Figura 9 Proceso productivo tradicional	63
Figura 10 Proceso productivo de curtido con PML	64
Figura 11 Consumo de agua en curtiembres para cuatro períodos ..	66
Figura 12 Exportaciones de Colombia 1970-2012	70
Figura 13 Consumo de agua total de la floricultura por período y municipio	72
Figura 14 Modelo conceptual del sistema de estudio	80
Figura 15 Metabolismo del agua en la cuenca alta del río Bogotá en 1960.	82
Figura 16 Metabolismo del agua en el sistema en la cuenca alta del río Bogotá en la actualidad	83
Figura 17 Procesos metabólicos en en la cuenca alta del río Bogotá en la actualidad.	85

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 Tendencias en los estudios de metabolismo social	22
Tabla 2 Balance hídrico año 1990	43
Tabla 3 Balance hídrico año 2000	43
Tabla 4 Balance hídrico año 2012	43
Tabla 5 Ecosistemas presentes en el área de estudio y servicios ecosistémicos asociados.	48
Tabla 6 Tasa de crecimiento por municipio (1964-2005)	55
Tabla 7 Número de curtiembres en Villapinzón y Chocontá desde 1970	62
Tabla 8 Consumo de agua en el sector curtiembre para cuatro períodos.	65
Tabla 9 Superficie cultivada y consumo de agua por municipio de 1970 a 2009.	71
Tabla 10 Consumo de agua total para cada período y municipio ...	72
Tabla 11 Industrias presentes en la zona Zipaquirá	75
Tabla 12 Tipos y número de industrias en Tocancipá en la actualidad	76

Lista de Anexos

Anexo A. Análisis hidrológico.....	102
Anexo B. Inventario de Industrias de Tocancipá.....	118

Lista de Acrónimos

ACURTIR	Asociación de pequeños y medianos curtidores del municipio de Villapinzón
ASOCOLFLORES	Asociación Colombiana de Exportadores de Flores
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
CCB	Cámara de Comercio de Bogotá
CONPES	Consejo Nacional de Política Económica y Social de Colombia
DANE	Departamento Nacional de Estadística
DNP	Departamento Nacional de Planeación
DBO	Demanda Biológica de Oxígeno
DQO	Demanda Química de Oxígeno
EAAB	Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá
EOT	Esquema de Ordenamiento Territorial
IDEAM	Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
JICA	Agencia de Cooperación Internacional del Japón
MAVDT	Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial
MSIASM	Multiple-Scale Integrated Assessment of Societal Metabolism
MuSIASEM	Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism
SGC	Sociedad Geográfica Colombiana
SSE	Sistema socio-ecológico
POMCA	Plan de Ordenamiento y Manejo de Cuencas Hidrográficas
PTAR	Planta de Tratamiento de Aguas Residuales
PTAP	Planta de Tratamiento de Agua Potable
TLC	Tratado de libre comercio

Introducción

El agua es un elemento esencial para la vida, constituye entre el 50 y el 95% del peso de un ser vivo y tres cuartas partes de la superficie de la Tierra están cubiertas de agua de las cuales entre un 2 y 3% es agua dulce. La gran mayoría de las actividades humanas están condicionadas por el uso de este bien, así mismo, los sistemas ecológicos la necesitan para estar en equilibrio y las diferentes culturas han creado diversas y complejas relaciones con ella. Por todo lo anterior, el manejo del agua debe ser realizado de manera que se satisfagan las necesidades humanas y naturales y se asegure su sostenibilidad en el tiempo.

El manejo de los recursos naturales y en particular del agua es una temática de vital importancia en la actualidad dado que la sociedad atraviesa una crisis ambiental por el uso exagerado e ineficiente de agua, materiales y energía. Los recursos naturales como su nombre lo indica, provienen de la naturaleza y han sido utilizados desde la aparición del hombre en la tierra en diversas actividades de acuerdo con los modos de subsistencia por los cuales ha transitado la sociedad. Por lo anterior, el manejo de los mismos debe ser analizado de manera integral en términos de las relaciones de intercambio entre los grupos sociales con el entorno natural desde una perspectiva histórica con el fin de diseñar estrategias sostenibles para el futuro.

Por lo anterior el análisis de las relaciones entre los recursos naturales y la sociedad debe ser realizado en términos de sostenibilidad reivindicando los intercambios físicos que se realizan en el tiempo y en el espacio. De esta manera, la presente investigación se propone rescatar la integralidad de las teorías provenientes del metabolismo social con el fin de identificar criterios de sostenibilidad para el manejo del agua en una cuenca hidrográfica. Se pretende también analizar las relaciones sociales, económicas, políticas e institucionales que han determinado diferentes características en el tiempo.

El metabolismo social ofrece un marco teórico que permite analizar la sostenibilidad del manejo de un recurso natural como el agua, un bien natural que circula en la naturaleza y permea todas las dimensiones de la existencia. Específicamente en esta investigación se analizó bajo la perspectiva del metabolismo social el caso del manejo del agua en la cuenca alta del río Bogotá a partir de la segunda mitad del siglo XX. Para lo anterior, se indagaron las bases teóricas del metabolismo social que permitieron comprender las interacciones entre las organizaciones sociales y su entorno natural en términos de flujos de agua.

Una vez identificadas las bases teóricas del metabolismo social se identificaron los criterios que permitirían analizar la sostenibilidad del manejo del agua desde el metabolismo social y así se aplicaron al uso del agua en la cuenca alta del río Bogotá a partir de la segunda mitad del siglo XX. Con los resultados derivados de esta investigación se espera abordar las problemáticas relacionadas con la sostenibilidad en el manejo del agua en la parte alta de la cuenca del río Bogotá reflejadas en altos índices de escasez de agua en épocas secas, riesgos de inundación en épocas lluviosas y contaminación directa y difusa de fuentes hídricas por actividades humanas especialmente agroindustriales e industriales.

La construcción del metabolismo de una sociedad implica un enfoque complejo e interdisciplinar debido a que integra una alta diversidad de métodos provenientes de las ciencias naturales y las ciencias sociales, en consonancia con las situaciones que se presentan alrededor del manejo de un recurso natural como el agua. La base de este estudio es el metabolismo de una serie de grupos sociales con un entorno natural común, el río Bogotá, un río que ha sido escenario de fuertes presiones antrópicas desde el establecimiento de los primeros pobladores, un río que ha sido víctima del crecimiento desmedido de población y de la industria y que sufre día a día las consecuencias de una inadecuada planeación. Las sociedades que se han relacionado históricamente de manera directa con el río Bogotá han hecho uso del agua proveniente de un sistema hídrico que se articula en toda la cuenca, han regado sus cultivos con ella, han vertido directamente en su cauce el agua residual de los procesos domésticos e industriales y han filtrado en sus suelos aguas contaminadas con diversos productos químicos.

Estas interacciones y flujos entre la sociedad y la naturaleza deben ser analizados en el tiempo, es por eso que la historia ambiental de la zona es fundamental para comprender las relaciones de intercambio entre el hombre y su entorno natural. Para este estudio se seleccionó el período comprendido entre la segunda mitad del siglo XX y la actualidad. A partir de esa época se llevan a cabo las intervenciones más notorias en el comportamiento natural del río con el establecimiento de canales, diques y represas y cuando todo el territorio comienza a reflejar los impactos de las políticas de reforma agraria, urbanización, industrialización y modernización del campo.

Este trabajo pretende generar insumos para quienes formulan y toman decisiones de política pública en relación a la gestión del agua y los ecosistemas a nivel local como una alternativa para conocer el territorio y analizar de manera integral (cuantitativa y cualitativa) la sostenibilidad de las relaciones que se han tejido sobre él.

El documento se compone de cinco capítulos, el primero sienta las bases teóricas sobre las cuales se abordará el objeto de estudio enfocadas principalmente en el metabolismo social. El segundo presenta las principales tendencias en los estudios de metabolismo social a nivel mundial, latinoamericano y nacional. El tercero presenta el paso a paso de la investigación desde cada dimensión analizada; física, histórica y geográfica. La cuarta sección concentra el análisis frente al metabolismo social del agua, la caracterización de la zona de estudio desde diferentes dimensiones y el análisis histórico de algunos factores direccionadores del uso del agua en el territorio; la actividad de curtido de pieles, la floricultura y la industria. Se presentan también en este acápite tres modelos conceptuales útiles para el estudio del metabolismo social del agua en el territorio. El quinto y último apartado recoge las principales conclusiones y recomendaciones del estudio en donde se resalta la importancia de generar cambios en las tendencias crecientes del metabolismo del agua debido a la insostenibilidad a la que se enfrenta el sistema en términos ecológicos y sociales.

1. Las relaciones naturaleza-sociedad y el metabolismo social

Esta investigación parte de la hipótesis de que el metabolismo social ofrece un marco teórico y metodológico capaz de abordar la complejidad de las relaciones entre la naturaleza y la sociedad en términos de la sostenibilidad de un recurso natural como el agua, un bien natural, un derecho fundamental y un eje transversal en la ordenación de un territorio.

Este capítulo hace referencia al metabolismo social como base teórica y fundamental para el estudio desde el cual se pretende analizar la sostenibilidad de un territorio en relación con el manejo que ha hecho del agua a partir de la segunda mitad del siglo XX. Se contrastan las principales teorías que han surgido desde diferentes disciplinas y se discute el desarrollo teórico realizado por Toledo y González de Molina (2011) en el cual se visualiza con claridad el proceso metabólico de la sociedad con la naturaleza en todas sus dimensiones y escalas. A continuación, se presenta una mirada del desarrollo teórico del metabolismo aplicado al agua y se analiza el concepto de sostenibilidad basado en las teorías de metabolismo. Finalmente, se realizan algunas reflexiones acerca de los retos que supone para el caso latinoamericano el abordaje de un enfoque tan complejo pero a la vez tan integral.

1.1 Las relaciones naturaleza-sociedad

La especie humana, a través del establecimiento de sociedades en el tiempo, ha llegado a ser dominante en la naturaleza colonizando procesos naturales y haciendo uso ilimitado e ineficiente de los recursos que la naturaleza le provee y que son claves para el desarrollo de la humanidad (Fischer-Kowalski & Weisz, 1999). Diversas disciplinas han estudiado las relaciones entre la sociedad y el entorno natural (Boyden, 1992; Godelier, 1986 y Siefertle, 1997) y lo han hecho enmarcadas en dos dificultades fundamentales, una es el problema clásico del dualismo cartesiano, la forma en la que interactúan lo material y lo simbólico que ha sido determinante para la historia de la civilización occidental; la segunda, es el eterno conflicto de las ciencias, en donde al parecer no se encontrarían las ciencias sociales con las naturales (Fischer-Kowalski & Weisz, 1999).

En el marco de estas dificultades se enmarca una crisis ambiental de la humanidad en el tiempo presente, una crisis civilizatoria (Leff, 2007) en la que la cultura, como plataforma de adaptación tecnológica de la sociedad, y la economía, como modelo de desarrollo capitalista han hecho a un lado a la naturaleza. "Quizá sea la crisis ecológica el signo más evidente de la crisis civilizatoria, de su gravedad y dimensión planetaria, que seguramente obligarán a orquestar cambios muy relevantes en la conformación de la sociedad" (Gonzalez de Molina, 2009 pg 219).

La situación ambiental actual; caracterizada por altos niveles de contaminación (hídrica, atmosférica, del suelo), erosión, desertificación, efecto invernadero, lluvia ácida, debilitamiento de la capa de ozono, deforestación, sobreexplotación, entre otros, han venido agudizándose desde el establecimiento de una civilización industrial (una época en territorio europeo, otra más adelante en territorio latinoamericano). Esta situación está ligada fuertemente a las formas de producción que han determinado el modelo económico capitalista de los últimos siglos (Gonzalez de Molina, 2009), formas de producción que han influido notoriamente en la alteración de los ciclos de materiales y los flujos energéticos a nivel mundial, en otras palabras, han incrementado el metabolismo de la sociedad.

Estas graves situaciones humanas requieren un enfoque diferente, realista, co-evolutivo y capaz de analizar las deterioradas relaciones sociedad-naturaleza en el mundo actual, que pueda ser aplicable a un amplio rango de condiciones históricas y retroalimentaciones mutuas entre sistemas sociales y naturales; que sitúe la historia social dentro de la historia natural considerando la perspectiva del tiempo y que provea un marco conceptual y metodológico adecuado para la comprensión de problemas ambientales contemporáneos soportándolos con una estructura empírica cuantitativa acerca del proceso de intercambio entre el ser humano y su entorno natural (Fischer-Kowalski & Weisz, 1999). Esta nueva mirada se conoce en el mundo de las ciencias ambientales como metabolismo social.

El metabolismo se ha consolidado como un enfoque que busca estudiar las relaciones de intercambio entre el sistema social y el sistema natural en términos de ciclos de materiales y flujos de energía, y que se ha convertido en objeto de estudio desde diferentes perspectivas teóricas. Las ciencias naturales y sociales han entregado nuevas propuestas teóricas más integrales y adicionalmente han demarcado nuevos caminos metodológicos. Dentro de este universo de teorías y metodologías y producto de su interacción surge el metabolismo social como un campo del conocimiento que se ha venido enriqueciendo a través de investigaciones teóricas y prácticas en las últimas décadas entregando bases conceptuales y metodológicas para la comprensión

de las complejas dinámicas del manejo de un recurso natural ya que permite comprender la materialidad de un territorio en perspectiva histórica con miras a construir un camino hacia la sostenibilidad.

1.2 Perspectivas del metabolismo desde lo natural

El concepto de metabolismo, desde sus orígenes, proviene de los desarrollos teóricos de la física, fisiología, biología, termodinámica y más adelante ecología. Cada disciplina con aplicaciones diferentes pero en el mismo sentido de intercambio, transformación y cambio. En términos biológicos el metabolismo es entendido como el conjunto de reacciones bioquímicas que realizan las células vivas para producir sustancias complejas a partir de otras más simples con el fin de sostener la vida, reacciones en las que se usa y se transforma energía. Estas reacciones les permiten a los seres vivos el intercambio de materia y energía con el medio para sobrevivir y reproducirse (Purves et al., 1992). La suma de todos estos procesos metabólicos en las células es el metabolismo de todo el cuerpo (Beck, 1991).

Desde el punto de vista de la ecología, el metabolismo puede aplicarse desde la célula hasta el ecosistema (Odum, 1973; Odum, 1993; Odum & Barrett, 2006) pasando por todos los niveles de organización (moléculas, células, tejidos, órganos, sistemas de órganos, organismo, poblaciones y comunidades). Dentro de esta perspectiva, es común hacer referencia a los ecosistemas como espacio de interrelaciones entre las diversas comunidades de especies y las características bióticas y abióticas del medio, similar a las condiciones de los sistemas sociales, quienes se relacionan entre individuos y con su entorno. Se configura entonces el metabolismo de los ecosistemas, como la transformación de la energía y los ciclos de nutrientes que al evolucionar los lleva a formas más complejas de organización.

La perspectiva ecológica complementa la perspectiva biológica y provee conceptos para apropiarse en el análisis del metabolismo de una sociedad en términos de ciclos de materiales y la transformación de los flujos energéticos en la naturaleza. Es usual encontrar en la literatura relacionada con el metabolismo social una generalización en el concepto, en el que se habla de las interacciones entre sociedad y naturaleza en términos de flujos de materia y energía. Sin embargo, de acuerdo a los principales postulados de la ecología y de acuerdo con fenómenos físicos universales la materia no solo fluye dentro del sistema sino que es recirculada mientras que la energía, gracias a sus propiedades, fluye, se transforma y es disipada en el universo mas no es recirculada.

Una importante contribución a la ecología es la teoría general de los sistemas. Ludwig von Bertalanffy desarrolló esta teoría basado en que un estado característico de los sistemas vivos es el de ser abiertos, es decir, sistemas que mantienen un intercambio continuo de energía y materiales con el medio circundante y que se encuentran integrando un sistema cerrado más grande, global y finito (Bertalanffy, 1950). Este postulado se encuentra en consonancia con el estudio de los sistemas desde la termodinámica, la ciencia de la energía y sus transformaciones, que describe las leyes fundamentales del flujo de energía en el universo.

Los sistemas termodinámicos pueden ser abiertos (intercambios de materia y energía con los alrededores), cerrados (intercambio de energía pero no de materia) o aislados (no intercambio de materia ni energía). Esta clasificación depende de las fronteras del sistema, que corresponden a la superficie (real o imaginaria) que separa al sistema de sus alrededores. Los sistemas vivos (individuos y organizaciones sociales), son sistemas abiertos y se mantienen a sí mismos a través de intercambios materiales y energéticos con su entorno y de la continua construcción y deconstrucción de sus componentes (Bertalanffy, 1950), lo que en otras palabras podría entenderse como un metabolismo de la sociedad con el sistema ecológico que lo soporta.

Con el tiempo se han venido realizando investigaciones desde la perspectiva de los sistemas en términos de la complejidad de las relaciones entre sistemas sociales, económicos y naturales. Holling (2001) define los sistemas vivos, sociedades y naturaleza como sistemas complejos, auto-organizados y con una serie de procesos críticos que crean y mantienen esta auto-organización. La auto-organización es un término que caracteriza los sistemas complejos adaptativos, en el cual hay múltiples salidas dependiendo de las principales transiciones en la historia. Otra de las características de los sistemas complejos es la resiliencia entendida como la capacidad de mantener la funcionalidad de un sistema cuando éste es perturbado en términos de los elementos necesarios para renovarse o reorganizarse cuando la perturbación llegara a alterar su estructura y función (Holling & Meffe, 1996; Holling, 2001).

En concordancia con los anteriores postulados, Walker et al. (2002) parten del reconocimiento de los sistemas sociales y naturales, de la complejidad de sus relaciones y de la dificultad en la predicción de su comportamiento. Estos sistemas están expuestos a perturbaciones que pueden alterar su estructura y función y después de las cuales el sistema debe retroalimentarse y auto-organizarse. Los autores también señalan la importancia de los procesos clave del sistema a través de la historia, donde las decisiones tomadas hayan modificado los ecosistemas significativamente.

Los sistemas socio-ecológicos (SSE) son sistemas complejos en los que se interrelacionan históricamente los sistemas sociales y ecológicos en el marco de un complejo sistema político e institucional. A partir de la caracterización de estos sistemas y del acercamiento a la complejidad de sus relaciones es posible analizar trayectorias sostenibles e insostenibles del SSE tomando como base variables críticas determinadas para diferentes procesos históricos (Walker et al., 2002).

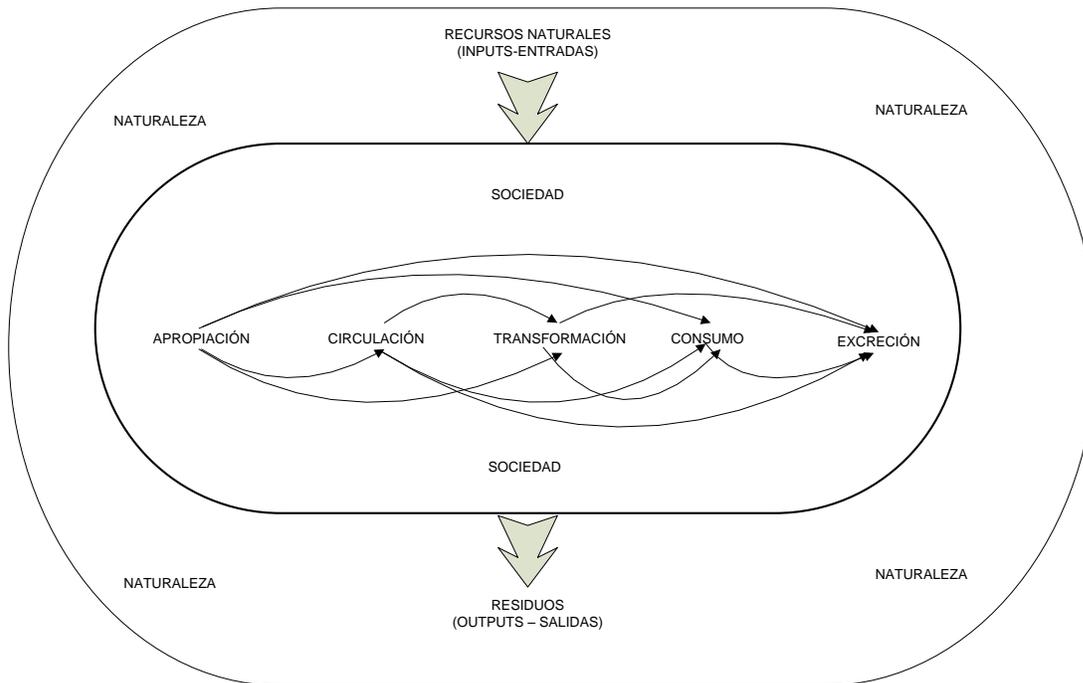
Los anteriores postulados relacionados con teorías de sistemas y termodinámica aportan al estudio del metabolismo el enfoque sistémico de intercambio material y energético, que permite identificar y comprender las interacciones entre un sistema social y un sistema ecológico. Este análisis de sistemas desarrollado desde el siglo XIX enfrenta la dualidad cartesiana, permitiendo interrelacionar lo material con lo simbólico desde el punto de vista de la complejidad de los sistemas (Fischer-Kowalski & Weisz, 1999).

1.3 El metabolismo de la sociedad

El ser humano es un sistema vivo, una especie animal y un ser social y de acuerdo con esto su comportamiento se rige por reglas naturales y sociales que configuran su propio metabolismo en relación con el entorno. En este metabolismo el hombre apropia bienes naturales, consume y circula compuestos orgánicos, aire, agua, transforma energía y produce residuos. La naturaleza es quien provee dichos bienes y es quien a su vez debe asimilar los residuos. La crisis ambiental actual ha venido revelando en los últimos años que la provisión de esos bienes tiene un límite así como la capacidad de asimilación de los residuos producidos, tanto en el agua, como en el aire y en el suelo.

Estos procesos de apropiación, consumo, circulación, transformación y excreción son los procesos metabólicos por excelencia en el metabolismo de la sociedad de manera independiente de la situación espacial y temporal (Toledo, 2008; Toledo & González de Molina, 2011). Así como este metabolismo se da de manera individual, el ser humano, como ser social, conforma organizaciones relacionándose con demás seres de su especie para facilitar su supervivencia intercambiando materiales, energía e información emergiendo un metabolismo de la sociedad como la suma de los metabolismos individuales presentes en un sistema socio-ecológico (Fischer-Kowalski, 1998).

La Figura 1 presenta el esquema gráfico de los cinco procesos metabólicos de la sociedad que se articulan en función del contexto histórico y espacial de un territorio, pues un perfil metabólico se da en un territorio específico y en un tiempo histórico determinado.

Figura 1 Proceso metabólicos entre sociedad y naturaleza

Fuente: Elaboración propia a partir de (Toledo, 2008)

De acuerdo con Toledo y González de Molina (2011) las relaciones que la humanidad establece con la naturaleza son siempre dobles, es decir, individuales o biológicas y colectivas o sociales. El individuo extrae de la naturaleza agua, oxígeno, biomasa y otra cantidad de materiales para sobrevivir y excreta calor, agua, dióxido de carbono, energía, entre otros. A nivel social, este individuo se organiza en conglomerados sociales que extraen mayores cantidades de materiales y energía para subsistir a través de diferentes plataformas tecnológicas y así mismo, excretan calor y toda una gama de residuos. A estos dos niveles de relaciones se les conoce como energía endosomática (individual) y energía exosomática (social).

Como especie, la raza humana posee instrucciones genéticas respecto del consumo endosomático de energía en su nutrición pero no con respecto al uso exosomático de energía, agua y materiales, que debe ser explicado por la historia, la política, la economía, la cultura y la tecnología (Martínez Alier, 2003). Esta diferencia entre metabolismos endosomático (biometabolismo) y exosomático (tecnometabolismo) es fundamental para entender la ecología de los humanos (Martínez Alier, 2003) y es el punto de cambio en el estudio del individuo con una estrecha y dinámica relación con su entorno dadas sus características como ser humano y ser social.

Estas dinámicas relaciones de interdependencia y reciprocidad han generado prácticas por parte de la sociedad que han transformado

el entorno así como el entorno ha modificado a su vez dichas prácticas (Fischer-Kowalski & Weisz, 1999; Toledo & González de Molina, 2011). El proceso de metabolismo de la sociedad genera una situación de determinación recíproca en la que hay una relación de correspondencia entre el sistema social y natural y en la que ambos sistemas evolucionan en el tiempo determinándose unos y otros (Toledo, 2008).

Lo anterior introduce la importancia de la historia ambiental, disciplina desde la cual se busca reivindicar el concepto de las transiciones socio-ecológicas para analizar el cambio de los perfiles metabólicos¹ de un territorio dadas sus condiciones de subsistencia. El análisis de este tipo de transiciones permite la construcción de perfiles metabólicos a través indicadores biofísicos que ofrecen perspectivas sobre las oportunidades, barreras y retos de sistemas sociales pasados y contemporáneos (Fischer-Kowalski & Haberl, 2007; Haberl et al., 2009; Fisher - Kowalski, 2011). Es interesante resaltar de lo anterior la integración de lo cualitativo desde la importancia de las transiciones históricas en un territorio y lo cuantitativo en términos de indicadores que denoten la materialidad del mismo. Es una apuesta para reconciliar las ciencias exactas y las sociales, que han estado históricamente separadas defendiendo un determinismo disciplinario que no ha llevado a entender ni a dar respuesta a los problemas reales de la humanidad.

La noción de transición implica un cambio sustancial, no necesariamente un mejoramiento pero cualitativamente un nuevo estado de un sistema, de hecho, diferentes tipos de transiciones pueden darse mientras ya hay otras en proceso (Fischer-Kowalski & Haberl, 2007). Una transición socio-ecológica, de acuerdo con Fischer-Kowalski y Haberl (2007), es una transición de un régimen socio-ecológico a otro, esto quiere decir, de un patrón fundamental de interacción entre la sociedad y los sistemas naturales. La noción de metabolismo integrada a la de transición implica que este nuevo estado cualitativo o régimen socio-ecológico distinto puede ser descrito en términos numéricos lo que se traduce en un perfil metabólico determinado.

De esta manera, las transiciones socio-ecológicas ofrecen un marco histórico para el análisis de los cambios en los regímenes socio-ecológicos (o socio-metabólicos) construyendo perfiles a través de indicadores. Estas transiciones ayudan a entender las tendencias de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza en términos materiales dependiendo de uno y otro modo de subsistencia (Gadgi & Guha, 1992; Siefertle, 2003; Fischer-Kowalski & Haberl, 2007) cada uno presentando características particulares de acuerdo a sus

¹ El perfil metabólico hace referencia a los flujos de materiales, agua o energía en un tiempo y lugar específicos. El estudio de diferentes perfiles metabólicos en el tiempo genera un análisis de metabolismo social.

interacciones sociales, a la disponibilidad de energía y a las presiones ambientales y sociales que ejercen sobre el medio natural.

Las transiciones socio-ecológicas ocurren en un espacio geográfico determinado, espacio que ha sido humanizado a través de actividades de subsistencia o de intercambio material y energético. Tello et al. (2003) han estudiado el metabolismo de la sociedad desde la perspectiva del paisaje como humanización del territorio para analizar las causas de los cambios en la configuración del territorio a través de una visión ampliada y transdisciplinar. En sus estudios acerca de la transformación del paisaje agrario mediterráneo reivindican la necesidad de vincular los estudios geográficos e históricos del paisaje con el análisis de la trayectoria de los intercambios de materiales y energía y los cambios en el uso del suelo que han venido configurando distintas huellas sobre el territorio. De esta manera interviene necesariamente la disciplina geográfica como un área fundamental en los estudios de metabolismo social.

Otro aspecto importante en el análisis de transiciones históricas es la reivindicación del papel de los agentes históricos o "constructores del paisaje" en los estudios de configuración del territorio y en los cambios del metabolismo de la sociedad a través del tiempo (Tello et al., 2003). Lo anterior significa que es necesario reivindicar la visión histórica para comprender un territorio y gestionar los recursos de manera sostenible de acuerdo con los cambios que se han configurado desde los antepasados (González Bernalde citado en Tello et al., 2003).

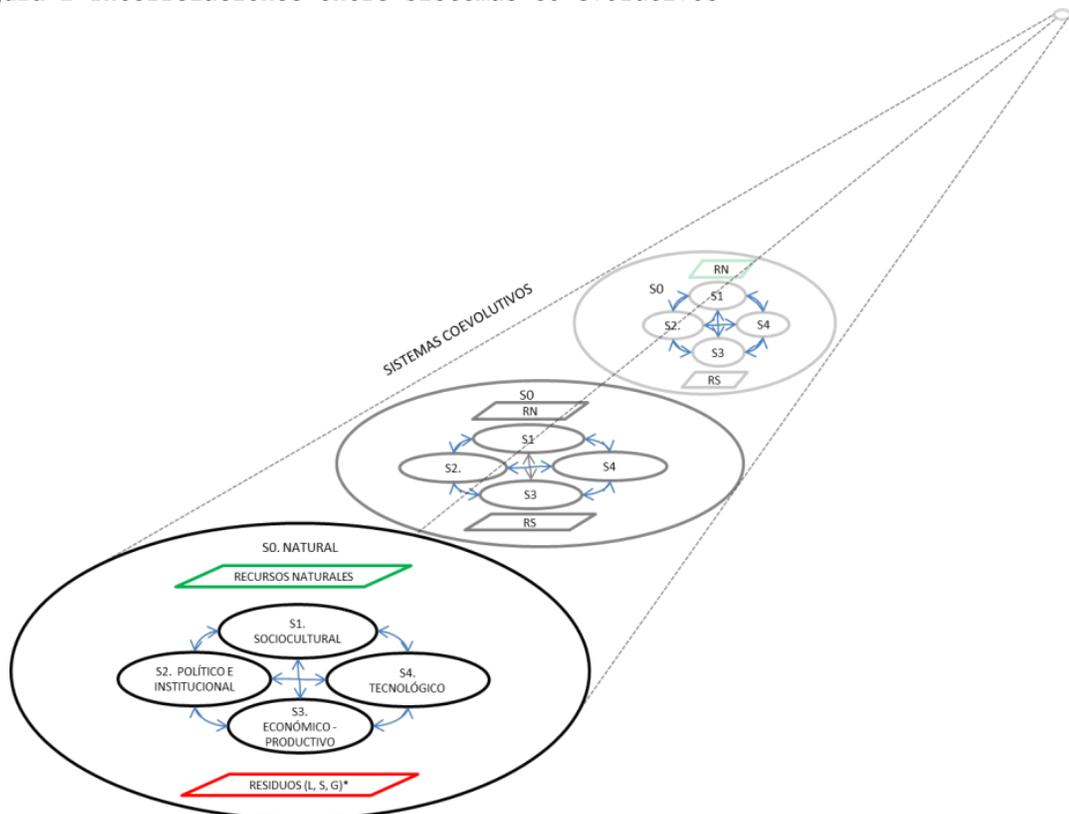
Los aportes de las ciencias naturales y aplicadas constituyen la parte física y material del metabolismo de una sociedad, lo que Toledo y González de Molina (2007; 2011) denominan como la parte dura o visible de las sociedades humanas. En términos técnicos, esta "parte dura" constituye "el blindaje energético y material", es decir los flujos de energía, agua y materiales que intercambian el sistema sociocultural y económico con el sistema natural. Sin embargo, en vista de la complejidad de las relaciones ambientales y el carácter interdisciplinar del metabolismo social, es indispensable analizar la "parte blanda", que corresponde con las formas de organización social, lo que no constituye algo material y tangible sino precisamente "invisible e inmaterial" (Toledo & González de Molina, 2007 pg 12).

Los seres humanos, agrupados en sociedad no solo comen, beben, excretan y mueren, también sienten, sueñan, imaginan, creen, conocen, inventan signos y lenguajes, establecen relaciones, hacen intercambios, transacciones y construyen instituciones de diferente naturaleza y a diferentes escalas. Es esta parte inmaterial la que articula los cinco procesos metabólicos que se llevan a cabo entre la naturaleza y la sociedad, el armazón para

los procesos materiales del metabolismo (ver Figura 1) (Toledo & González de Molina, 2007; 2011).

La Figura 2 esquematiza las interrelaciones entre los diferentes sistemas co-evolutivos; el sistema sociocultural, económico, institucional y tecnológico que están inmersos en el sistema natural, en esta red de relaciones se definen las prácticas y sistemas productivos en un determinado territorio (Velazquez, 2008). La relación entre estos sistemas se desarrolla en perspectiva temporal y cada uno de estos sistemas co-evoluciona con el otro apropiando recursos naturales (RN) y excretando residuos de diferentes tipos (líquido (L), sólido (S) y gaseoso (G)).

Figura 2 Interrelaciones entre sistemas co-evolutivos



Fuente: Elaboración propia a partir de (Gual, 2005)

1.4 El metabolismo del agua

El metabolismo social ha venido ofreciendo en los últimos años nuevos marcos de análisis y nuevos estudios que se centran en los flujos de agua; de igual manera que se han ocupado hasta el momento los estudios sobre materiales y energía. El agua, dada su complejidad y sus grandes magnitudes no ha sido analizada bajo la misma sombrilla metabólica de la energía o los nutrientes. Por lo

anterior, algunos interesados en la gestión del agua y de su sostenibilidad han generado a partir de los conceptos de metabolismo social un marco de análisis conocido en el mundo académico como metabolismo hídrico (Beltrán & Velázquez, 2011).

El metabolismo hídrico o del agua parte del concepto propuesto por Fischer-Kowalski (1997) en el que se entiende el metabolismo, en analogía al metabolismo biológico, como la cuantificación y descripción de los flujos de materia y energía que se intercambian entre el sistema económico, social, ambiental, etc. Se ha entendido el metabolismo, además de una compleja teoría, como una herramienta metodológica de cuantificación de flujos físicos que provee una información útil para analizar la sostenibilidad de un territorio.

Sin embargo, la interpretación que se realiza de esta cuantificación depende de la disciplina que la estudia y de la profundidad del análisis. Puede ser interpretado como el estudio de los flujos físicos y monetarios pero sin ninguna implicación política, social, histórica y de ordenamiento territorial. Beltrán y Velázquez (2011) explican que en la mayoría de los estudios sobre metabolismo social no se han tenido en cuenta los flujos de agua paradójicamente por la importancia cualitativa y cuantitativa de los mismos.

Se han estudiado los flujos de agua principalmente desde el punto de vista cuantitativo pero sin tomar en cuenta las interdependencias con respecto al sistema socio-ecológico en conjunto (Steurer, 1996). La idea es no entender al agua como un factor de producción dependiente del sistema económico, sino como un activo eco-social (Aguilera, 1998) en donde también intervienen las organizaciones sociales en las cuales se contextualizan los flujos de entrada y salida de agua requeridos por el sistema socio-ecológico en su conjunto.

El metabolismo del agua se propone como un marco de análisis que cuantifica los flujos de agua de los sistemas socio-ecológicos reflejando la dimensión social, ambiental, tecnológica, geográfica e institucional que corresponde a la parte intangible del metabolismo, inseparable de la parte tangible considerando el agua como eje integrador del ordenamiento de un territorio transversal a todas las actividades humanas y naturales.

Los flujos de agua presentes en este tipo de metabolismo están relacionados con los diversos usos que la sociedad tiene con respecto al agua; agrícola, industrial y doméstico y con los patrones de consumo de la población. Estos usos a su vez implican flujos internos al sistema, externos a él o flujos virtuales que no son fácilmente distinguibles. Hoekstra y Chapagain (2007) y Naredo (2009) han definido la huella hídrica de un territorio como el volumen de agua necesario para producir los bienes y servicios

requeridos por los habitantes de dicho territorio. La huella interna es aquella producida de fuentes de agua domésticas y la externa es la que se produce en otros países de acuerdo con las importaciones del territorio (Hoekstra & Chapagain, 2007). También se ha definido el concepto de agua virtual de un producto como el volumen de agua dulce utilizada para obtenerlo y que finalmente no forma parte del producto (Naredo, 2009) pero sí hace parte de un flujo de agua que es apropiado por la producción y que no se queda en el territorio sino que se transfiere a otros países en términos de las exportaciones del producto. Estos conceptos son importantes para analizar el manejo del agua desde el punto de vista del metabolismo.

1.5 La sostenibilidad en el metabolismo social

La humanidad, como sistema complejo, a lo largo de su historia ha buscado incrementar su bienestar a lo largo del tiempo, sostener sus condiciones de vida en el territorio. Así mismo, la preocupación acerca de la noción de sostenibilidad surgió de la teoría de "Los límites del crecimiento", del Club de Roma y el MIT en el año de 1972 (Meadows et al., 1972) que hacía referencia a la finitud de los recursos naturales y el umbral límite de crecimiento. Lo anterior, generó el inicio del debate acerca del desarrollo en el marco de las preocupaciones ambientales. Gracias a esto, la ONU creó en el año de 1983 la comisión sobre Desarrollo y Medio Ambiente, que en 1984 publicó el Informe "Nuestro Futuro Común", en el que se definió el desarrollo sostenible en tres pilares; ambiental, social y económico.

Marquez (1998) definió la sostenibilidad como el proceso que permite alcanzar el desarrollo y el bienestar de la sociedad, sin comprometer las posibilidades de las futuras generaciones para alcanzar las mismas metas. En este sentido comprende un equilibrio de la oferta de bienes y servicios ambientales y su demanda por parte de la sociedad. Así mismo, Márquez realizó su análisis en base a la sostenibilidad ecológica, donde plantea que los ecosistemas poseen recursos limitados y que el factor limitante para la expansión de éste es el factor mínimo, en este sentido cualquier ecosistema llega a un punto límite máximo de uso de recursos y genera un equilibrio dinámico.

Es por tanto que la sostenibilidad de los modos de vida se debe dirigir hacia la armonía en el aprovechamiento de la naturaleza sin agotarla, considerando el sistema económico, como un sistema abierto basado en entradas y salidas continuas (ciclos) de materiales y flujos de energía. Por su parte Carrizosa (2005) definió la sostenibilidad como el uso armónico de la energía y los materiales de un territorio sin exceder la renovación de los materiales ni la capacidad de carga del sistema.

En correspondencia con lo enunciado por Marquez y Carrizosa, Toledo y González de Molina (2011) hicieron una referencia a la sostenibilidad en función del metabolismo social. Los autores se refirieron al equilibrio dinámico en los ecosistemas y a sus capacidades de auto-mantenerse, auto-regularse y auto-reproducirse independientemente de los sistemas humanos. Bajo el reconocimiento de esta dinámica en el ecosistema, que actúa como objeto de apropiación y como depósito de residuos resulta indispensable que la sociedad mantenga un metabolismo adecuado pues toda sociedad permanece en el tiempo, es decir que es sostenible, cuando logra funcionar sin afectar la reproducción de su base material.

Dentro del proceso metabólico la sociedad no apropia elementos aislados, sino un conjunto o una totalidad holística y sistémica, lo que lleva a reconocer que un estudio sobre el manejo de un recurso natural será válido en tanto se tengan en cuenta las capacidades y umbrales de los ecosistemas que forman la base material del sistema socio-ecológico y que se visibilizan en diferentes unidades de paisaje (Holling, 2001; Toledo & González de Molina, 2011). El concepto de umbrales o límites del sistema, así como se mencionaba en los estudios de Bertalanffy y de la termodinámica, es fundamental para analizar la sostenibilidad de un territorio en términos de un "metabolismo adecuado". "Cada fragmento del espacio natural posee un límite (teóricamente reconocible) para su adecuada apropiación, más allá del cual se atenta contra su capacidad de renovación y, finalmente, contra su existencia" (Toledo & González de Molina, 2011 pg 76).

Estos autores, en función del proceso metabólico de la apropiación, plantearon tres supuestos derivados de la teoría ecológica que darían las luces de una apropiación adecuada lo que podría pensarse como una apropiación sostenible. El primer supuesto se basó en el reconocimiento de las unidades ambientales o paisajes que conforman el espacio que se apropia a través del conocimiento de factores físicos, geomorfológicos, bióticos, climáticos, entre otros. El segundo se basó en reconocer el potencial productivo de cada unidad identificando límites, umbrales y potencialidades como la vocación de los espacios naturales. Finalmente, el tercero se basó en optimizar el proceso de apropiación obteniendo el máximo flujo material, energético e hídrico con el mínimo esfuerzo sin poner en peligro la capacidad de renovación de los sistemas naturales (Toledo & González de Molina, 2011).

El sistema natural se encuentra en un proceso de constante transformación y sucesión que lo conduce a formas más complejas de organización pero siempre dentro de sus límites (Marquez, 1998). El sistema humano es parte integrante del sistema natural y sus formas de desarrollo efectivamente llevan a formas más complejas de organización, sin embargo el sistema humano actual entiende el

desarrollo como crecimiento económico únicamente un crecimiento que no conoce límites. En sentido contrario a esta tendencia actual, el desarrollo debe ser entendido como un proceso que lleva al sistema humano a formas más complejas de organización a nivel social, económico y ecológico y que es sostenible en la medida en que se consideran los límites de su crecimiento.

Desde hace aproximadamente una década que ha empezado a reconocer el metabolismo social como herramienta para la sostenibilidad (Giampietro et al., 2000; Giampietro et al., 2001). Los autores han resaltado que el concepto de metabolismo social hace posible estudiar la viabilidad de diferentes formas dadas de metabolismo de la sociedad de acuerdo al análisis de la dinámica de sistemas, un análisis que permite visualizar las relaciones de intercambio entre los sistemas y del cual no se puede esperar un indicador simple pues incluye variadas y complejas relaciones. Giampietro et al. (2000) plantearon de una manera acertada que las representaciones de las relaciones sociales con su entorno requieren de manera obligada un análisis multi-criterio y multi-nivel si se quiere abordar la sostenibilidad y abordar el estudio de la complejidad de los sistemas evolutivos que como característica fundamental se auto-organizan y adaptan a los cambios.

Alcanzar la sostenibilidad es una tarea compleja, especialmente por la gran transformación a nivel planetario que debe ocurrir para que se encamine la humanidad en este sentido. Fischer-Kowalski y Haberl (2007) han discutido que la sociedad industrial actual está tan lejos de ser la sociedad sostenible del futuro así como está alejada de la sociedad agrícola tradicional y que la sostenibilidad es una tarea fundamental de reorientación tanto del sistema económico como del sistema social. Marx, por su parte se acercó a las nociones de sostenibilidad al soñar una sociedad de productores asociados quienes fueran los gobernantes del metabolismo social en la naturaleza (Foster, 2000). Sin embargo, en el marco de un régimen de mercado como el dominante y salvaje capitalismo, una sociedad de pequeños productores debe luchar para no estar al servicio del sistema e inmerso en la acumulación de capital, favoreciendo la ganancia del gran productor y empujando y desvirtuando al pequeño productor campesino. Las alternativas locales deben fortalecerse, el cambio debe ser radical y transformador.

1.6 Desafíos del metabolismo para América Latina

El metabolismo social o socio-ecológico como enfoque teórico del cual se deriva un trazado metodológico corresponde a contextos espacio temporales definidos por el territorio de estudio. Lo anterior se concluye del bagaje teórico ofrecido por los autores

que en los párrafos anteriores se han contrastado. Sin embargo, como se mostrará en el capítulo siguiente (Tendencias en los estudios de metabolismo social), estos estudios principalmente corresponden al contexto particular de territorios europeos con procesos diferenciados de las naciones latinoamericanas, en las que sobresalen las dinámicas ambientales complejas debido a la ubicación geográfica, la biodiversidad y la variabilidad climática.

Por una parte se encuentran las condiciones diversas que en términos ecológicos, biológicos y socioculturales han determinado a los territorios latinoamericanos y por otra está la asimetría de la información disponible para construir el armazón numérico sobre el cual se basa el metabolismo social. La zona intertropical en la cual se encuentran nuestros países ofrece condiciones climatológicas, hidrometeorológicas, edafológicas y geofísicas particulares que hacen necesaria una adaptación metodológica en el análisis metabólico puesto que no es posible el uso indiscriminado de los programas y bases de datos generados por los investigadores de otras latitudes a partir de condiciones diferentes. El desafío de la diversidad hace que la disponibilidad de biomasa, de agua, de energía, el aporte de materia orgánica, la velocidad de su descomposición y demás variables marquen una fuerte diferencia no sólo con países europeos sino incluso dentro de nuestros mismos países.

La asimetría de la información está representada principalmente en la carencia de datos, incoherencia y dispersión entre diferentes fuentes, incluso de carácter oficial, y en muchas ocasiones, el uso de diferentes metodologías de estimación y medición de variables e indicadores, tanto biofísicos como sociales y económicos que serían la base para la construcción de perfiles metabólicos. Adicionalmente es probable encontrar fuertes vacíos de datos en grandes espacios temporales que desvirtúan una extrapolación indiscriminada. Finalmente, es necesario resaltar las grandes diferencias que inclusive dentro de Colombia se presentan en términos socioculturales y los procesos propios que ha tenido nuestra cultura.

Por todo lo anterior, el estudio del metabolismo social se presenta como un gran desafío para la comunidad de investigadores latinoamericanos quienes debemos integrarnos a estas nuevas apuestas teóricas y metodológicas de manera analítica y crítica de acuerdo a nuestro contexto ecológico y sociocultural con el objetivo de generar productos de utilidad para nuestra población y para las dinámicas que permean la explotación indiscriminada de nuestros recursos naturales.

2. Tendencias en los estudios de metabolismo social

En este capítulo se presentan las principales tendencias en las investigaciones realizadas acerca del metabolismo social, el metabolismo social relacionado específicamente con el agua y algunos modelos para el análisis de la sostenibilidad. Se presentarán avances teóricos y prácticos a nivel internacional y latinoamericano concluyendo con los aportes que se han realizado desde Colombia.

El surgimiento del metabolismo social como enfoque para la sostenibilidad se remonta a Karl Marx en su análisis del capitalismo y la apropiación de la naturaleza por parte del hombre a través del trabajo (Fischer-Kowalski, 1998; Martínez Alier, 2003, 2004; Toledo & González de Molina, 2007; Toledo, 2008). Sin embargo, los desarrollos a nivel práctico en este tema se vienen dando desde la década del sesenta en términos de análisis de flujos de materiales a un nivel nacional, cuando se hicieron visibles los efectos que el crecimiento económico tenía sobre el ambiente.

A partir de esta época, diferentes instituciones y países han utilizado este enfoque metodológico para analizar los flujos de materiales y energía en sus sistemas económicos (Institute for Interdisciplinary Research and Continuing Education de la Universidad de Viena en Austria, el Wuppertal Institute for Climate, Environment and Energy de Alemania, World Resources Institute, Agencias Gubernamentales de Italia, Holanda y Japón). Si bien el énfasis de estos estudios se ha dado en los países desarrollados en los últimos años se han elaborado estudios similares para economías latinoamericanas (Eisenmenger et al., 2007; Vallejo, 2010). Estas aplicaciones prácticas del enfoque de metabolismo han sido útiles para analizar los flujos físicos de las economías nacionales para análisis globales.

En un nivel más local, en España se ha avanzado en el metabolismo del sector agrario (González de Molina & Guzmán Casado, 2007) aportando aspectos metodológicos y analizando los diferentes atributos de la sostenibilidad agraria y se han realizado interesantes aportes en la construcción teórica de los procesos de apropiación de la naturaleza y de la huella que imprime las

sociedad en los territorios en los que cohabitan (Tello et al., 2003; Cussó et al., 2006; Tello et al., 2008). A nivel latinoamericano, más precisamente en México, Toledo (2008) ha aportado significativamente a la construcción teórica del metabolismo rural y ha generado debates pertinentes en torno a la integración de la parte inmaterial del metabolismo, que generalmente se torna invisible frente a los estudios cuantitativos. Es interesante mencionar que el punto de vista latinoamericano resalta el papel del campo en el metabolismo probablemente porque nuestros países tienen una historia agraria que perdura en el tiempo, que se ha visto traslapada con los procesos de industrialización y que han degenerado dinámicas importantes de cambio en la parte ambiental.

El metabolismo también ha sido aplicado a estudios de menor escala, casos prácticos con comunidades locales de Latinoamérica se observan en Guatemala con las comunidades campesinas Q'eqchi' y la expansión de la agro-industria de caña de azúcar y palma africana (Mingorría & Gamboa, 2010) y en Bolivia Ringhofer (2010) realizó un estudio para analizar las transiciones socio-ecológicas de la comunidad indígena de los Tsimane'.

En relación al agua, el metabolismo social ha sentado las bases para el desarrollo de una nueva metodología para el estudio del manejo y la gestión del agua, el metabolismo hídrico. Velazquez (2008) ha estudiado los flujos de agua desde esta perspectiva como instrumento para la gestión sostenible del agua señalando la necesidad de profundizar en los estudios conceptuales y metodológicos de los flujos hídricos en los procesos socioeconómicos. Madrid y Velazquez (2008) concluyen de su estudio sobre metabolismo hídrico en el sector hortofrutícola Andalúz que los flujos físicos del agua y su impacto sobre el sistema natural deben ser incluidos en el análisis de flujo de materiales de un sistema social y económico. De acuerdo con las autoras, la magnitud de flujos, la disponibilidad y la territorialidad hacen del agua un interesante tema de estudio en términos de metabolismo social.

Naredo (2009) realizó un estudio sobre el agua virtual y la huella hidrológica de la Comunidad de Madrid, resaltando que estos indicadores han aumentado un 75% en 2005 con respecto al período 1984 -1995. Dentro de los resultados más importantes a ser resaltados el agua virtual que entra por importaciones es tres veces más alta que la que entra por precipitación y 14 veces mayor que la entra por riego y abastecimiento teniendo en cuenta que un porcentaje del agua virtual que importa la Comunidad de Madrid la reexporta en otros productos. Este estudio realiza una comparación importante con los resultados de Chapagain y Hoekstra (2004) en el que presentan la huella hídrica de las naciones. Naredo (2009) esboza diferencias significativas con los resultados que para España mostró el mencionado estudio cercanas a un 20% de

diferencia debido fundamentalmente a las bases de datos que se habían utilizado para los cálculos.

Desde la perspectiva latinoamericana, Loreto (2009) ha consolidado un importante grupo de investigación a nivel mexicano sobre la historia ambiental del agua y el metabolismo hídrico de la ciudad de Puebla y sus alrededores, estudios integrales con la comprensión biofísica y ecológica del ciclo del agua (superficial y subterránea) y con la comprensión de los procesos sociales, económicos e históricos del territorio de estudio. Puebla una ciudad que se soporta, así como Bogotá, en sus ecosistemas aledaños y cuyo abastecimiento de agua se ha visto afectado por el crecimiento de las industrias textiles y de generación de energía hidroeléctrica en la cuenca del río. En Colombia, Díaz (2011) realizó un estudio sobre el metabolismo urbano como una herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental fundamentándose en los balances de agua, energía y alimentos reivindicando la visión de ciudad como ecosistema complejo.

En términos de análisis para la sostenibilidad, Giampietro et al. (2001) desarrollaron un modelo de análisis multiescalar integrado de metabolismo social (MSIASM - Multiple-Scale Integrated Assessment of Societal Metabolism) con el fin de evitar los errores implícitos en las herramientas analíticas que se reducen a un solo criterio y tratando de preservar, tanto como sea posible, la complejidad implícita en la variedad de fuentes de información relacionadas con la sostenibilidad. Posteriormente, en 2008, Giampietro y otros proponen una especie de ajuste sobre este primer modelo resultando en el modelo MuSIASEM (Multi-Scale Integrated Analysis of Societal and Ecosystem Metabolism), un intento de generar una metodología capaz de hacer un control de calidad y un análisis cuantitativo aplicado a la sostenibilidad.

Recientemente, Madrid y Cabello (2011) y Madrid et al. (2013) han planteado la perspectiva de los análisis de sostenibilidad en el tema del agua desarrollando metodologías de análisis integrado multiescalar que habían sido desarrolladas, como se mencionó, para el análisis de los flujos de materiales y energía.

Finalmente, se debe mencionar que los estudios a nivel de agua en términos de metabolismo social han sido trabajados principalmente desde la perspectiva económica. Esto puede ser debido a que en términos cuantitativos es posible relacionar los flujos físicos con los flujos económicos de agua lo que para dimensiones ecológicas o socio-culturales puede ser un desafío mayor. A pesar de lo anterior, se han desarrollado trabajos como los de Loreto (2009) en México en los cuales se resalta la perspectiva histórica y las dinámicas sociales que han permeado el territorio, sin embargo, en términos de metabolismo hídrico falta todavía un trecho interesante por andar en términos de la cuantificación de variables inconmensurables como las socioculturales e históricas.

Es preciso desarrollar y adaptar estas nuevas metodologías para el entendimiento del complejo ciclo del agua, un ciclo integral ecológico, económico y social. La Tabla 1 presenta un resumen de los estudios mencionados en las tendencias de las investigaciones sobre metabolismo social.

Tabla 1 Tendencias en los estudios de metabolismo social

	Año	Temas	Autor	Lugar	
SIGLO XIX	1860	Metabolismo social y quiebre metabólico	Karl Marx	Inglaterra	
SIGLO XX	1960-2000	Metodologías análisis flujo de materiales y energía	IFF	Austria	
			Wuppertal Institute	Alemania	
			Eisenmejer <i>et al.</i>	Brasil, Chile y Venezuela	
			Vallejo	Ecuador	
	2007	Estudios Locales	Gonzalez de Molina y Casado	Andalucía	
	2003-2008		Tello <i>et al.</i>	Cataluña	
	2008		Toledo	México	
	2010		Ringhofer	Bolivia	
	2010		Mingorría y Gamboa	Guatemala	
	2008		Agua	Velázquez	Andalucía
	2008			Madrid y Velázquez	Andalucía
	2009			Naredo	Madrid
	2009	Loreto		México	
	2011	Díaz		Bogotá	
	2000-2001	MSIASM - MuSIASEM	Giampietro <i>et al.</i>	Barcelona	
	2011	MuSIASEM al agua	Madrid y Cabello		
	2013		Madrid <i>et al.</i>		

3. Paso a paso en el metabolismo social del agua

El propósito de esta investigación ha sido generar criterios desde el metabolismo social que permitan analizar la sostenibilidad de un recurso natural como el agua en un territorio que comprende un tramo de la cuenca alta del Río Bogotá. La complejidad juega un papel fundamental en este estudio, en tanto las relaciones a analizar son numerosas e involucran diferentes dimensiones.

Por una parte está el metabolismo, que no es un marco teórico elemental, más bien un conjunto complejo de interacciones disciplinarias que se traducen en un cúmulo de teorías que le apuestan a analizar la sostenibilidad del intercambio material y energético del hombre y la naturaleza. Por otra parte está el agua, una temática que integra múltiples relaciones con todas las esferas naturales y humanas, un ordenador natural del territorio y un elemento vital en el funcionamiento de los sistemas naturales y humanos.

Finalmente, el metabolismo social y el manejo del agua se entrelazan para ser marco de análisis del tramo norte de un río como el río Bogotá, que ha sido víctima de la contaminación vertida por sus usuarios y de las intervenciones que se han realizado sobre él que han modificado su cauce y su régimen de flujo. Desde su nacimiento hasta su desembocadura el río Bogotá atraviesa diferentes poblaciones y una ciudad capital en donde se han desarrollado actividades económicas que utilizan y vierten agua de manera intensiva, y en ocasiones, sin tratamiento alguno sobre el río. Lo anterior, ha llevado a generar situaciones de riesgo de desabastecimiento de agua debidas a la contaminación.

Este estudio se centra en el tramo norte del río Bogotá comprendido entre los municipios de Villapinzón y Tocancipá, en donde se presenta una grave situación de riesgo de desabastecimiento de un porcentaje de la población capitalina y de municipios aledaños por la contaminación que se vierte directamente sobre el río, que ha dificultado el tratamiento del agua y por supuesto su distribución a los usuarios.

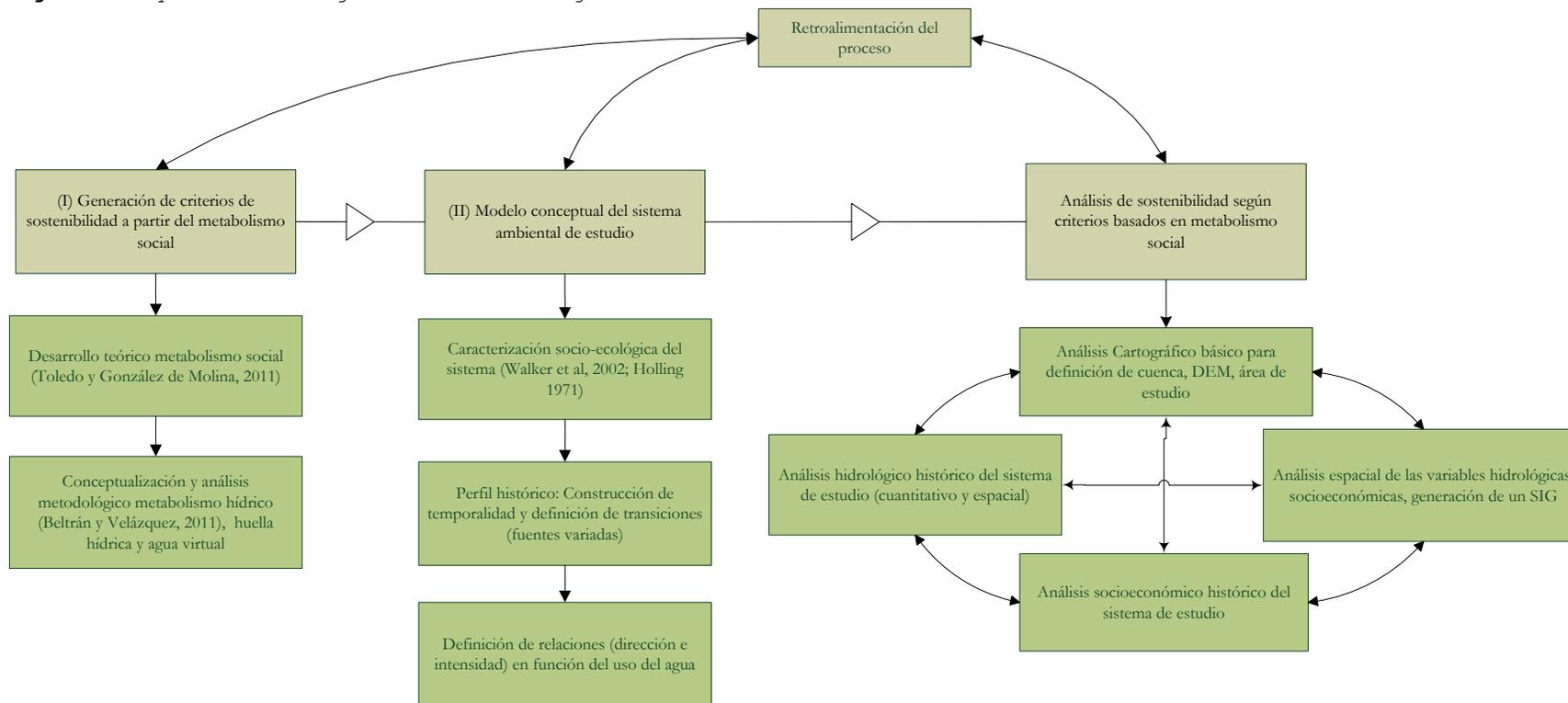
Por todo lo anterior, para abordar esta situación se requiere una metodología de igual complejidad. Durante el estudio, se integra el marco de análisis del metabolismo del agua al sistema socio-ecológico que compone el río Bogotá en su extensión comprendida entre los municipios de Villapinzón y Tocancipá durante la segunda mitad del siglo XX. Debido a que es un área extensa, el estudio no abarca la cuenca en su totalidad sino las micro-cuencas que han sufrido mayor presión y que drenan al río Bogotá donde se han establecido actividades de curtido de pieles, floricultura e industria manufacturera.

Es importante analizar la relación de la cantidad y de la calidad del agua por cuanto estas dos variables tienen una relación directa, la cantidad de agua disponible está en función de su nivel de contaminación. Este estudio busca aproximarse a las bases para un análisis integral de la sostenibilidad de los recursos naturales, en particular, del agua en la cuenca alta del río Bogotá.

Debido al carácter interdisciplinar de este estudio y a la complejidad que requiere el concepto de sostenibilidad, la metodología de esta investigación se compone de una combinación complementaria de metodologías de diferentes disciplinas del conocimiento. Esta investigación se aproxima a **lo físico** desde el punto de vista del análisis del ciclo del agua y sus diferentes variables como precipitación, evaporación, temperatura, entre otras. También aborda **lo histórico**, desde el análisis del territorio en el tiempo, de los principales ejes de usos del agua en la zona a partir de la segunda mitad del siglo XX que ayuden a entender los cambios tanto en aspectos socio-económicos como en aspectos ecológicos y físicos. **Lo geográfico** es analizado desde la integración de variables temporales y espaciales en una herramienta cartográfica que aporta a la comprensión de las interrelaciones entre los sistemas sociales y económicos que se encuentran asentados en la ribera de un sistema natural como el río Bogotá.

De esta manera, el camino que recorre esta investigación para lograr el objeto de estudio se compone por dos fases: (1) Generación de criterios de sostenibilidad a partir del metabolismo social (2) Modelo conceptual del sistema ambiental de estudio en función de los usos del agua. Con los insumos aportados por estas dos fases se generan las bases para analizar la sostenibilidad del manejo del agua del sistema de estudio desde el metabolismo social. En la Figura 3 se presenta el esquema metodológico de esta investigación.

Figura 3 Esquema metodológico de la investigación



Fuente: Elaboración propia

3.1 Generación de criterios de sostenibilidad derivados del metabolismo social

Con esta etapa se pretende sentar la base teórica de análisis que se realizará del uso del agua en un tramo del río Bogotá. El propósito de esta etapa es generar criterios derivados del metabolismo social que permitan analizar la sostenibilidad del uso del agua en el sistema de estudio. Para ello se aborda con detalle el desarrollo teórico que han realizado Toledo y González de Molina (2011) sobre el metabolismo social y cada uno de los procesos metabólicos que lo componen para extraer de allí criterios para analizar la sostenibilidad. Debido a que este desarrollo teórico no ha sido exclusivamente para agua sino en general para flujos de materiales y energía, se analiza esta teoría en función del uso del agua y de cómo se darían los procesos metabólicos de apropiación, circulación, transformación, consumo y excreción al analizar únicamente el flujo de agua en el sistema de estudio.

Posteriormente, se aborda el trabajo de Beltrán y Velázquez (2011) debido a que desarrollan el concepto de metabolismo hídrico a partir del concepto de metabolismo social y se nutren los criterios que se han generado con el análisis teórico y metodológico de las autoras. Con base en estos autores se determinan los criterios con los cuales se analiza la sostenibilidad en el uso del agua de la región de estudio. Es necesario acotar que debido a la naturaleza compleja del estudio, a la extensa área de trabajo y a la multiplicidad de relaciones que se generan en torno al agua se definen unos ejes principales que han determinado el uso del agua de la zona en el período de estudio y sobre ellos se realiza el análisis final.

3.2 Modelo conceptual del sistema ambiental de estudio

En esta fase se genera un modelo conceptual de las relaciones entre los subsistemas que se ven involucrados en el estudio. Para lo anterior se realiza una caracterización integral de la zona, se define el área del estudio y se aborda desde diferentes perspectivas para establecer las relaciones de intercambio entre los componentes de cada subsistema. Sin pretender negar complejidad que caracteriza a este estudio pero con el ánimo de hacer manejable la comprensión del sistema desde diferentes perspectivas y su integración con miras a un análisis de sostenibilidad, la caracterización, la recolección de información y sobre todo el análisis final se realizan desde las dimensiones física, histórica y espacial. Lo histórico recoge las variables

socio-económicas y en lo espacial y físico se analizan las relaciones ecológicas que son determinantes en un área como una cuenca hidrográfica.

De esta manera, se busca superar el mecanicismo y pensamiento lineal con el que han sido estudiadas problemáticas relacionados con el manejo del ambiente (Pahl-Wostl, 2009), una compleja red de interacciones que deben ser estudiadas de manera integral, compleja y sistémica. Se aborda el reto de trascender cada disciplina y poner una frente a otra, contrastando resultados de dinámicas diferentes pero que se dan en el mismo tiempo y territorio.

La caracterización y generación del modelo conceptual del sistema se realiza bajo la perspectiva de los sistemas complejos siguiendo algunos de los pasos que Walker et al. (2002) desarrollan en su trabajo sobre un modelo conceptual para el manejo de la resiliencia. En este estudio se asume que cuando un análisis incluye sostenibilidad a largo plazo los sistemas socio-ecológicos se comportan como sistemas complejos y así mismo tienen características como la incertidumbre, la capacidad adaptativa y la resiliencia (Walker et al., 2002).

La base para realizar este modelo es la recopilación y análisis de información primaria y secundaria de la zona de estudio. El trabajo de campo que contribuye a la caracterización del sistema se realiza en tres de los cinco municipios que se localizan en el cauce principal del río Bogotá, considerándolos municipios de control por su ubicación estratégica; Villapinzón, Suesca y Tocancipá. Sin embargo, se realizan visitas de reconocimiento por todo el recorrido del río para identificar las actividades que se desarrollan sobre la ribera. La información se clasifica en las siguientes dimensiones:

- Física: Se recopila y analiza la información hidrológica de las estaciones hidrometeorológicas que se encuentran instaladas desde 1970 aproximadamente y operando en la actualidad. Las variables que se analizaron para la construcción de un balance hídrico fueron: precipitación (20 estaciones), temperatura (2 estaciones), evaporación (2 estaciones) y caudal (3 estaciones). Las variables, estaciones, unidades y fuentes de información utilizadas para el análisis hidrológico son presentadas en el Anexo A.

Una vez revisada la información que aportan los registros hidrológicos se observa que la información está disponible para la totalidad de las estaciones desde 1985, la década anterior ya se habían instalado los equipos de medición, sin embargo los registros no se encuentran para todas las estaciones. Debido a que la información se encuentra incompleta para las décadas del 70 y 80 se analizarán entonces tres períodos de estudio; 90, 2000,

2012. El Anexo A contiene la metodología detallada para el análisis hidrológico y los valores mensuales por décadas de cada estación.

- **Histórica:** Se hace una revisión y clasificación de fuentes disponibles para el período de estudio; informes, libros, tesis de grado y material de archivo en los que se identifican procesos de transición y cambios importantes en la relación de las comunidades con el uso del agua en torno al río desde su captación hasta su vertimiento. Para acotar este análisis se hace necesario la definición de ejes fundamentales que han determinado los usos del agua en la zona de estudio desde la segunda mitad del siglo XX, estos ejes son: curtido de pieles, floricultura e industria². Sobre estos ejes se consulta información específica en censos nacionales e información oficial disponible buscando alimentar una base de datos sobre dichos ejes en diferentes períodos de tiempo. Se visitan tres archivos municipales (Villapinzón, Suesca y Tocancipá) con el objetivo de ubicar evidencias históricas cualitativas y cuantitativas del uso del agua de cada eje del estudio.

- **Geográfica:** Se genera un modelo digital de elevación, se delimita la cuenca de trabajo y se realiza la delimitación final del área de estudio en función del río Bogotá y las principales micro-cuencas que son presionadas por las actividades económicas en términos de uso y descarga. Se realizan 3 visitas de campo que permiten conocer y geo-referenciar algunos puntos en los que se observan los ejes de estudio definidos en la dimensión histórica. Se construye un Sistema de Información Geográfica (SIG) en el que se integra la información histórica analizada susceptible de ser espacializada.

La primera salida tiene como objetivo reconocer el territorio, geo-referenciar puntos cruciales para el estudio de acuerdo con factores direccionadores del uso del agua en la región, conocer a la comunidad y al municipio y ubicar archivos y centros de documentación e información de utilidad para analizar la relación de los pobladores con el río desde la segunda mitad del s XX hasta la actualidad. El objetivo de la segunda salida es verificar la información primaria y secundaria revisada y analizada y la información recopilada en la primera salida de campo.

² El uso del agua en los sectores doméstico y agrícola no se incluyó en este estudio debido a que se consideran extensos y complejos en términos hídricos debido a la variación en los asentamientos humanos y a la existencia de cultivos de papa, fresa y variedad hortícola. Por lo anterior, estos usos deben ser analizados de manera independiente y luego integrarlos con este análisis. Adicionalmente el estudio de los sistemas agrícolas en esta región debe incluir un análisis del desplazamiento de la agricultura tradicional por prácticas industriales y agroindustriales y en términos de uso doméstico debe tenerse en cuenta la población flotante.

Adicionalmente, se realizan 17 entrevistas en campo a diferentes personas que habitan la ribera del río con el fin de comprender su relación con el agua en su infancia y en la actualidad.

Finalmente, el estudio concluye integrando los resultados obtenidos en la etapa I y II. El modelo conceptual que se genera sobre el sistema de estudio en función del uso del agua, se analiza bajo los criterios derivados del metabolismo social para el caso del agua. Es preciso mencionar que este universo teórico y metodológico es muy extenso y el análisis final podría realizarse sobre muchas variables de estudio. En este caso se realiza únicamente sobre el uso del agua internamente en la región definida y se analizan a fondo únicamente las dimensiones y ejes que se explican en la etapa II.

Se definen las entradas y salidas de agua del sistema en el modelo conceptual y de los subsistemas que lo componen para identificar flujos de entrada, salida e intermedios y analizar los procesos ocurridos en el tiempo asociados a estos flujos. La sostenibilidad del manejo del agua se analiza desde las perspectivas física y social con el fin de hacer un análisis integral en términos de los flujos físicos históricos de agua y sus efectos en el sistema socio-ecológico.

La sostenibilidad desde la perspectiva física se analiza en términos de la cantidad (balance hídrico) y la calidad de agua. Desde el punto de vista social se analizan las relaciones entre comunidades locales, instituciones, políticas e instrumentos de planeación. Para este último análisis se tienen en cuenta las entrevistas realizadas a los habitantes de la cuenca en función de su relación con el agua y especialmente con el río Bogotá.

4. Metabolismo social del agua en la Cuenca Alta del Río Bogotá

De acuerdo al camino proyectado para esta investigación este capítulo se compone de tres partes. La primera es el análisis de los criterios derivados del metabolismo social que permiten analizar la sostenibilidad de un recurso natural como el agua. La segunda es la generación de un modelo conceptual del sistema de estudio para el que se caracteriza ambientalmente el territorio que se estudia en el tiempo y en el espacio. Finalmente estas primeras etapas confluyen en una tercera en donde se hace una aproximación a un análisis de sostenibilidad del manejo del agua en la Cuenca Alta del río Bogotá a partir de los criterios analizados.

4.1 Generación de criterios de sostenibilidad derivados del metabolismo social

A partir del estudio del metabolismo social (Toledo & González de Molina, 2011) es posible encontrar criterios importantes para el análisis del uso de un recurso natural desde la concepción misma del concepto de sistema. El concepto de sistema involucra **límites y umbrales** que son quienes determinan en primera medida el alcance espacial y temporal de la sostenibilidad. Estos límites naturales definen valores óptimos para el equilibrio dinámico del sistema³ y la sostenibilidad de un recurso depende del tiempo que los demás sistemas sociocultural, económico, institucional y tecnológico se acerquen a dichos límites.

Dentro del concepto de sistema también se encuentran las **interrelaciones** como patrones significativos de cambio. Como se

³ Se hace referencia al equilibrio dinámico dando por hecho que el equilibrio en los sistemas vivos (sistemas termodinámicos abiertos) no se alcanza de manera estática sino que siempre hay un movimiento constante, lo que define el estado de equilibrio dinámico.

observa en la Figura 2 el sistema sociocultural (S1), el sistema institucional (S2), el sistema económico-productivo (S3) y el sistema tecnológico (S4) se encuentran interrelacionados unos con otros y a la vez inmersos en el sistema natural (S0), todo este conjunto de sistemas y sus relaciones deben ser entendidos para analizar la intensidad de dichas relaciones y la manera en que han influido sobre los cambios en los flujos de agua principalmente.

Las **escalas temporales y espaciales** son criterios importantes a ser definidos en un horizonte de análisis de sostenibilidad. Como se estableció anteriormente, un sistema debe ser definido en términos de sus límites espaciales, sin embargo, para analizar la sostenibilidad de dicho sistema es fundamental tener un horizonte de tiempo definido sobre el cual se sitúe el análisis y sobre el cual se puedan comparar para el mismo sistema diferentes momentos en el tiempo en términos de flujos materiales y relaciones inmateriales.

Otro aspecto importante para un análisis de sostenibilidad en el metabolismo social es el análisis de **transiciones socio-ecológicas** del sistema de estudio. El estudio de estas transiciones favorece la comprensión de momentos de cambio, suave o abrupto, en el sistema y de las capacidades del mismo para recuperarse o adaptarse a los cambios. Con ayuda de las transiciones es posible identificar variables importantes que han determinado el uso del agua en diferentes épocas en el tiempo y hacer un seguimiento temporal de las mismas para ver a fondo el comportamiento del sistema.

De acuerdo con Toledo y González de Molina (2011) los procesos metabólicos por excelencia son: la apropiación, circulación, consumo, transformación y excreción. En su teoría, los autores plantean tres pautas en la que se debe realizar el proceso de apropiación para que sea sostenible. Este se basa en tres principios fundamentales:

(1) El reconocimiento de las diferentes unidades de paisaje (o unidades ambientales) que conforman el sistema de estudio identificando factores geomorfológicos, bióticos, climáticos en una escala determinada.

(2) La identificación del potencial productivo de cada una de las unidades, es decir, la identificación de los límites, umbrales y potencialidades del sistema con miras a identificar lo que los autores llaman la vocación de los espacios naturales, esto es, para lo cual deben usarse dichos espacios.

(3) La optimización de la apropiación, es decir la obtención del máximo flujo de energía, materiales y agua con el mínimo esfuerzo y sin poner en peligro la capacidad de renovación del sistema.

Según lo anterior, una apropiación por encima de la vocación productiva es considerada un forzamiento ecológico y el costo de este forzamiento se expresa en una baja producción, en altos costos de adecuación, uso excesivo de agroquímicos, entre otros.

Los autores han planteado también tres formas de apropiación de espacios naturales, una de ellas es la naturaleza domesticada (Toledo & González de Molina, 2011 pg 78) en la cual el ser humano ha desarticulado los ecosistemas de los que se ha apropiado, generando desequilibrios con la introducción de nuevas especies y atentando contra la capacidad de renovación del sistema. Las otras dos formas de apropiación tienen que ver con la naturaleza intervenida (sin cambios sustanciales en la estructura y función como la pesca y recolección) y naturaleza conservada donde ya se han dado procesos de conservación. El sistema que se estudia en esta investigación se considera parte de la naturaleza domesticada pues los grupos sociales en este caso han apropiado los bienes y servicios ofrecidos por las diversas unidades de paisaje alterando y cambiando el entorno y su equilibrio.

A pesar de que los anteriores autores se han basado en el análisis de la apropiación, los demás procesos metabólicos (transformación, consumo, circulación y excreción) también deben generar pautas hacia la sostenibilidad. Las esferas rurales realizan procesos de apropiación, sin embargo esferas de mayor poder como grandes industrias se apropian de bienes y servicios, como los que brinda el agua, que antes eran aprovechados por los campesinos alterando no solo el equilibrio ecológico sino el equilibrio social. Estas nuevas esferas aumentan las prácticas de transformación en ocasiones haciendo uso indiscriminado e ineficiente de materiales y energía y haciendo el proceso menos intensivo en trabajo humano y más intensivo en uso de energías externas (Toledo & González de Molina, 2011).

En la circulación aparece lo que la unidad de apropiación no consume y es el proceso que le da sentido al intercambio económico (Toledo & González de Molina, 2011). Con el transcurrir del tiempo se aumentan los flujos de lo que circula y a su vez cambian las distancias a las cuales deben circular. Una época marcada por la agricultura tradicional seguramente circulaba menos flujos de lo que podría imaginarse que circula en un parque industrial establecido en la ribera de un río a 40 km de una ciudad capital.

El proceso de consumo involucra a toda la sociedad desde la comunidad local hasta la global. Toledo y González de Molina (2011) señalan que el consumo se da en función de las necesidades que establecen los seres humanos y los satisfactores proporcionados por los primeros tres procesos (Apropiación, Transformación y Circulación). En este sentido se observa que la sociedad consume en función de lo que es apropiado, transformado y circulado. Los satisfactores son manejados principalmente por las

respectivas unidades de apropiación, transformación y circulación, ya sea una comunidad, un individuo o una empresa. En términos de sostenibilidad, el consumo está marcado por pautas de comportamiento que deben estar en consonancia con los límites de los sistemas naturales que soportan a una sociedad, de lo contrario se afecta la capacidad del sistema de renovarse en momentos de cambio abrupto.

En la actualidad la ineficiencia en los procesos de transformación y el aumento del consumo por parte de la sociedad ha aumentado los flujos existentes en la circulación y en la excreción atentando significativamente contra la sostenibilidad de los sistemas naturales y humanos. El proceso de excreción está determinado por los límites y umbrales del sistema o la unidad ambiental en términos de la capacidad de asimilación de los residuos excretados (líquidos, sólidos o gaseosos) y de la cantidad y calidad de dichos residuos.

Este proceso entonces sería sostenible en la medida en la que la calidad del residuo le permita ser reciclado por la naturaleza y que su cantidad no sobrepase la capacidad natural de reciclaje (Toledo & González de Molina, 2011). Un aspecto importante de los flujos de excreción es la energía disipada como energía no transformada en trabajo, es decir, entropía, la cual aumenta en la medida en la que aumenta el proceso del metabolismo hídrico, energético y material.

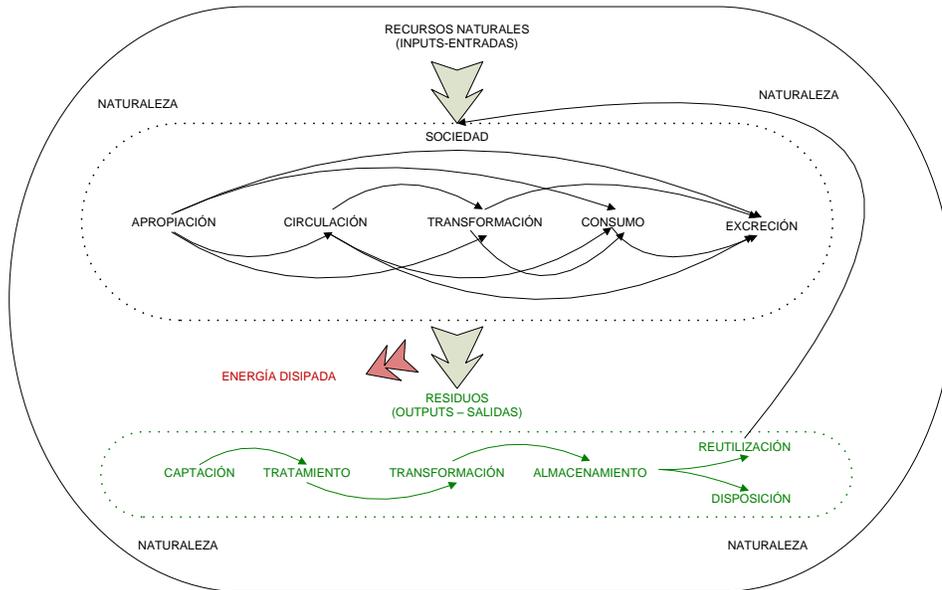
El proceso de excreción debe incluir operaciones que redirijan los flujos de residuos para optimizar su disposición. La Figura 4 muestra el proceso metabólico incluyendo unas operaciones adicionales para los residuos con el fin de no sobrepasar los umbrales de reciclaje natural, realizando algún tratamiento, transformándolos y reutilizándolos en el proceso metabólico o disponerlos en la naturaleza si no fuera posible su reutilización.

El incremento en los procesos de transformación está condicionado por las pautas de consumo de la sociedad y esto a su vez condiciona los flujos de circulación y de excreción. La dinámica humana actual ha hecho que las dimensiones del metabolismo (rural, industrial y urbana) incrementen la intensidad de sus relaciones y sean dependientes entre sí.

Para este estudio en particular se analiza el proceso metabólico general en función de los flujos hídricos. En los últimos años Beltrán y Velázquez (2011) han realizado una conceptualización del metabolismo del agua en función del metabolismo social que es útil para el análisis de sostenibilidad del agua. En dicha conceptualización se ha realizado una propuesta al diagrama de metabolismo social (Figura 1) en función de los flujos de agua. Aquí se incluyen en el diagrama algunas modificaciones con miras a esclarecer las bases de análisis para la sostenibilidad del manejo del agua (Figura 5).

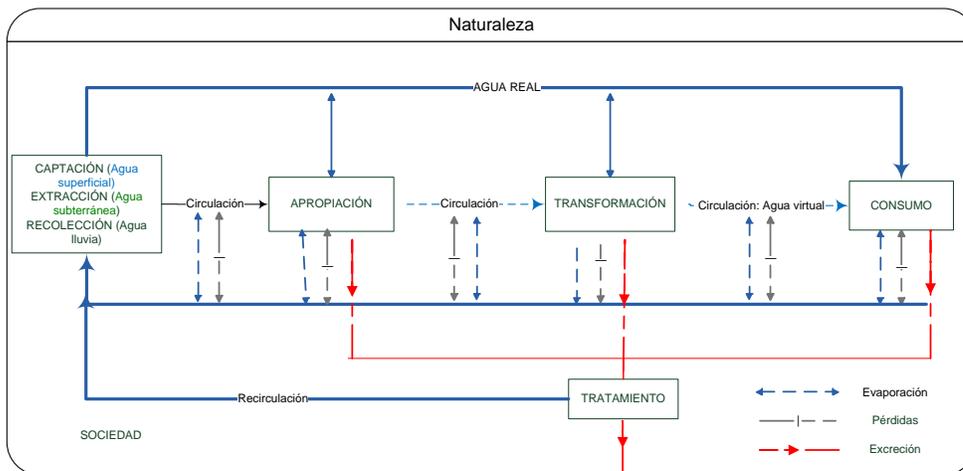
En el agua los procesos metabólicos están dados por el ciclo natural y social. Como entradas al sistema están la precipitación como entrada natural y el consumo que realizan los usuarios del agua (doméstico, agrícola e industrial). En las salidas debe contemplarse el caudal natural del río o cauce principal, la evaporación del agua dependiendo del tipo de cultivo o cobertura que se encuentre y los vertimientos que cada usuario realiza, como flujo de excreción.

Figura 4 Procesos metabólicos con recirculación de residuos



Fuente: Elaboración propia a partir de Toledo (2008)

Figura 5 Proceso metabólico del agua



Fuente: Elaboración propia a partir de Beltrán & Velázquez (2011)

En términos estrictos la apropiación del agua está precedida por un proceso de captación si es de una fuente superficial o de extracción si es una fuente subterránea. En este proceso debería incluirse la recolección de agua lluvia como objeto alternativo de apropiación. Respecto al agua se apropian bienes y servicios como agua para consumo humano, regulación del ciclo hídrico, control de inundaciones, capacidad de regulación de una cuenca hidrográfica, entre otras.

La circulación en términos hídricos se da en la distribución del recurso para las poblaciones o diferentes usuarios. En este proceso hay un gran porcentaje de pérdidas que se encuentra en función de la plataforma tecnológica que haya desarrollado la unidad de apropiación para la captación y distribución de agua. En este sentido existirán grandes diferencias si la circulación depende de una industria o de un campesino, cada uno desarrolla unos artefactos diferentes para hacer circular el agua de acuerdo a sus intereses. Otros aspectos involucrados tienen que ver con las distancias y el volumen del agua que circula.

En el agua, el proceso de transformación no es tan evidente como lo sería para los flujos materiales y energéticos. La transformación que acompaña al agua está más relacionada con la calidad requerida por el tipo de uso que se le da. Aquí se introduce el consumo, que igualmente involucra a toda la sociedad tanto global como local.

Este proceso de consumo también define lo que Hoekstra y Chapagain (2007) han denominado huella hídrica y agua virtual. Por un lado está el agua apropiada que circula y es consumida por un grupo de usuarios domésticos (una comunidad), por otro lado está el agua que es utilizada para producir ciertos bienes y servicios para la población (local o global). Cuando el producto se dirige hacia afuera del territorio lleva un agua contenida en él, la necesaria para su producción. Este flujo de agua se conoce como agua virtual. Tanto la huella hídrica como el agua virtual se encuentran en función del área que ocupa la unidad de apropiación.

Finalmente, el proceso de extracción es uno de los más importantes en términos de metabolismo del agua pues incluye, como ya se mencionó, aspectos tan importantes como la cantidad y la calidad. En este caso la cantidad y la calidad del agua residual de todos los usuarios, domésticos, industriales y agrícolas. Cada uno de estos procesos genera en mayor o menor medida una cantidad de agua residual y del tipo de proceso dependen los contaminantes que tenga el agua, lo que la hace susceptible de ser o no depurada naturalmente. Los flujos de excreción relacionan el metabolismo del agua y el metabolismo de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio.

En la excreción debe incluirse la reutilización del agua residual que indica que el agua puede ser utilizada en nuevos procesos o su

disposición final en caso de no ser posible su reutilización. Estas alternativas están en función de la facilidad de tratamiento del agua y es fundamental que si no es posible reutilizarla se devuelva al cauce natural en condiciones óptimas de calidad que permitan que el cuerpo de agua depure los contaminantes en caso de que no haya sido posible eliminarlos en el proceso de tratamiento.

4.2 Modelo conceptual del sistema de estudio

Esta fase del estudio está conformada por los siguientes pasos: definición, caracterización física y ecológica del sistema de análisis, análisis del perfil histórico, social y económico, caracterización de factores direccionadores del uso del agua en el sistema desde la segunda mitad del siglo XX y finalmente, generación de un modelo conceptual del sistema en función de los principales direccionadores de usos del agua en el territorio.

4.2.1 Definición del sistema de análisis

El recorrido del Río Bogotá se puede caracterizar en tres tramos: cuenca alta, cuenca media y cuenca baja (CAR, 2006). El sistema de análisis para este estudio está conformado por el primer tramo de la cuenca alta del río Bogotá desde el nacimiento del río en el municipio de Villapinzón hasta la vereda Tibito en el municipio de Tocancipá.

El nacimiento del río Bogotá se encuentra a 3300 msnm en el municipio de Villapinzón y desemboca en el río Magdalena en el municipio de Girardot a una altura de 280 msnm con un recorrido aproximadamente de 380 km. La cuenca alta del Río Bogotá tiene una longitud de 145 Km desde el nacimiento en el páramo hasta el lugar conocido como La Virgen en el municipio de Cota (DNP, 2004). Ocupa una extensión total de 4305 Km², superficie correspondiente a la quinta parte de la extensión de departamento de Cundinamarca (CAR-SGC, 1998). Es conformada por 18 municipios repartidos en 3 provincias, (Contraloría de Cundinamarca, 2008):

- Sabana centro: Cajicá, Chía, Cogua, Cota, Gachancipá, Nemocon, Sopo, Tabio, Tenjo, Tocancipá y Zipaquirá.
- Almeidas: Chocontá, Sesquilé, Suesca y Villapinzón.
- Guavio: Guasca, Guatavita y La Calera.

El sistema de análisis en esta investigación se acotará en función del recorrido principal del cauce del río Bogotá y las microcuencas que drenan a él que han sufrido mayor presión en términos de usos del agua desde el nacimiento hasta Tocancipá, municipio donde se ubica la planta de potabilización de agua de Tibitoc (PTAP), la cual suple de agua al 30% de la población capitalina y a 11 municipios de la sabana de Bogotá.

El área de estudio se acotó a partir del modelo digital de elevación que permitió delimitar la cuenca en el tramo escogido. Los municipios en el área de estudio sobre el cauce del río son: Villapinzón, Chocontá, Suesca, Gachancipá y Tocancipá. El recorrido del río en el sistema de estudio es alrededor de 96 km. El mapa de la zona de estudio se presenta en la página siguiente.

4.2.2 Caracterización física y ecológica del sistema

El sistema de estudio es caracterizado a nivel físico topográfico, hidrológico y climático, hidrogeológico, ecológico, social y económico. La información base de la caracterización se ha tomado del Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Bogotá (POMCA) realizado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR, 2006) y complementada por la recolección de información primaria, secundaria y de campo. De acuerdo con CAR (2006) el sistema de estudio incluye dos subcuencas de la cuenca alta del río Bogotá: Alto Bogotá (municipios de Villapinzón, Chocontá y parte de Suesca) y Sisga-Tibitoc (municipios de Suesca, Gachancipá y Tocancipá)⁴.

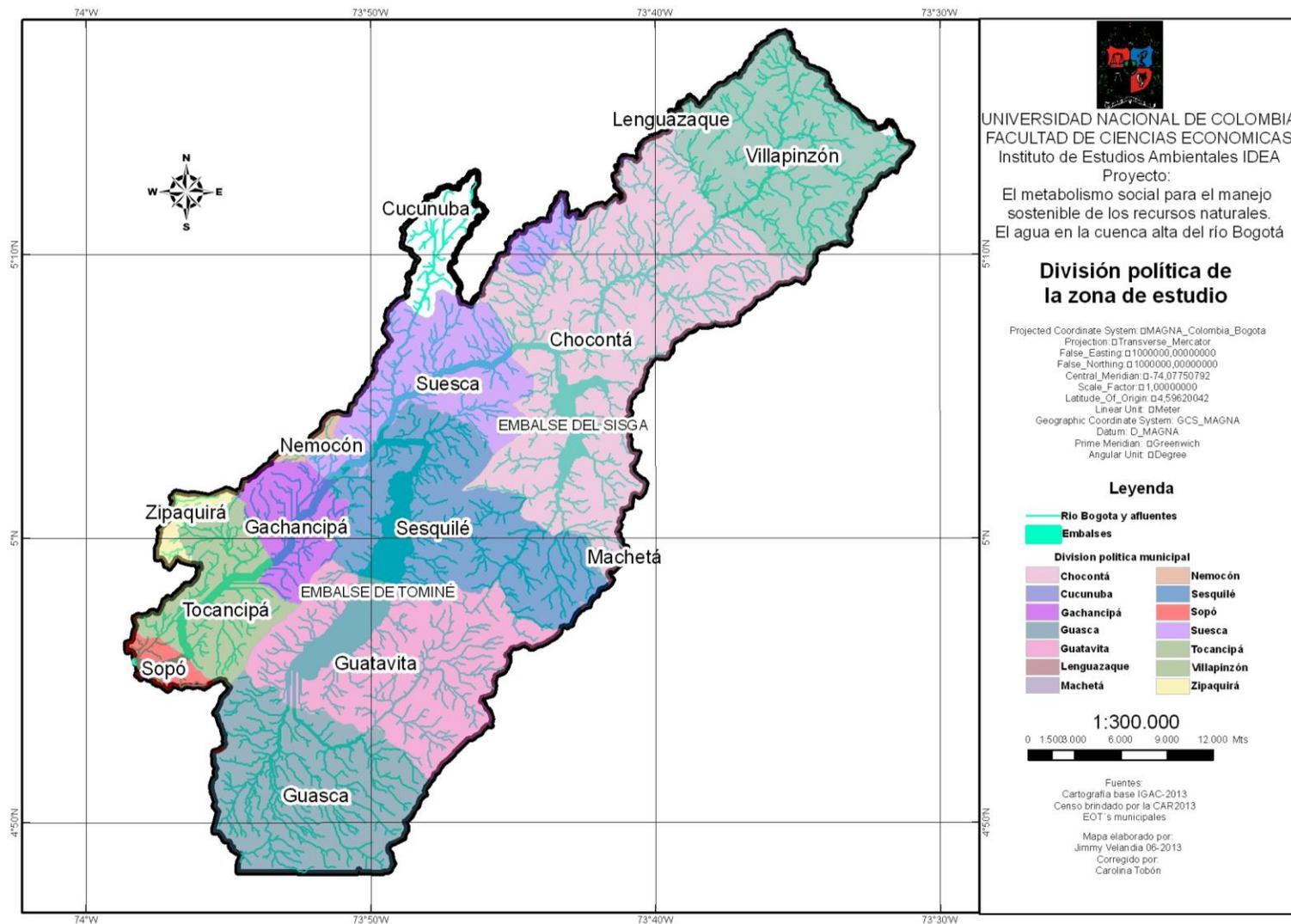
▪ Topografía y morfología

En la subcuenca Alto Bogotá el río recorre 39,9 km y tiene como tributarios el río Tejar y las quebradas Quincha, San Pedro, Piedra Gorda, Guanguito, Hato Frío y El Ratón. La altitud media es de 2900 msnm y presenta una topografía variada con predominio de relieve fuertemente ondulado y fuertemente quebrado en una proporción superior al 67% del área total (CAR, 2006). En alturas mayores a 3000 msnm se presentan zonas escarpadas y muy escarpadas que constituyen áreas de regulación hídrica, donde se encuentra el nacimiento del río Bogotá. Las pendientes más suaves (pendiente menor a 7%) corresponden al 14% del área total y las zonas de relieve ondulado e inclinado representan el 17% del área total y se ubican paralelas al drenaje del río Bogotá.

En la subcuenca Sisga-Tibitoc el cauce principal tiene una longitud de 55.5 Km y sus tributarios más importantes son el río Sisga y las quebradas Los Arrayanes, La Venta o Cacicazgo, Culalema, Quindiriga, El Zajón, Providencia y La Fuente. La altura media es de 2700 msnm, los relieves planos a ligeramente ondulados se encuentran en un porcentaje aproximado de 36.7 % del área total (CAR, 2006). El 51% del área corresponde a zonas fuertemente onduladas y fuertemente quebradas a escarpadas y se ubican por encima de 3000 msnm. El 13,3% restante corresponde a zonas de relieve ondulado e inclinado, también paralela a la dirección de

⁴ Cada subcuenca incluye más municipios (ver CAR, (2006)), sin embargo se nombran los que son del interés particular de este estudio.

Mapa 1 Mapa político de la cuenca alta del río Bogotá



drenaje del río Bogotá, ubicadas en sentido nor-oriental. El mapa físico de la zona de estudio se presenta en la página siguiente.

Su cuenca en general es de tipo alargado y sus cabeceras se encuentran sobre la cota 3.450 msnm y su cota más baja sobre los 2.600 msnm. La altura media está en los 3025 msnm, presentando un drenaje superficial rápido y de tipo sinuoso.

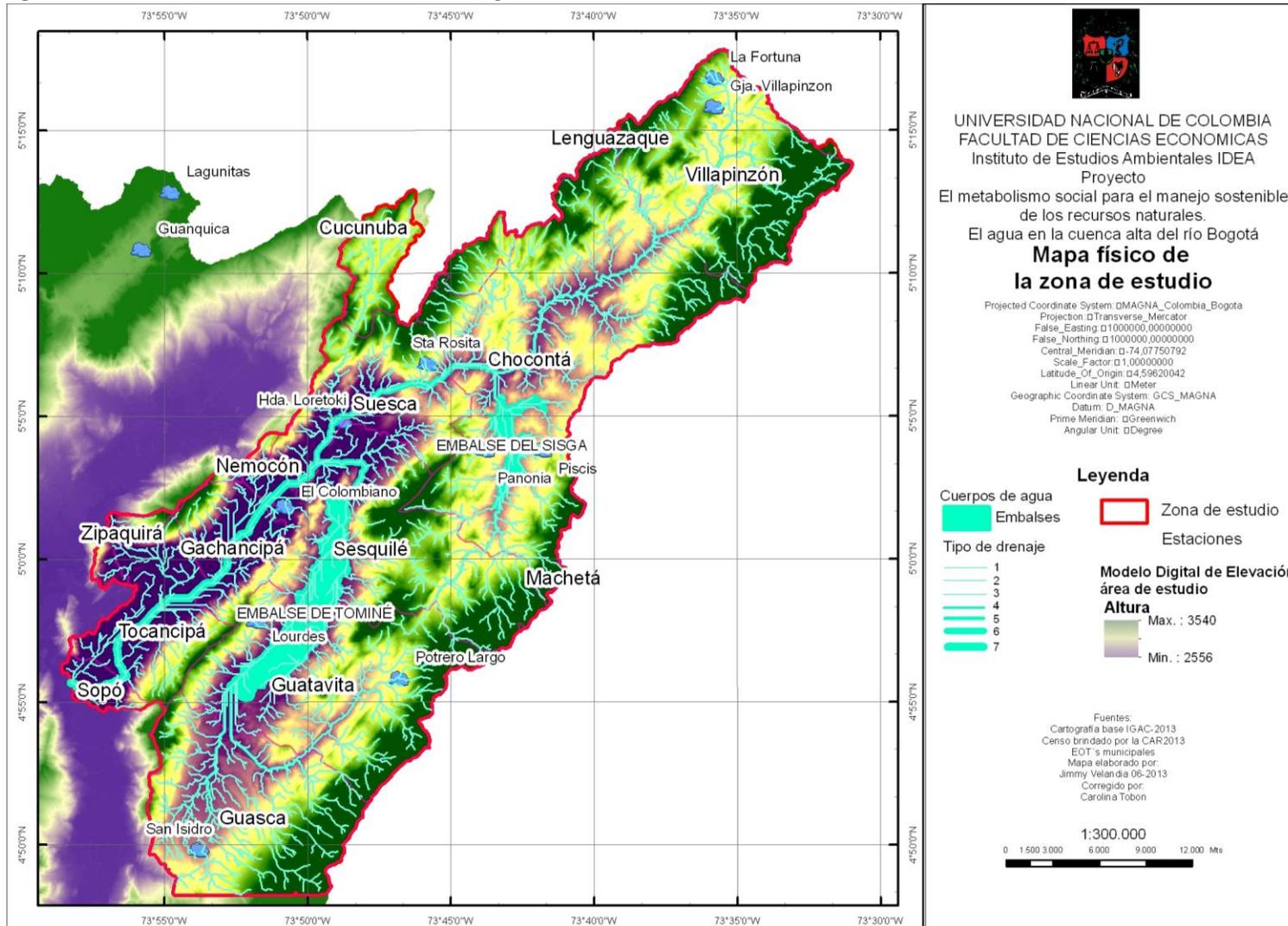
▪ Hidrología y climatología

Según el análisis hidrológico realizado se encontró que el área de estudio presenta un régimen de precipitación bimodal, con un pico máximo en los meses de mayo y octubre. Para la década del 1990 las precipitaciones registradas fueron menores que en las décadas de 2000 y la actualidad (1990: 70.4 mm, 2000: 70.9 mm, 2012: 73.6 mm). En el año 2012 los valores obtenidos de precipitación aumentan considerablemente ya que se da la transición al fenómeno de la Niña, el cual se presentó hacia el año 2011 desencadenando problemas sociales por las inundaciones y la afectación de los sistemas productivos dentro la zona de estudio, así como también de las condiciones de habitabilidad de los hogares ubicados en el valle aluvial del río Bogotá. Las gráficas y metodología correspondientes al análisis de precipitación de cada año se presentan en el Anexo A.

Los valores de evapotranspiración potencial a lo largo de la cuenca han permanecido relativamente constantes (1990: 52.9 mm, 2000: 53.8 mm, 2012: 52.4 mm) a pesar que en la década del 80 se presentaron los máximos mensuales (60.7 mm). Se evidenció también un aumento en los meses de marzo a mayo sobre el comportamiento medio debido a que son los meses más lluviosos. De acuerdo al análisis de los regímenes de precipitación y la carga de agua superficial, el porcentaje de saturación del suelo es mucho mayor durante estos meses que en el resto del año, por lo que el suelo cuenta con una cantidad de agua disponible mayor que es potencialmente evaporable. Las gráficas y metodología correspondiente para la evapotranspiración potencial se presentan en el Anexo A.

Para el análisis de caudales se analizaron tres estaciones; Villapinzón, Tocancipá y Puente La Virgen. La estación que presenta una mayor variabilidad en el régimen de caudales es la de Villapinzón, que pasó de tener un pico máximo en diciembre superior al que se presenta entre junio y julio a uno menor para el mismo mes. Por la falta de instrumentación en la cuenca no se encuentran registros anteriores. Para la misma estación se presentan también dos picos máximos en los meses de julio y diciembre, mientras que en el mes de septiembre se disminuye el régimen de caudales registrados. El mes en el que todas las décadas presentan su menor valor es enero. Sin embargo, la

Mapa 2 Mapa físico de la cuenca alta del río Bogotá



tendencia es a disminuir el caudal medio anual (1990:1.2 m³/s), 2000: 0.8 m³/s, 2012: 0.7 m³/s).

En la estación de Tocancipá se observa que el máximo caudal se da para el mes de enero. Para el mes de julio el caudal del río Bogotá aumenta y este aumento se repite también en el mes de noviembre. Aunque se observa que a la salida de la zona de estudio se presenta un régimen bimodal de respuesta, los caudales son relativamente constantes a lo largo del año. Cabe anotar que el caudal observado en cada uno de los años es cada vez menor, por lo que la capacidad hidráulica del río con el paso del tiempo es a su vez menor (1990:10.8 m³/s), 2000: 9.6 m³/s, 2012: 9.1 m³/s).

Para la estación de Puente La Virgen se presenta un valle en el mes de enero, en el que se registran los menores valores de caudales. Hacia el mes de mayo y noviembre se ve una tendencia hacia un pico de máximos. Desde el mes de mayo empieza una tendencia a aumentar el caudal con sus respectivos picos y es notoria la creciente en el transcurso del año. En el transcurso de cada una de las décadas, así como en las anteriores estaciones, el caudal tiende a disminuir a partir de 1990 (1990:16.5 m³/s), 2000: 13.6 m³/s, 2012: 13.4 m³/s).

Respecto a las curvas de duración de caudal la resultante para la estación de Villapinzón es mucho más tendida que la resultante para las otras dos estaciones. En esta estación la cuenca tiende a comportarse de manera más homogénea debido a que los caudales mínimo y máximo no varían demasiado. Se mantiene un buen aporte de aguas que no se altera por los procesos productivos que se dan en la ribera del río, posiblemente el aporte proviene del páramo que mantiene un flujo base en el cauce principal. Este aporte de aguas también está influenciado por el flujo de agua subterránea que tiene mucha incidencia en esta región. Debido a la geología de la cuenca ésta tiene una buena retención de agua en este punto. En las estaciones Tocancipá y Puente La Virgen, se observan bajos caudales, crecientes de poca duración y altos niveles de escorrentía, considerando que tiene buen drenaje pero baja retención de agua. Las gráficas de cada estación y la de duración de caudales junto con la metodología utilizada para el anterior análisis se encuentra en el Anexo A.

Con las anteriores variables se construyó un balance hídrico para cada año, el cual define períodos y cantidades de déficit y excesos almacenables en la cuenca alta del río Bogotá. Para lo anterior se contó con datos de precipitación de 20 estaciones, datos de evapotranspiración potencial constante y registros de caudales medios mensuales de la estación de Tocancipá. Como se observó en los datos de las variables hidrológicas, se seleccionaron únicamente los datos de la década del 90, 2000 y del año 2012 debido a que eran desde los cuales se encontraban las series de datos completas de información media mensual en fuentes como IDEAM, CAR y EAAB.

La Ecuación (1) presenta la ecuación del balance en términos generales donde E representa las entradas (precipitación), S las salidas (evaporación potencial y caudales estación Tocancipá) y dA/dt la variación del almacenamiento a lo largo del tiempo.

$$E - S = \frac{dA}{dt} \quad (1)$$

Para la construcción del balance hídrico, inicialmente es necesario conocer la reserva mensual para saber cual es el primer mes húmedo del año, desde el cual se sumará la reserva del mes anterior para calcular la capacidad de almacenamiento de la cuenca. La Ecuación (2) presenta el cálculo de la reserva mensual.

$$Reserva_{i+1}(mm) = P(mm)_i - Ep(mm)_i + Reserva(mm)_i \quad (2)$$

Para las tres décadas consideradas, el primer mes húmedo del año es marzo, mes a partir del cual se empieza el análisis de las variables hidrológicas. A partir de este mes, hasta febrero se sumará la diferencia con el valor de almacenamiento del mes anterior. Esta agua almacenada no corresponde en su totalidad a escorrentía del río sino que también puede ser agua infiltrada en el suelo gracias a las características del mismo. También es agua que se almacena en cuerpos lóticos o reservorios, que tienen presencia en el sistema como se identificó durante la salida de campo.

De acuerdo con las entradas y salidas definidas para el sistema hídrico, la infiltración se calculó con base en la Ecuación (3), tomando K como un coeficiente equivalente a 0,4124 para homogenizar las unidades de trabajo.

$$Infiltración \left(\frac{m^3}{s} \right) = K[P(mm) - Ep(mm)] - Q \left(\frac{m^3}{s} \right) + K * Reserva(mm) \quad (3)$$

Las Tablas 2, 3 y 4 presentan los balances hídricos de los años 1990, 2000, 2012.

Tabla 2 Balance hídrico año 1990

1990							
Mes	P (mm)	Ep (mm)	Q (m3/s)	P-Ep (mm)	Reserva (mm)	Δ Res. (mm)	Infiltración (m3/s)
Ene	14,6	50,4	12,376	-35,8	0,0	0,0	0,000
Feb	44,5	56,5	13,192	-12,0	0,0	0,0	0,000
Mar	76,8	53,0	12,048	23,8	23,8	23,8	7,573
Abr	67,9	58,9	11,865	9,0	32,8	9,0	5,341
May	105,2	56,3	9,684	48,9	81,7	48,9	44,160
Jun	116,5	47,7	9,453	68,8	150,4	68,8	80,932
Jul	131,2	50,6	10,574	80,6	231,0	80,6	117,940
Ago	69,6	50,4	10,079	19,2	250,2	19,2	100,996
Sep	73,0	53,6	10,493	19,4	269,5	19,4	108,646
Oct	93,4	50,1	9,726	43,3	312,8	43,3	137,153
Nov.	74,5	47,5	9,065	27,0	339,8	27,0	142,207
Dic.	45,7	60,1	10,891	-14,4	0,0	-339,8	0,000

Tabla 3 Balance hídrico año 2000

2000							
Mes	P (mm)	Ep (mm)	Q (m3/s)	P-Ep (mm)	Reserva (mm)	Δ Res (mm)	Infiltración (m3/s)
Ene	28,4	60,0	10,767	-31,6	0,0	0,0	0,000
Feb	40,0	53,3	11,347	-13,3	0,0	0,0	0,000
Mar	66,5	57,9	10,808	8,6	8,6	8,6	0,000
Abr	72,8	53,9	10,380	18,9	27,5	18,9	8,736
May	109,0	55,0	8,767	54,0	81,4	54,0	47,073
Jun	110,5	52,7	8,341	57,8	139,2	57,8	72,889
Jul	133,3	48,1	9,531	85,2	224,4	85,2	118,112
Ago	83,5	51,8	8,864	31,7	256,0	31,7	109,788
Sep	63,8	51,6	9,329	12,2	268,3	12,2	106,341
Oct	87,4	52,3	8,853	35,1	303,4	35,1	130,723
Nov	76,9	52,5	8,309	24,4	327,8	24,4	136,957
Dic	40,4	56,6	9,307	-16,2	0,0	-327,8	0,000

Tabla 4 Balance hídrico año 2012

2012							
Mes	P (mm)	Ep (mm)	Q (m3/s)	P-Ep (mm)	Reserva (mm)	Δ Res.. (mm)	Infiltración (m3/s)
Ene	27,5	58,4	9,656	-30,9	0,0	0,0	0,000
Feb	39,3	52,2	10,368	-12,9	0,0	0,0	0,000
Mar	67,3	57,3	10,060	10,0	10,0	10,0	0,000
Abr	89,8	53,3	9,495	36,5	46,4	36,5	24,695
May	114,6	55,2	8,660	59,4	105,8	59,4	59,489
Jun	113,1	50,9	8,531	62,2	168,0	62,2	86,408
Jul	125,0	47,5	9,485	77,5	245,5	77,5	123,734
Ago	92,5	49,6	9,052	42,9	288,5	42,9	127,623
Sep	67,8	49,6	8,937	18,2	306,6	18,2	125,020
Oct	95,7	50,8	8,558	44,9	351,5	44,9	154,910
Nov	82,0	49,4	8,173	32,6	384,2	32,6	163,713
Dic	39,6	54,3	8,700	-14,7	0,0	-384,2	0,000

Con base en la anterior información, se observa que durante cada año el almacenamiento de agua es positivo, menos entre los meses de diciembre a febrero, cuando la cantidad de evaporación supera la cantidad de precipitación sobre la cuenca. Sin embargo, no es suficiente para que se presente déficit de almacenamiento en la cuenca a lo largo del año, debido a que existen otros cuerpos de agua que aportan al río y a que en los meses anteriores se ha acumulado agua en la cuenca. La recarga subterránea de la cuenca fue estimada a partir del cambio de almacenamiento del balance hídrico de la cuenca que se presenta en forma mensual y el caudal registrado en la estación de Tocancipá ya que es el caudal que se considera al final del área de estudio y delimita la zona de trabajo.

▪ Oferta y demanda hídrica:

De acuerdo con CAR, (2006) la oferta hídrica para las dos subcuencas contempladas en la investigación se define a través del estudio de los caudales medios aportados por la cuenca, así, se calcula para dos escenarios hidrológicos; un período seco y uno húmedo. La demanda de agua, por su parte, se calcula a partir de módulos de consumo promedio, estimados en función del piso térmico y del tamaño de la población en l/hab/día para demanda doméstica y de tipo de cobertura para demanda agrícola. Estos módulos de consumo se definieron en el Acuerdo 31 de septiembre de 2005, por la Subdirección de Gestión Ambiental de la CAR. En la demanda de agua agrícola se asumió que los pastos manejados bajo riego corresponden solo al 10 % del área total, que los cultivos varios, en un 80% son en secano, que las áreas bajo invernadero son cultivos de flores y solo el 30% se riegan con aguas superficiales con sistemas eficientes de riego.

Para la demanda de agua industrial se realizan estimaciones con base en proyecciones basadas en el estudio desarrollado por el IDEAM "Balance hídrico y Relación de Oferta y Demanda de Agua en Colombia". En este estudio se determinó la demanda industrial tomando como base los consumos reales del sector industrial en Bogotá, proyectados al resto del país con base en la distribución del producto Interno Bruto (PIB). El resultado fue que la demanda industrial corresponde a 6.87% del total de la demanda doméstica.

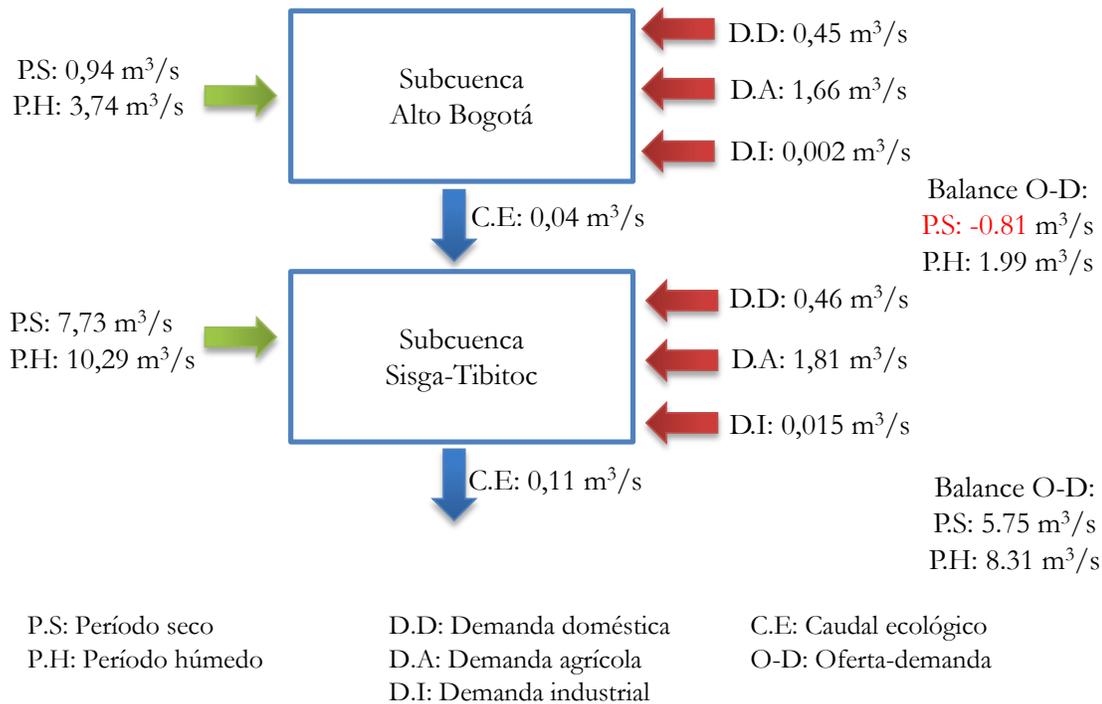
El caudal ecológico registrado por la corporación para la subcuenca Alto Bogotá es de 0,04 m³/s y para Sisga-Tibitoc es de 0,11 m³/s. Con los valores calculados para oferta hídrica, demanda y caudal ecológico se calculó el balance oferta-demanda y el índice de escasez. Para la subcuenca Alto Bogotá el balance es negativo para período seco registrando -0,81 m³/s y en período húmedo 1,99 m³/s. El déficit se presenta en los meses de enero y febrero y el exceso en los meses de abril, mayo, junio y julio (CAR, 2006). El índice de escasez se presenta alto para el período seco y medio alto para el período húmedo. En Sisga-Tibitoc en

ambos períodos el balance oferta-demanda es positivo registrando $5,75 \text{ m}^3/\text{s}$ y $8,31 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente. El índice de escasez se presenta medio alto para el período seco y medio para el período húmedo (CAR, 2006).

Con base en la anterior información se construye la Figura 6 en la cual se presentan los valores de oferta hídrica para las dos sub-cuencas del estudio, la demanda hídrica según el tipo de uso, el caudal ecológico y los balances oferta-demanda.

De acuerdo con esta información la demanda de agua agrícola por subcuenca es mayor (1,66 y 1,81) que la demanda de agua industrial (0,002 y 0,015). Sin embargo en la política de gestión integral del recurso hídrico (MAVDT, 2010) se indica que para la sabana de Bogotá la presión de la industria sobre los cuerpos de agua ha sido de mayor fuerza e impacto que la de la agricultura.

Figura 6. Balance oferta-demanda en las sub-cuencas de estudio



Fuente: Elaboración propia a partir de CAR (2006)

▪ **Hidrogeología:**

De acuerdo con CAR, (2006) el sistema hidrogeológico de la Sabana de Bogotá se divide en los siguientes grupos: Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular, rocas con flujo a través de fracturas y sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea. Se explican algunos de los componentes de cada grupo para las subcuencas que se incluyen en el estudio.

- Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular

A este grupo pertenecen los acuíferos Tilatá y Cacho (mediana a alta productividad) y Aluvial y Arenisca de la Regadera (baja a mediana productividad (CAR, 2006)).

El acuífero Tilatá es de alta productividad y se encuentra al oriente del río Bogotá y está conformado por capas de gravas friables, arenisca de grano grueso y arcillolitas, con un espesor de 80 a 100 m. En Alto Bogotá se encuentra 1 pozo de 123 m (caudal 6,7 L/s) de profundidad en el que el agua es apta para consumo humano y riego, se recarga a través de la lluvia, corrientes superficiales y del acuífero Arenisca de la Regadera.

Este acuífero no aflora en la subcuenca Sisga-Tibitoc, sin embargo se encuentra por debajo del acuífero Terraza Alta que es de alta productividad. Hay 4 pozos en Tocancipá con profundidades entre 244 y 270 m y debido a su alta turbiedad y contenidos de hierro no es apta para consumo humano. Su flujo está en dirección nor-oriental sur-occidental.

El acuífero Cacho se encuentra en dirección Norte-Sur al occidente de Alto Bogotá es de mediana productividad con caudales de 0.2 a 10 L/s y se recarga únicamente con la lluvia. En Sisga-Tibitoc aflora al sur-occidental, centro-occidental y nor-oriental, sin embargo no se conoce su profundidad. El agua no es apta para consumo humano por su contenido de hierro pero sí lo es para riego. Se recarga a través de lluvias y corrientes superficiales.

El acuífero aluvial aflora a los costados del río Bogotá, los ríos y quebradas de la subcuenca Alto Bogotá y al nor-occidental y nor-oriental de Sisga-Tibitoc. Es de baja productividad y el agua no es apta para consumo humano debido a sus contenidos de hierro, sin embargo es apta para riego y se recarga a través de lluvias.

El acuífero Arenisca de la Regadera aflora al sureste del Sisga y al noreste de Chocontá, es de mediana productividad y produce un caudal entre 0.05 y 1 L/s. En Sisga-Tibitoc aflora al sur-occidental. No es apto para consumo humano pero sí para riego.

El depósito Terraza Alta se encuentra en la parte central de la subcuenca Sisga-Tibitoc y es de mediana productividad. Su agua no es apta para consumo humano y se recarga a través de la lluvia, corrientes superficiales y del acuífero Tilatá que se encuentra por encima de él.

- Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas

A este grupo pertenecen los acuíferos Labor y Tierna y Arenisca Dura que son de mediana a alta productividad.

El acuífero Labor y Tierna aflora de norte a sur a ambos lados de la subcuenca Alto Bogotá y en las partes altas de las montañas, es de mediana a alta productividad. En Sisga-Tibitoc aflora en toda la subcuenca (CAR, 2006). El agua no es apta para consumo humano pero sí para riego y la recarga se realiza a través de lluvias.

El acuífero Arenisca Dura aflora en la parte occidental de Alto Bogotá, en la zona montañosa, en toda la subcuenca Sisga-Tibitoc y es de mediana a alta productividad. El agua es apta para consumo humano y para riego con un caudal de 10.4 L/s y se recarga a través de lluvias.

▪ Sedimentos y rocas con limitados recursos de agua subterránea

Este grupo se subdivide en dos, al primero pertenecen los acuitardos Coluvial (Alto Bogotá) Fluvio Glaciar (Sisga-Tibitoc), Bogotá, Guaduas y Plaeners y al segundo el acuífugo Chipaque, ambos de muy baja productividad e importancia hidrogeológica. En general en este grupo el agua no es apta para consumo humano pero lo es para riego y la recarga se realiza a través de las precipitaciones.

Según Camargo (2005) (citado en CAR, 2006), en la subcuenca de Alto Bogotá hay contaminación de coliformes totales en los acuíferos Aluvial y Labor y Tierna y Arenisca Dura y en los acuitardos Coluvial y Plaeners, también hay contaminación con coliformes fecales en los acuíferos Aluvial, Tilatá, Labor y Tierna y Arenisca Dura y en los acuitardos coluvial y Plaeners. Por otra parte hay contaminación con plaguicidas como, aldrín, d-BHC, dieldrín, a-BHC, b-bhc, endosulfan I y II, endosulfan sulfato, endrín, endrín aldehído, heptaclor, lindano, ppDDD y ppDDE en varios acuíferos y acuitardos, cuaternarios, terciarios y cretácicos (CAR, 2006). En la subcuenca Sisga Tibitoc, hay contaminación con coliformes totales en los acuíferos aluvial y Terraza Alta y en el acuífugo Guaduas, con coliformes fecales en el acuífugo Guaduas y hay contaminación de los acuíferos con algunos de plaguicidas mencionados (Camargo, 2005 citado en CAR, 2006).

De acuerdo con información suministrada por la CAR sobre concesiones de agua subterránea en el municipio de Gachancipá se han otorgado 27 concesiones para pozos entre 36 m y 160 m con caudales concedidos entre 0,01 L/s y 30,29 L/s. Estas concesiones se han dado principalmente para uso agrícola (21) y pecuario (16), en menor medida para uso doméstico (11) y uso industrial (4). En el municipio de Tocancipá se registraron 38 concesiones de agua subterránea para pozos entre 30 m y 266 m con caudales entre 0,013 L/s y 30,19 L/s. Al igual que para el municipio de Gachancipá las concesiones se han otorgado principalmente para uso agrícola (23) y pecuario (16) y en menor medida para uso doméstico (16) e industrial (7).

▪ Ecología

Las características ecológicas del sistema de estudio pueden ser analizadas desde el concepto de unidad de paisaje, entendida como un grupo de diferentes ecosistemas interconectados entre sí. En el caso de la cuenca alta del río Bogotá, se encuentra una unidad de paisaje conformada por el ecosistema de páramo, bosque altoandino, bosque andino bajo, zonas secas, bosques inundables y humedales (Van der Hammen, 1998). La Tabla 5 reconstruye de manera aproximada la cobertura vegetal, clima y suelo de la zona y los servicios ecosistémicos asociados con cada ecosistema.

Tabla 5 Ecosistemas presentes en el área de estudio y servicios ecosistémicos asociados.

ECOSISTEMA	CARACTERIZACIÓN ECOLÓGICA	SERVICIOS ECOSISTÉMICOS ASOCIADOS
Páramo 3300-4000m	Vegetación abierta, predominan especies de pastos o de pequeños bambúes, frailejones pequeños arbustos y hierbas. Temperaturas medias entre 9 y 4°C. Los suelos de los páramos son suelos ricos en humus y contienen material de alteración de cenizas volcánicas.	Provisión: Suministro de agua Regulación: Ciclo hidrológico, clima Cultural: Paisajismo, espiritual, recreativo, educación. Soporte: Ciclo de nutrientes, producción primaria, formación de suelo.
Bosque Andino Alto 2750-3300m	Se constituye principalmente por bosque de encenillo, puede tener alrededor de un 25% de la cobertura de copas. Predomina la vegetación epífita. Las temperaturas medias anuales son aproximadamente 12°C y 9°C y la precipitación principalmente entre 900 y 1500 mm anuales. La humedad relativa del aire puede ser periódicamente alta hasta muy alta, especialmente durante las estaciones húmedas.	Provisión: Suministro de agua, alimento. Regulación: Ciclo hidrológico, clima, calidad de aire Cultural: Paisajismo, recreativo, educación Soporte: Ciclo de nutrientes, producción primaria, formación de suelo.
Bosque Andino Bajo 2550 a 2750 o 2800m	Las temperaturas medias anuales están entre 14°C y 12 °C, la precipitación de aproximadamente 600 y 900 mm (media anual). Los suelos en estos bosques son relativamente secos. Este bosque de la parte plana prácticamente desapareció por completo.	Provisión: Suministro de agua, alimento, madera. Regulación: Ciclo hidrológico, clima, calidad de aire Cultural: Paisajismo, recreativo, educación. Soporte: Ciclo de

		nutrientes, producción primaria, formación de suelo.
Zonas secas 2550 a 2750 o 2800	En las áreas más secas de la Sabana, en el sur, suroeste y norte, el Bosque Andino bajo es reemplazado por una vegetación arbustiva, semiabierta hasta abierta, de especies adaptadas a este medio extremo. Las temperaturas medias anuales son las mismas que las del bosque andino bajo, pero la precipitación es más baja, menos de 700-600mm. Los suelos en este ecosistema son fácilmente erodados si hay inclinación del terreno.	Regulación: Control de erosión. Cultural: Paisajismo, recreación, educación Soporte: Ciclo de nutrientes, formación de suelo
Bosque de las zonas inundables 2100 a 3100 o 3500	Bosque de aliso como especie dominante. Adicionalmente es posible encontrar bosque de laurel, que según datos prehistóricos esta especie debió haber sido dominante. El bosque de Aliso y su ecosistema se puede clasificar como "azonal" ya que es definido en primer lugar por factores edáficos (especialmente por inundaciones temporales). No obstante, la especie es también limitada por factores climáticos.	Provisión: Alimento Regulación: Control de inundaciones, clima Cultural: Paisajismo, recreación, educación Soporte: Ciclo de nutrientes, formación de suelo, producción primaria
Humedales	En la misma zona inundable se encuentran áreas relativamente bajas donde se mantiene aguas más o menos estancada al nivel del suelo o encima de este nivel durante todo el año o gran parte del año. Son, frecuentemente, también áreas de sedimentación de arcilla. En estas condiciones no puede haber Bosque de Alisos (que no resiste inundación permanente), sino se presentan tipos de vegetación abierta (principalmente de hierbas) pantanosa o acuática.	Provisión: Alimento Regulación: Clima, inundaciones, purificación aire y agua. Cultural: Paisajismo, recreación, educación Soporte: Ciclo de nutrientes, formación de suelo, producción primaria.

Fuente: Elaboración propia a partir de (Van der Hammen, 1998)

La caracterización de la fauna en la Subcuenca Alto Bogotá realizada por CAR en (2006) registra un total de 246 especies: 165 de la Clase Ave, 36 de la Clase Mammalia, 20 de la Clase Reptilia, 14 de la Clase Amphibia, 11 para la Clase Peces y tres más que fueron introducidas al país para la producción piscícola, la carpa (*Cyprinus Carpio*), la trucha arco iris (*Salmo gairdnerii*) y la mojarra roja (*Oreochromis niloticus*). En la subcuenca Sisga-Tibitoc se registraron 308 especies de la Clase Aves, 47 de la Clase Mammalia, 24 de la Clase Reptilia, 14 de la Clase Amphibia y 11 para la Clase Peces.

4.2.3 Perfil histórico, social y económico del sistema

Una vez definido y caracterizado el sistema de estudio se presenta el perfil histórico, social y económico para complementar la caracterización ambiental del territorio. La integración de la información física, ecológica con la histórica, social y económica cobra sentido en tanto se analizan las interacciones que se pueden presentar entre uno y otro sistema (social, económico o natural).

▪ Perfil histórico:

El período definido para este estudio es la segunda mitad del siglo XX, en el que se han presentado intensas transformaciones ambientales sobre el sistema de estudio. En este aparte se presenta un recuento histórico del sistema desde antes de la aparición del hombre hasta nuestros días con el fin de identificar procesos y variables que han influenciado el uso del agua en el territorio, especialmente en el período definido. Además permitirá analizar las principales transiciones y procesos de cambio del sistema socio-ecológico definido.

La cuenca alta del río Bogotá ha sido escenario de intensos cambios a nivel natural y socioeconómico desde que se conoce su historia. Los dos momentos históricos relevantes en esta región se diferencian por la llegada del hombre agricultor (Van der Hammen, 1998). Hace cientos de millones de años, de acuerdo con Van der Hammen (1998) este territorio estaba cubierto por el mar, hacia el período terciario se forman las cordilleras y la sabana de Bogotá ya no está influenciada por el mar sino por conjuntos de ríos y quebradas. Hace aproximadamente 12.500 años, en la última parte de la última glaciación aparece el hombre en la sabana de Bogotá: pequeños grupos de cazadores - recolectores. Posteriormente en el siglo XIII se establecen los asentamientos indígenas de la familia Chibcha y para el siglo XVI llegan los conquistadores europeos.

A partir del siglo XVI se dieron dinámicas intensas de articulación entre las formas indígenas y las españolas configurando un modo de organización social, económica y de propiedad de la tierra (Fals Borda, 1975), dando lugar a configuraciones particulares en perspectiva ambiental.

Del siglo XIX en adelante, la sábana de Bogotá, por supuesto la zona Norte fue escenario de intensas presiones ejercidas por dinámicas de transformación en el uso del suelo y crecimiento demográfico, las cuales ocasionaron cambios ambientales en el territorio y algunas problemáticas específicas en la provisión de servicios ecosistémicos a la sociedad.

En la segunda mitad del siglo XIX (1850 - 1999) Ruiz (2008) identificó la pérdida de biodiversidad que va sufriendo este territorio por los modelos agrícolas predominantes y las actividades humanas homogeneizadas gracias a los patrones externos de producción. Se percibió la presión sobre el agua en función de diferentes formas de vida, una agrícola campesina, otra empresarial donde la gran hacienda criolla se modificó por el de la finca empresa. Los procesos de mejoramiento de infraestructura como la canalización del río Bogotá y finalmente el modelo de la floricultura y el monocultivo de la papa presionaron fuertemente los cuerpos de agua.

En todas estas formas de vida descritas se observaron cambios fundamentales en relación con el agua. Los cambios de modelos agrícolas a un modelo floricultor ejercieron una fuerte presión sobre el uso del recurso, en términos de riego y contaminación. "A mediados del siglo XIX la ocupación agrícola y pecuaria de la Sabana giraba en torno a la producción de carne, quesos, papa y la harina de trigo que los arrieros compraban para proveer a los habitantes de tierras cálidas, quienes a su vez abastecían a los de tierras altas de mieles de caña, garbanzo, arracacha, yuca y otros productos" (Ruiz, 2008 pg 52).

A mediados del XIX se presentó la extensión de la gran hacienda criolla, donde "eran sembradas 100 cargas de trigo y se mantenían unas 1500 cabezas de ganado" (Ruiz, 2008 pg 55). De acuerdo al alimento del ganado la autora supone una capacidad de carga de un animal por cada dos hectáreas, lo que implicaba haciendas de dos mil o tres mil hectáreas. Para la primera mitad del siglo se introdujeron especies foráneas, se amplió la malla vial y llegó el automóvil, lo que no sólo aceleró el transporte de pasajeros sino de ganado y productos agrícolas. Además, el factor demográfico empezó a tener fuertes consecuencias pasando de 30.000 habitantes en la capital para 1850, llegando a 121.000 en 1912 y a 1.000.000 en 1956 (Ruiz, 2008). Estas cifras indicaron ciertamente una demanda creciente de alimentos y agua, que necesariamente fueron proveídos de los espacios naturales que rodeaban la capital.

Para esta época, la introducción de vehículos y máquinas de vapor representó una transformación del mundo rural y necesariamente del papel del campesino. El campo empezaba a dinamizar la economía capitalina y el agua empezaba a fluir más continuamente y en mayor proporción del campo a la ciudad, tanto en la demanda para consumo como en la demanda para la producción agrícola. Adicionalmente, las especies foráneas como los eucaliptos y pinos configuraban un paisaje diferente y contribuyeron al deterioro de los suelos, suelos que además eran ricos en carbón y que fueron explotados en minas en Suesca, Gachancipa, Tausa, Sutatausa y Guatavita (Mejía, 1999; Ruiz, 2008). El crecimiento urbano también contribuyó a incrementar la creación de represas para abastecer a la ciudad de agua potable, las cuales generaron profundas transformaciones

socio-ambientales y de régimen de flujo en los lugares donde fueron construidas (Zambrano et al., 2009).

De acuerdo con Escobar (1993), la primera curtiembre se estableció en Villapinzón (o Hatoviejo antiguamente) en 1820 con don Francisco López, a partir del cual el curtido se difunde entre las familias López, Fernández, Contreras, entre otras. Estas familias se encuentran aún localizadas en el corredor industrial comprendido entre la ribera del río y la carretera central.

En esta época tanto Villapinzón como Chocontá eran pequeñas poblaciones y aún se conservaban bosques en los cuales se encontraba el encenillo (Ojeda, 2004), uno de los árboles de cuya corteza se extraía un producto curtiente natural, el cual fue usado por antiguos curtidores hasta la década del 80 (Comunicación oral, 2013). El río y sus afluentes eran utilizados tanto para tomar el agua que requería el proceso como para descargar el agua residual contaminada y los residuos sólidos producidos. Ojeda (2004) identificó como un factor importante de dinamización de la actividad las batallas de independencia que demandaban diversos accesorios de cuero para jinetes y caballos.

La segunda mitad del siglo XX protagonizó un proceso que hizo una gran contribución a la transformación de los ecosistemas de la sabana y fue la canalización de las aguas superficiales en todas las zonas inundables del valle del río Bogotá, suceso que completó el más grande desequilibrio hídrico en esta región del país (Ruiz, 2008). Este proceso evidenció la relación de dominación del hombre hacia la naturaleza, creyendo poder manipular el cauce de los ríos para "evitar las inundaciones", inundaciones que se incrementan cada vez más en la actualidad y que de alguna manera representan el reclamo del río por haber sido intervenido para satisfacer los caprichos humanos.

Además de intervenir las aguas superficiales, era necesario adoptar sistemas de riego y perforar pozos cada vez más profundos para satisfacer la creciente demanda de agua y ser competitivo en los mercados. Cada vez más se abandonan los cultivos tradicionales de trigo y cebada para dar paso a pastos especializados y diferentes variedades de hortalizas. "La floricultura, la lechería, la horticultura y la papicultura son la barrera atravesada en el horizonte de la gestión ambiental en la Sabana" (Ruiz, 2008 pg 64).

La floricultura ha sido un factor esencial en la gestión ambiental de la región, pues a partir de 1970 se convirtió en la actividad más rentable en la sabana, a costa de la infección de suelos de difícil recuperación y de perforación de pozos profundos para el riego. El campesino se veía entonces acosado por los ritmos de producción y veía el cansancio de las tierras y de las gentes pues la agroindustria no da descanso.

En la década del 60 se implantaron los primeros cultivos de flores en los municipios ubicados al occidente de la capital, los cuales comenzaron a expandirse a un ritmo muy rápido en la década de los 70 (SENA-UNAL, 1994). Andrade (1991) establece 3 fases socio temporales en el proceso de difusión de los cultivos de flores: una fase primaria o inicial 1976-1983 (8,6 cultivos por año), una fase de difusión 1976 - 1983 (18,8 cultivos por año), y una fase de condensación 1984-1989 (47 cultivos por año). En estos periodos la floricultura se expandió hacia el norte, hasta la cuenca alta del río Bogotá.

Durante 1920 y 1980 comienzan a romperse los cinturones de haciendas hacia el occidente y hacia el norte debido a la expansión de la ciudad (Palacio & Rouillon, 2008), expansión que transformó el uso del suelo y tendió a "devorar la Sabana". Gracias a los intentos modernizadores fracasados se sacrificaron tierras fértiles y se deterioró estéticamente el paisaje sabanero (Palacio & Rouillon, 2008).

En esta época se volcó la ciudad a dominar el campo, en contraposición a la dominación rural que se percibía en el siglo XIX. Los factores que señalaron los autores son la expansión económica y el crecimiento urbano, que necesariamente ejercieron presión sobre los ecosistemas de sustento, en este caso, la sabana, los humedales de la ciudad y los cerros orientales.

A fines de la década de los 70 la urbanización generaba caos y algunas personas querían escapar hacia lugares alejados que recordaran las épocas bucólicas de antaño como Boyacá o La Sabana, pero este paisaje ya no era el mismo, la urbanización, la industria y la floricultura habían alterado estos espacios y habían formado profundos contrastes entre lo urbano y lo rural producto de la expansión y de la modernización agrícola impulsada por la revolución verde (Palacio & Rouillon, 2008).

El agua en Bogotá y la Sabana ha sufrido un proceso de centralización. Desde la presencia de los muiscas en la zona, el agua era importante para la producción doméstica, la vida silvestre y el transporte fluvial (Bernal, 2008). En un periodo relativamente reciente la población empezó a multiplicarse y los conflictos por el agua se acentuaron cada vez más. El crecimiento urbano obligó a la centralización en el manejo del agua, se construyó el acueducto de Tibitoc en 1959 y se completó con un sistema de embalses en toda la sabana, desde Sisga hasta el Muña con fines de consumo y de generación eléctrica para Bogotá (Bernal, 2008) y más adelante para algunos países vecinos. Hasta la construcción de la planta de Tibitoc (1959) no se abasteció completamente de agua la ciudad, y aún después fue importante el mantenimiento de reservas en la región para garantizar la continuidad de los servicios de agua de la población no solo capitalina sino de varios de los municipios de la sabana (Zambrano et al., 2009).

La región de estudio durante la segunda mitad del siglo XX ha sido escenario de cuatro actividades económicas de significativa influencia sobre el uso del agua: la agricultura, el curtido de pieles, la agroindustria y la industria. La agricultura ha sido la actividad económica más importante en la historia de la región que ha sufrido fuertes cambios en este período, siendo desplazada por otro tipo de actividades productivas. En esta misma dinámica se enmarca el surgimiento y auge de la floricultura. La industria, por su parte, es la actividad económica más joven en la región, sin embargo ha sido la que mayores transformaciones ha generado a nivel social, económico y ambiental. El curtido de pieles no se incluye dentro del sector industrial debido a que en la región de estudio esta actividad ha sido en mayor medida artesanal. Hasta la última década es que los curtidores de la región empiezan a contemplar escenarios de empresas visionarias y competitivas en el mercado mundial con el fin de crecer y convertirse en industrias formales.

▪ **Perfil social:**

La cuenca alta del río Bogotá se ha caracterizado por una creciente tasa demográfica siendo una de las regiones geográficas más pobladas del país. La población de la cuenca alta en el período intercensal 1985 - 1993 aumento tres veces más que el promedio población nacional y cuatro veces el del departamento (CAR-SGC, 1998).

El arquetipo humano que conforma la población de la cuenca es conocido como "sabanero", habitante de la sabana. Estos sabaneros han experimentado los cambios a través de 500 años de historia, cambios abruptos desde mediados del siglo XX (CAR-SGC, 1998). La primera base étnica de los sabaneros fueron los muisca, pueblo chibcha, de quienes probablemente proviene el carácter recio, trabajador, laborioso, de economía diversificada, orfebres, textileros, mineros, alfareros y comerciantes. La segunda base étnica fueron los españoles, quienes invadieron territorio muisca y sometieron a sus gentes destrozando su organización social e imponiendo nuevas prácticas y costumbres. Aparecieron dos estilos de vida producto de la articulación y desarticulación de las dos culturas: la chibcha y la española (CAR-SGC, 1998).

Durante la Colonia se presentó un progresivo mestizaje, que al final daría como resultado una cultura más homogénea y la desaparición de la lengua Chibcha del altiplano (Dueñas, 1997). El siglo XIX fue el escenario de la emancipación de los criollos y, durante los gobiernos republicanos, de inestabilidad política y crisis económica (Meisel & Ramírez, 2010). En este periodo se presentó una progresiva transformación de la sabana de un paisaje nativo a uno en el que primaban los eucaliptos, y así mismo la consolidación de grandes haciendas en detrimento de los pequeños y

productivos resguardos indígenas señalando la importancia de Bogotá para la Sabana y la estrecha relación entre estas dos entidades (Mejía, 1999). Ya en el segundo cuarto del siglo XX Bogotá se fue convirtiendo en la metrópoli nacional, proceso que se aceleró con la muerte de Jorge Eliécer Gaitán (Zambrano et al., 2009). El sabanero contemporáneo fue un nuevo arquetipo formado por campesinos y ciudadanos, uno pluriétnico y pluricultural, producto de realidades complejas e inequitativas que llevó a la estratificación indiscriminada.

El estudio realizado entre la CAR y la Sociedad Geográfica de Colombia (SGC) en 1998 "Cuenca alta del Río Bogotá: Descripción y diagnóstico" señala que el problema social más sobresaliente en la región fue el hacinamiento producido por la migración de trabajadores empleados por cultivos de flores e industrias y el desplazamiento de personas en búsqueda de empleo. Lo anterior generó altos índices de criminalidad, que se sumaban a la baja cobertura del servicio de salud y a la baja calidad de la educación (CAR-SGC, 1998).

De acuerdo con los censos realizados por el Departamento Nacional de Estadística (DANE) desde 1964 a 2005 la población total de los cinco municipios que se ubican sobre la ribera del río Bogotá ha aumentado significativamente, sobre todo los municipios Gachancipá y Tocancipá con tasas de crecimiento de 3,27 y 6,24, respectivamente. La Tabla 6 presenta la tasa de crecimiento de los cinco municipios entre 1964 y 2005 de acuerdo con la información registrada para población total en los censos nacionales para los años 1964 y 2005.

Tabla 6 Tasa de crecimiento por municipio (1964-2005)

Municipio	Tasa de crecimiento (1964-2005)
Villapinzón	0.44
Chocontá	0.43
Suesca	0.58
Gachancipá	3.27
Tocancipá	6.24
Total	1.14

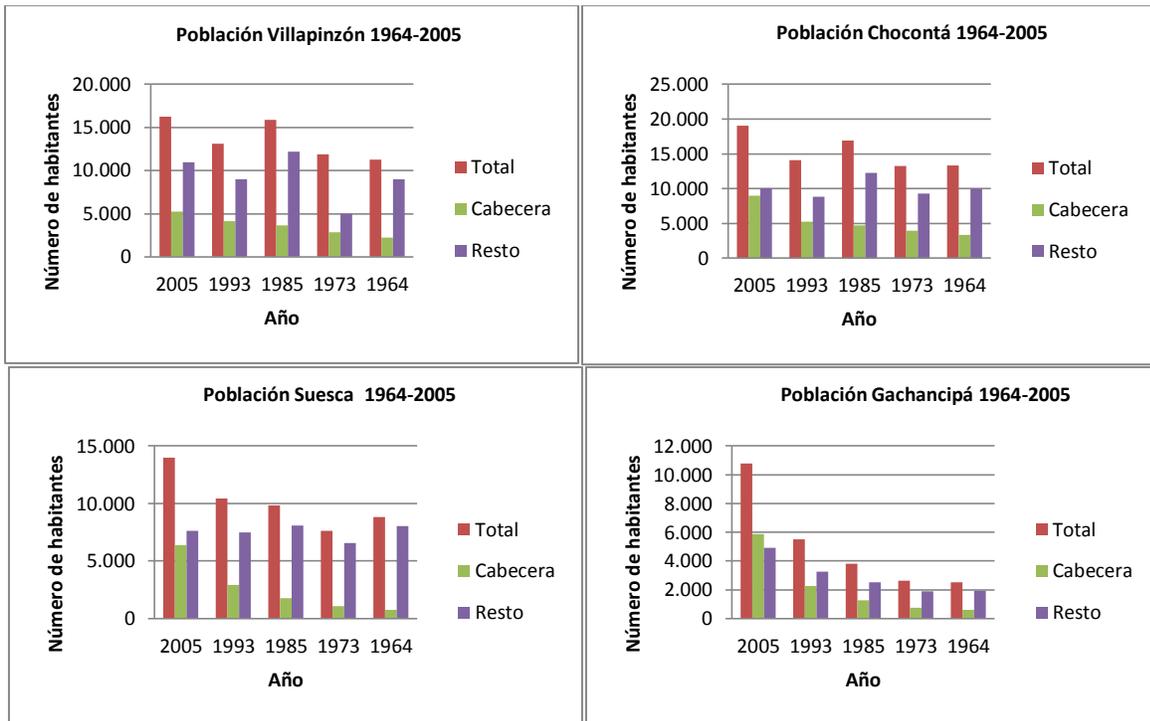
Fuente: Elaboración propia a partir de (DANE, 1969; 1978; 1989; 1994; 2005)

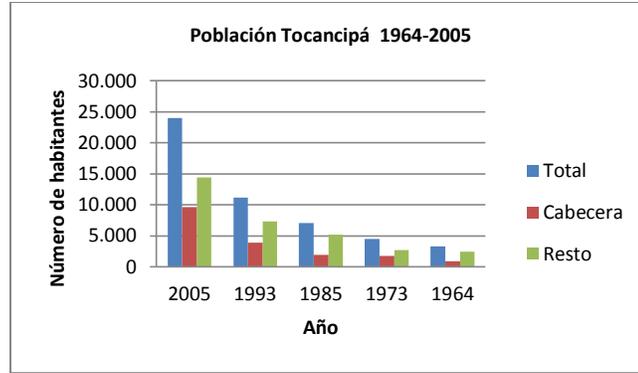
El valor total es una aproximación a lo que sería la tasa de crecimiento para el total de la población del sistema de estudio. Se tiene en cuenta que hay un porcentaje de la población de Suesca que pertenece a otra cuenca, sin embargo, se toma en cuenta la población total. Algunos factores que pueden incidir en el aumento en los niveles poblacionales son los procesos de expansión urbana e industrialización del campo. Gachancipá y Tocancipá son los más cercanos a la ciudad de Bogotá y son quienes han sufrido el proceso de industrialización de manera más acentuada.

La Figura 7 muestra las gráficas de población por municipio para el período 1964 y 2005 y la Figura 8 muestra la comparación por municipios en cada uno de los censos estudiados (1964, 1973, 1985, 1993, 2005). Se observa en estas gráficas que para los municipios de Villapinzón, Chocontá y Suesca se ha presentado un crecimiento poblacional pero ha sido gradual en comparación con el súbito crecimiento que presentan los municipios de Gachancipá y Tocancipá. Se observa que hasta 1993 la población de Villapinzón y Chocontá supera la población de Tocancipá. Sin embargo, en el 2005 ya ésta última supera a la de Villapinzón y Chocontá.

En todos los municipios se observa que el aumento gradual se encuentra sobre todo en la población de cabecera. A excepción del municipio de Tocancipá que presenta un aumento gradual para cabecera y resto, los demás municipios no presentan fluctuaciones graduales en la población correspondiente al resto.

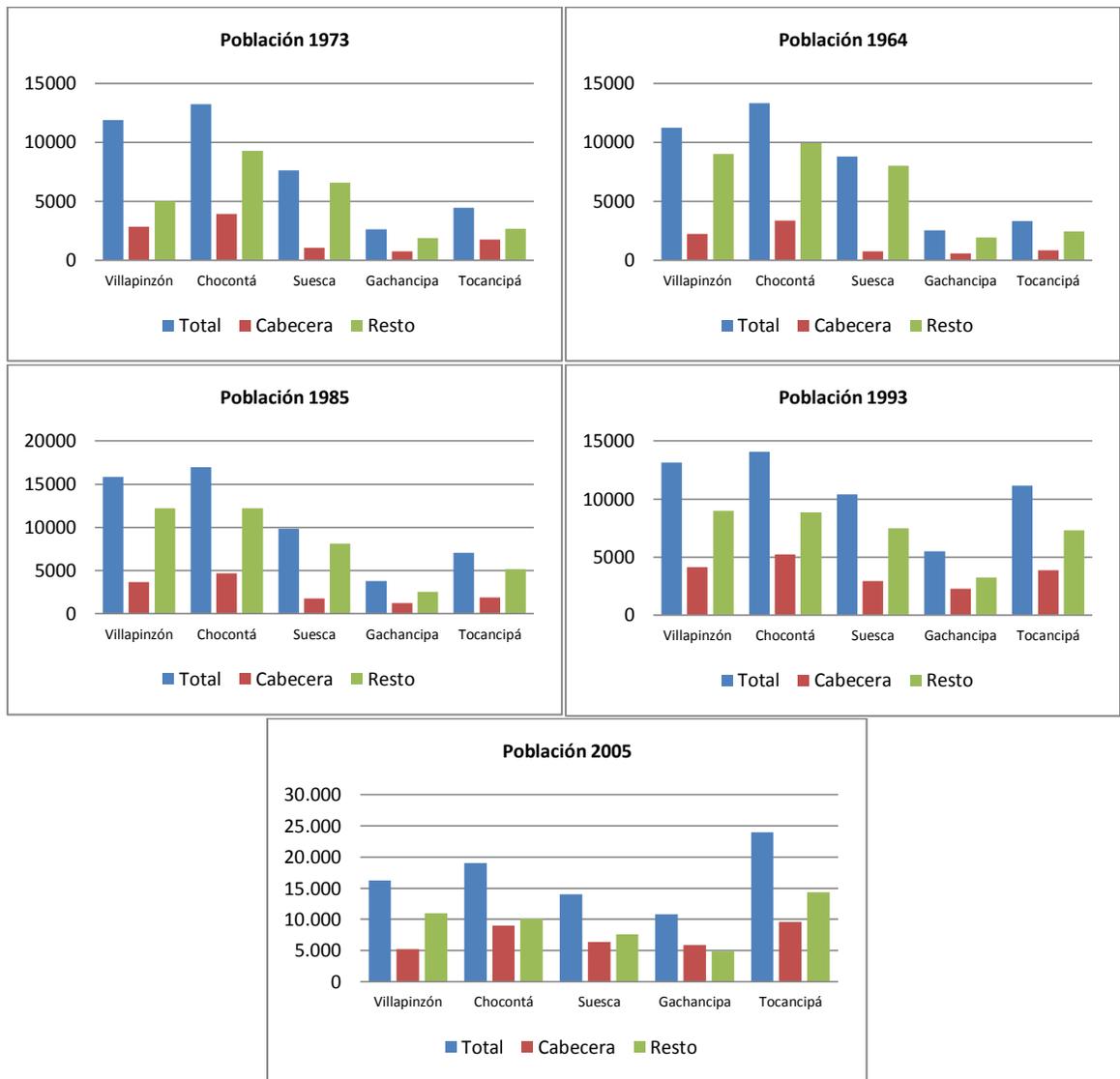
Figura 7 Población por municipio entre 1964 y 2005





Fuente: Elaboración propia a partir de (DANE, 1969; 1978; 1989; 1994; 2005)

Figura 8 Comparativo de población por años censales (1964 a 2005)



Fuente: Elaboración propia a partir de (DANE, 1969; 1978; 1989; 1994; 2005)

▪ Perfil económico:

El gran número de nacimientos de cuerpos de agua en la cuenca alta del río Bogotá y el paso del río por la mayoría de las poblaciones ofrece la posibilidad de usar el agua para todas las actividades económicas. Las actividades económicas predominantes son la agricultura, la ganadería, la horticultura, fruticultura, floricultura, el comercio, la industria y la artesanía (CAR-SGC, 1998). El aporte ambiental, agropecuario e industrial que el área de estudio hace a la región la destaca como un área de gran importancia para el país por sus facilidades en el sistema vial y de comunicaciones con la capital (CAR, 2006).

De acuerdo con la CAR (2006) con base en los Esquemas de Ordenamiento Territorial (EOT) de los municipios, el 80% de la población de la subcuenca alto Bogotá (municipios de Villapinzón, Chocontá y parte de Suesca) se dedica a actividades agropecuarias, presentando una mayor tendencia para el municipio de Villapinzón. El principal cultivo en esta región con mayor área sembrada es el cultivo transitorio de papa seguido por cultivos de fresa, habas, arveja, maíz y hortalizas (CAR, 2006). El municipio con mayor variedad de cultivos es Suesca pero el que produce mayor cantidad de papa es Villapinzón.

A pesar de la importancia de la agricultura en la región, la actividad del curtido de pieles ha tenido un papel fundamental en la dinámica económica de los municipios de Villapinzón y Chocontá pues ha sido una actividad que se realiza desde hace varias generaciones. Escobar (2004) señaló que el curtido de pieles en Villapinzón data de 1820 y algunos curtidores actuales no recuerdan una fecha exacta en la que haya empezado la curtición pues para ellos ha sido una actividad que han realizado sus ancestros (Comunicación oral, 2013⁵).

Según IDEA-SWITCH (2011) la economía de la región es principalmente de subsistencia, la mayoría de las empresas son de carácter familiar, entre 4 a 10 trabajadores (micro y pequeñas empresas). Generan empleo al 60% de la mano de obra disponible en la región, generando alrededor de 700 empleos directos. El número asciende a 4000 incluyendo trabajos indirectos (IDEA-SWITCH, 2011). CAR (2006) reporta la generación de 3 empleos en pequeñas curtiembres, 15 en medianas, 42 en grandes curtiembres y en total el sector para 2005 generaba 1258 empleos.

Con respecto a la agroindustria como renglón económico de la región, la floricultura ha tenido un fuerte impacto socio-económico debido a la alta generación de empleo de mano de obra no calificada en su mayoría femenina. Adicionalmente se suman

⁵ Esta comunicación se llevó a cabo el día 28 de abril en el municipio de Villapinzón con dos curtidores del municipio.

factores como la migración de población de municipios cercanos generando hacinamiento en los municipios y problemas de salud por contacto con agroquímicos (CAR, 2006). Por otra parte el uso de cantidades diarias y constantes de agua para riego, fertilizantes y pesticidas ha generado fuertes presiones sobre los cuerpos de agua a nivel de cantidad y calidad. En el área de estudio los municipios de Tocancipá, Suesca y Gachancipá son los que presentan cultivos extensivos de flores para exportación siendo Tocancipá el municipio en el que se encuentra la mayor área plantada (CAR, 2006; DANE, 2010).

La industria se ha configurado en las últimas dos décadas como otra de las actividades económicas importantes en la región sobre todo en el municipio de Tocancipá donde se ha conformado un parque industrial entre las veredas Canavita, Verganzo y La Fuente (CAR, 2006), veredas ubicadas en la ribera del río Bogotá o quebradas de drenaje. Gachancipá también ha aumentado el número de industrias asentadas en su territorio, más precisamente sobre el río Bogotá.

La actividad minera en la región se caracteriza por falta de técnica y responsabilidad, por planeación inexistente y por un fuerte impacto sobre el paisaje y sobre la prestación de servicios ecosistémicos a la población. En Chocontá se concentra la actividad de extracción a cielo abierto de gravilla, piedra, arena, arcilla y carbón. En Tocancipá, CAR (2006) reportó 58 canteras ubicadas en las veredas Esmeralda, Canavita, Egona y La Fuente.

El turismo es otra de las actividades económicas de la región relacionada con lugares como la Reserva Natural Nacimiento del Río Bogotá, el embalse del Sisga, la Laguna de Suesca, las Rocas de Suesca, entre otros. A pesar de lo anterior las administraciones municipales, departamentales y las autoridades ambientales aún no han logrado que sea una verdadera alternativa de empleo para la mayoría de la población y que a su vez se conserven los espacios naturales en donde se realiza la actividad.

4.2.4 Factores direccionadores del uso del agua en el territorio

Con base en la caracterización física y ecológica del sistema y de los perfiles histórico, social y económico, los factores direccionadores del uso del agua en el territorio de estudio se relacionan directamente con los diversos usos del agua; el uso doméstico relacionado con los asentamientos humanos y la expansión de la ciudad hacia el campo, el uso agrícola y pecuario relacionado con los sistemas agropecuarios localizados en la zona y el uso del agua por parte de las actividades de curtido de pieles, floricultura e industria. Para esta investigación en

particular los factores a analizar en detalle son: el curtido de pieles, la floricultura y la industria.

No se incluye el uso del agua por parte de los asentamiento humanos ni por parte de los sistemas agropecuarios debido a la complejidad que representa en términos de uso del agua doméstica las estimaciones de población flotante y las migraciones, y en términos de uso agrícola la variedad de cultivos, los requerimientos de agua para cada cultivo, la contaminación difusa, el flujo de nutrientes y energía, entre otros. Los anteriores factores merecen entonces una investigación posterior que pueda integrarse con el presente estudio con el fin de analizar la sostenibilidad de todos los usos del agua en la región.

A pesar de que la infraestructura para el manejo del agua (embalses) ha sido determinante en el cambio de régimen de flujo de agua en el río, no se incluye como factor de análisis debido al interés particular en el análisis de procesos químicos más que en obras de infraestructura. Adicionalmente en el período de estudio ya se habían construido todos los embalses de la región así que no se observaría el cambio sustancial a nivel ambiental.

En este acápite se analizan de manera histórica las actividades de curtido de pieles, floricultura e industria desde su establecimiento en la región hasta la actualidad identificando variables sociales, ecológicas, económicas e institucionales que han determinado cambios importantes en el desarrollo de la actividad. Es importante aclarar que las fechas de análisis de las actividades de curtido y floricultura no son las mismas debido a que la información consignada corresponde con lo disponible en diversas fuentes.

▪ **Curtido de pieles**

Como se menciona en el perfil histórico de la región, Escobar (1993) señala que la primera curtiembre se estableció en el municipio de Villapinzón para el año de 1820. A partir de 1970 se han realizado diferentes censos de esta actividad en los municipios de Villapinzón y Chocontá. La consolidación de estos estudios en términos de número de curtiembres en Villapinzón y Chocontá se muestra en la Tabla 7.

Para los años 1960, 1970, 1979, 1982 la información es tomada de censos realizados por la CAR. La información de 1960 se corrobora por medio de una de las entrevistas realizada a dos curtidores de la región. Para 1983 la información es tomada de Vargas (1983). CAR realizó un censo en 1982 y la información de base es la misma que utilizó Vargas en sus investigaciones. El Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) de 2000-2008 del municipio de Villapinzón aporta las cifras para 2001. Ojeda (2004) reporta las cifras anteriores y adicionalmente realiza una caracterización

para el 2004. La información de 2007 se registra en IDEA-SWITCH (2011). Se observa que el valor más alto en las industrias se presenta para el año 2001, año después del cual el número de curtiembres comienza a disminuir debido a que en esos años la CAR comienza a cerrar empresas por descargar directamente agua contaminada al río Bogotá.

El proceso productivo del curtido ha sufrido cambios sustanciales desde su establecimiento en la región a pesar de que la localización de las curtiembres se ha dado siempre en la ribera del río debido a la facilidad de tomar agua para sus procesos y descargar el agua residual contaminada y los residuos sólidos producidos (Ojeda, 2004). Antiguamente el proceso se realizaba en albercas y no en fulones o bombos como se realiza hoy en día, además, el agente curtiente para las pieles era el extracto del árbol del encenillo principalmente.

Escobar (1993) reportó la realización del proceso productivo en la antigüedad:

"...Se iniciaba con la pelada de la piel a base de ceniza y cal traída de las calizas de Ventaquemada, se dejaba la piel en remojo en un calero durante quince días para ablandarla, al cabo de los cuales se sacaba y se extendía para quitarle el pelo raspándolo con una pata. Luego se dejaba en un pozo con agua pura durante tres días. Después se manaba con un manisto para sacarle la cal de los poros y se descarnaba con una cuchilla larga o reversa. Enseguida era dejada en remojo un día para colocarla luego en otro pozo preparado con cáscara de encenillo o dividivi.

El Encenillo se molía de antemano en una pila con un pizón y era el encargado de teñir la piel, se sacaba de este último pozo y cocida en forma de zurrón, con fique y aguja de aria, se llenaba de agua y cáscara de encenillo. Al zurrón se le colocaban piedras encima para hacer "sudar la vaqueta". Este proceso hacía pasar por los poros el agua y teñía la piel. Se blanqueaba con ácido oxálico y bisulfito de sodio y por último se extendía al sol estirada y sostenida con trozos de madera..."

Este proceso se realizaba todavía con intensidad en la década del 60 y 70. Ya en la década del 80 la mayoría de las empresas curtía sus pieles con sulfato de cromo (Vargas, 1983).

Si bien algunos curtidores y fuentes como IDEA-SWITCH (2011) señalan que la curtición con cromo se comenzó a realizar aproximadamente en 1985 gracias a capacitaciones realizadas por la CAR, durante una de las entrevistas a uno de los curtidores se verificaron documentos que datan de fechas anteriores a 1985 donde ya las empresas de productos químicos habían introducido en la región la curtición con cromo. Desde siempre el agua ha sido tomada y descargada del río, en algunos casos, se suplen de agua de acueductos veredales y la descarga se realiza sobre las quebradas que drenan al río Bogotá.

El proceso productivo del cuero para las décadas del 80 y 90 ya se realizaba casi en su totalidad al cromo. De acuerdo con Ojeda (2004) el 80% de las curtiembres (82) en 1985 curtía con cromo, el 15% (16) curtían de manera mixta, es decir, con taninos y cromo, y el 5% (4) utilizaba únicamente extractos vegetales. Para 2004, el 84% (152) curte con cromo, 13% (23) curte de manera mixta y 3 (5) curte con taninos (Ojeda, 2004). En esta época aún no se recuperaba el pelo ni los demás residuos sólidos que se generan en el proceso.

Tabla 7 Número de curtiembres en Villapinzón y Chocontá desde 1970

MUNICIPIO	VEREDA	1960	1970	1979	1981	1982	1982	1983	1985	1993	2001	2004	2007
Villapinzón	Chiguala	-	-	-	-	-	-	-	-	6	6	-	-
	Casablanca	-	-	-	-	-	-	-	-	11	19	-	-
	Reatova	-	-	-	-	-	-	-	-	21	14	-	-
	Quincha	-	-	-	-	-	-	-	-	48	56	-	-
	San Pedro	-	-	-	-	-	-	-	-	33	36	-	-
	Total	-	-	-	-	76	73	-	81	119	131	115	-
Chocontá	Retiro de blancos	-	-	-	-	-	-	-	-	5	7	-	-
	Chingacío	-	-	-	-	-	-	-	-	42	44	-	-
	Total	-	-	-	-	14	14	-	22	47	51	67	-
TOTAL	12	36	62	87	90	87	87	103	166	182	182	105	

Fuente: Elaboración propia a partir de Ojeda (2004)

La Figura 9 presenta el proceso productivo considerado convencional en este sector que fue el que se utilizó durante aproximadamente dos décadas una vez se instauró el curtido al cromo y se incrementó el uso de insumos químicos variados. A partir de 1999, probablemente hasta el 2004 se llevó a cabo un proceso cierre de curtiembres por parte de la CAR que impactó fuertemente el sector del curtido de pieles. La razón del cierre era el vertimiento de efluentes contaminados directamente al río sin tratamiento afectando fuertemente la calidad del río. A partir de esta situación disminuye el número de industrias a pesar de que muchos curtidores continúan trabajando de manera ilegal al no tener otra alternativa de empleo (IDEA-SWITCH, 2011).

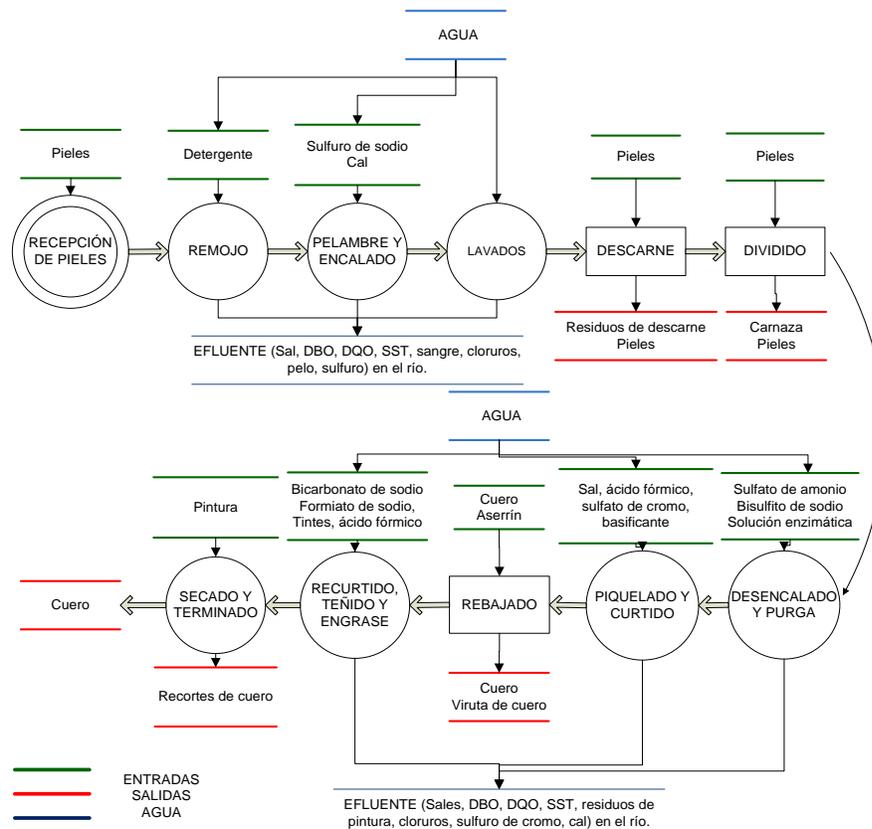
A partir del año 2004 se llevó a cabo un proceso de resolución de conflictos alrededor del manejo del agua en la región de Villapinzón y Chocontá (IDEA-SWITCH, 2011). Los conflictos comenzaron al finalizar la década del 90 donde se crea el marco legal del medio ambiente en Colombia y la autoridad ambiental

(CAR) se volvió más estricta con el sector de manera que decide cerrar las curtiembres. Sin embargo, no hubo de su parte un acompañamiento técnico y ambiental en cuanto a los mejoramientos que debían realizar las industrias para poder seguir funcionando.

De acuerdo con esta situación y como resultado de los diálogos abiertos llevados entre autoridades y curtidores se eligió la Producción Más Limpia (PML) como proceso de mejoramiento y de disminución de las cargas contaminantes vertidas al río. La implementación de nuevas prácticas se llevó a cabo de la mano de la Universidad Nacional de Colombia en el año 2006 y se comenzó a modificar el proceso en algunas operaciones para disminuir la cantidad de contaminantes al final del proceso con el fin de mejorar su situación legal frente a la autoridad.

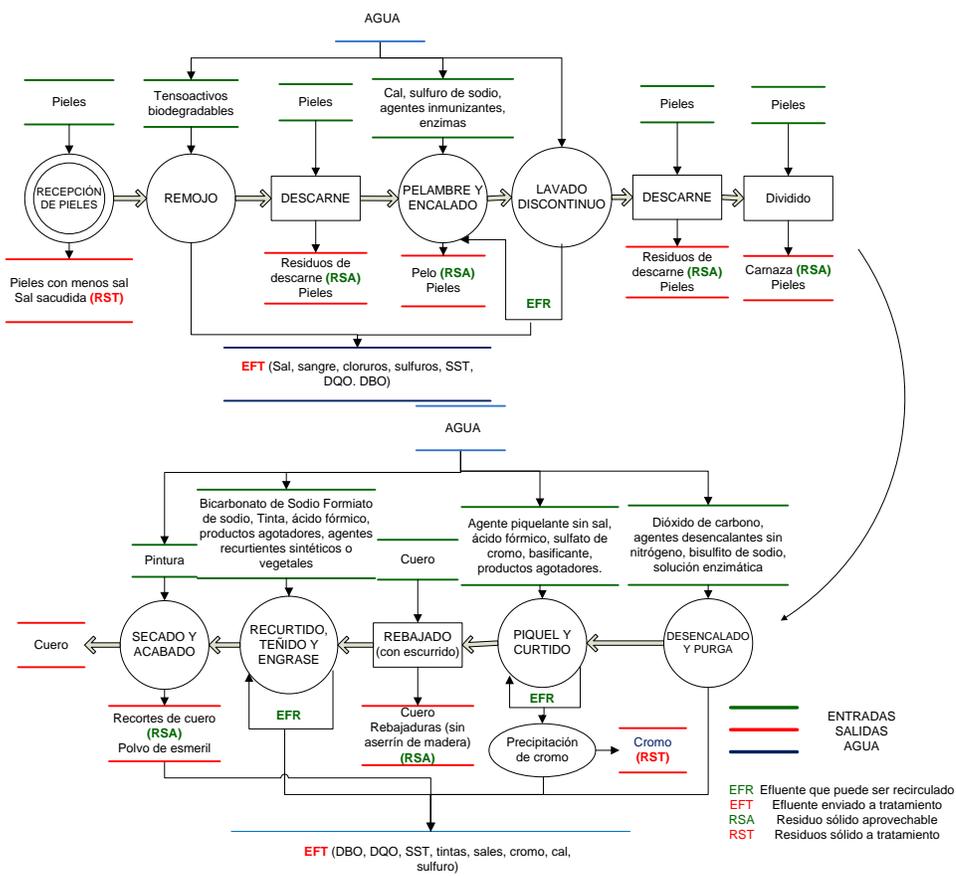
Algunas curtiembres en la actualidad realizan estas prácticas y han logrado disminuir la carga contaminante que vertían al río. La Figura 10 indica el proceso de curtido modificado en función de la PML, se observan aquí varias recirculaciones de agua en el proceso con el fin de disminuir el flujo de agua residual total.

Figura 9 Proceso productivo tradicional



Fuente: (IDEA-SWITCH, 2011)

Figura 10 Proceso productivo de curtido con PML



Fuente: (IDEA-SWITCH, 2011)

Para la estimación de los consumos de agua de las curtiembres en diferentes períodos de tiempo se analiza la información recopilada y se establece la validez de dicha información para el cálculo. Es necesario mencionar que los procesos de curtido en toda la región son muy variables, en términos de consumo de agua, de insumos químicos e inclusive de número de pieles procesadas. Sin embargo, se toma de las fuentes reportadas la información sobre consumo de agua por tonelada de piel, número de pieles procesadas al mes y número total de curtiembres. Se estiman valores de consumo (m³/mes) para 1960, 1983/1985, 2004 y 2007. La información de 1960 se toma de comunicación oral con dos curtidores para número de curtiembres, pieles y consumo de agua. El número de curtiembres para este año también lo reporta CAR (1960).

Para 1983 se calcula a partir de Vargas (1983) quien reporta cifras para número de curtiembres, número de pieles procesadas al mes en todo el sector y consumo de agua por tonelada de piel. Para 1985 se utiliza el mismo valor de consumo de agua que Vargas reporta, se estima el número de pieles por curtiembre a partir del total de industrias reportadas para 1985 por la CAR y se promedian

ambos valores para tener un dato estimado del primer lustro de 1980.

En 2004 se estimó el valor de consumo de acuerdo con Ojeda (2004) que reporta número de curtiembres totales y con IDEA-SWITCH (2011) que contiene información de planes de manejo ambiental realizados por la Cámara de Comercio de Bogotá (CCB) realizados a 6 industrias. En ellos se incluye el balance de materia de cada curtiembre donde se extrae la información de pieles y consumo de agua por tonelada de piel.

La estimación para 2007 se realiza con base en IDEA-SWITCH (2011) quien reporta un número total de curtiembres por tamaño y un valor estimado de consumo de agua en 2008-2009. Para estos datos fue necesario replantear el número de pieles procesadas por mes que reporta la literatura con base en el conocimiento del sector durante este período pues el número de pieles por tamaño era más alto del que podía ser en la realidad, lo cual además alteraba el cálculo final.

El año 2005 se presentó el cierre de las curtiembres y esto generó un quiebre temporal en la historia de la actividad del curtido en la región pues se convirtió en el estímulo que los llevó a pensar en la PML y en la prevención como una alternativa. Los valores resultantes de consumo de agua en los diferentes periodos explicados se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8 Consumo de agua en el sector curtiembre para cuatro periodos.

Período	Consumo de Agua (m ³ /mes)
1960	1324,8
1983/1985	27007,71
2004	54785,31
2007/2009	41159,58

Fuente: Elaboración propia

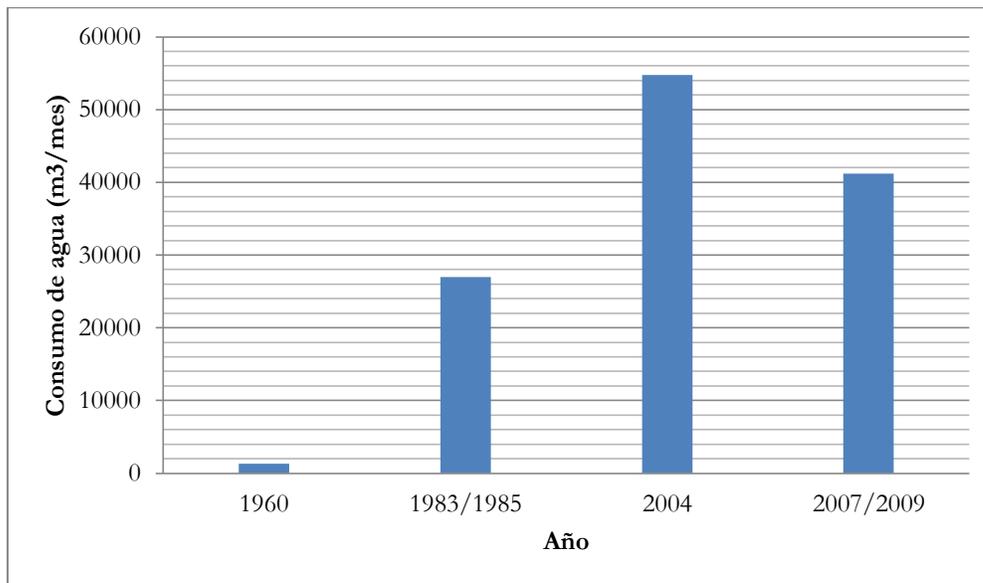
De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 8 se observa que el consumo de agua para 1960 es veinte veces menor al reportado para 1980. Esto se debe a que en 1960 apenas se encontraban 12 curtiembres en el sector y se curtían muy pocas pieles (cerca de 600 en total). Adicionalmente se asumió que la totalidad de las curtiembres realizaba el proceso artesanal (Comunicación Oral, 2013). Entre 1983/1985 y 2004 se presenta un aumento del doble en el consumo de agua por mes debido principalmente al número de curtiembres en la región a pesar de que el valor reportado por Vargas (1983) para consumo es de 57,1 m³/ton de piel fresca mientras que a partir de IDEA-SWITCH (2011) el valor de consumo por tonelada de piel para 2004 es de aproximadamente 14 m³/ton. En 2007/2009 se observa una disminución en el consumo de agua por mes, por una parte debido al menor

número de curtiembres y al valor de consumo por tonelada de piel que reporta IDEA-SWITCH (2011) para 2008, 12,39 m³/ton de piel fresca.

La Figura 11 muestra gráficamente los valores de consumo de agua mensuales del sector curtiembres en los cuatro períodos de tiempo. Se observa que los primeros tres períodos muestran aumentos graduales debido al aumento de número de curtiembres en la región y del aumento en el consumo que sugirió el cambio de curtido artesanal a curtido al cromo. También se observa la disminución en el consumo de agua entre el período 2004 al 2007/2009 donde se redujo el número de industrias debido al cierre ocasionado en 2005 y a las reducciones en el consumo de agua ocasionadas por la implementación de PML en el sector.

Como ya se mencionó estos valores resultantes pretenden mostrar una tendencia en el consumo del agua del sector y debido a la alta variabilidad en los procesos de curtidos los resultados son una aproximación a lo que debería ser un registro importante como el consumo del agua. La tradición indica que los curtidores de la región no toman registros de manera que la cuantificación de variables de proceso se torna difícil.

Figura 11 Consumo de agua en curtiembres para cuatro períodos



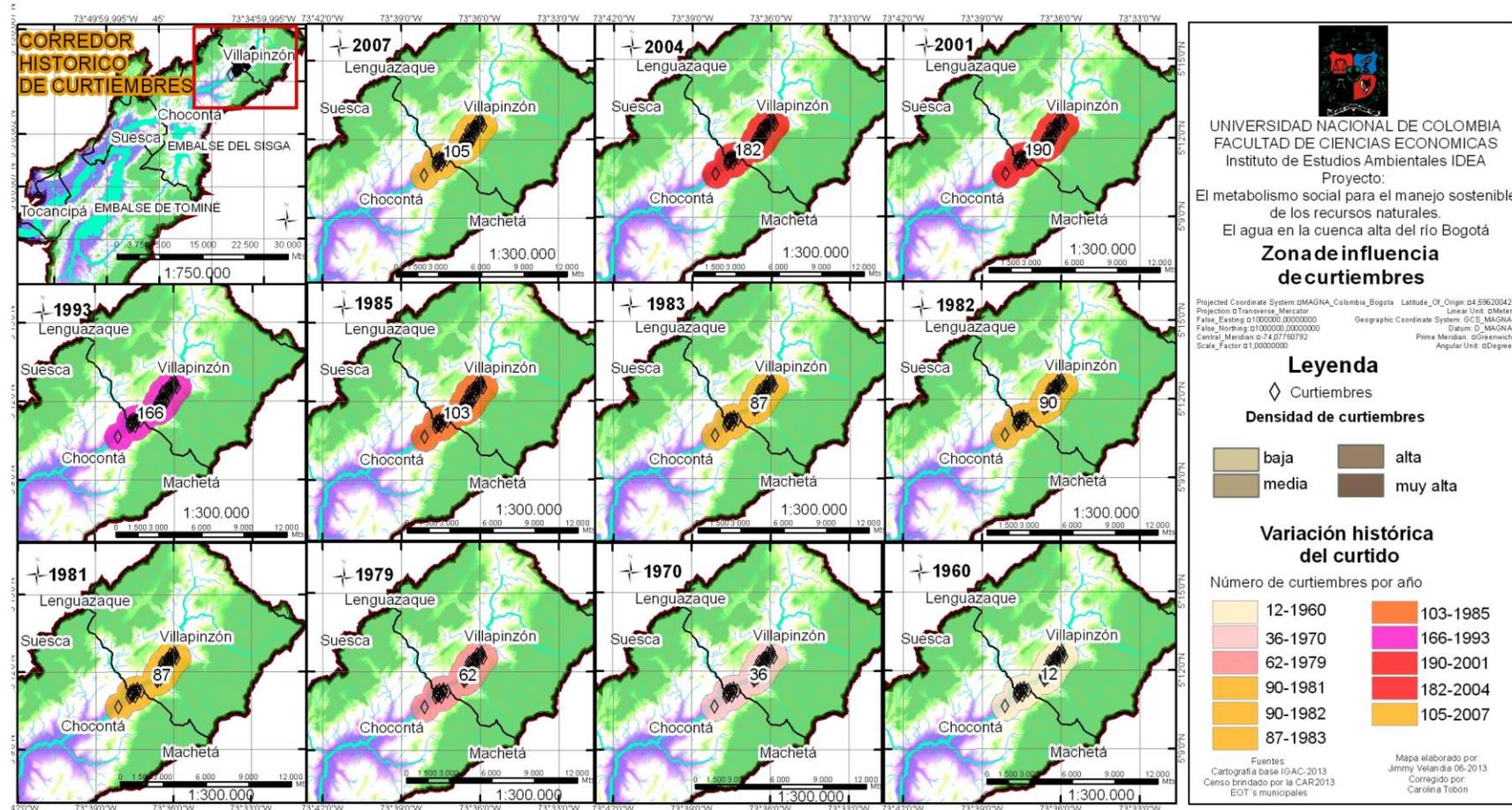
Fuente: Elaboración propia

La actividad de curtido tiene un alto impacto sobre la calidad del agua debido a que los efluentes del proceso contienen altas cantidades de materia orgánica, de sólidos suspendidos totales, de sulfuros, de cromo y demás insumos químicos utilizados en el proceso. De acuerdo con la comunicación oral llevada a cabo con los curtidores del municipio, el proceso artesanal no utilizaba ni sulfuro ni cromo, únicamente cal y cáscara de encenillo. Al

finalizar el proceso se adicionaban algunos ácidos y sales pero no tenían el impacto que posteriormente tendrá el sulfuro de sodio y las sales de cromo junto con los demás productos químicos utilizados. Lo anterior indica que para 1960 el agua vertida contenía altas cantidades de materia orgánica, sólidos, probablemente grasas y aceites. No se encontraban entonces trazas de sulfuros ni cromo. En la década de 80 y 90 se presentaron altos niveles de contaminación vertida directamente al río y para la década del 2000 debido al cierre y a los procesos de PML las descargas directas al río disminuyeron lo que ha contribuido al mejoramiento de la calidad del río.

El mapa presentado en la página siguiente muestra espacialmente la zona de influencia de las curtiembres indicando el aumento de número de curtiembres en la región de estudio desde 1960 hasta la actualidad. La intensidad de los colores representa la presión ejercida por la actividad pasando de rosado claro a rojo intenso. Es interesante observar que los años 2001 y 1990 registran el mayor número de curtiembres y por lo tanto como se mostró en la Figura 11 el mayor consumo de agua para 2004. El 2007 indica una intensidad menor en la presión sobre el agua debido a la disminución del número de industrias pero también debido a un mejoramiento leve de sus prácticas de consumo y producción.

Mapa 3 Zona de influencia de curtiembres



Es necesario continuar e intensificar los procesos de PML con los curtidores para que interioricen el cambio hacia la prevención de la contaminación y a su vez hacia la disminución de su metabolismo en relación con el río.

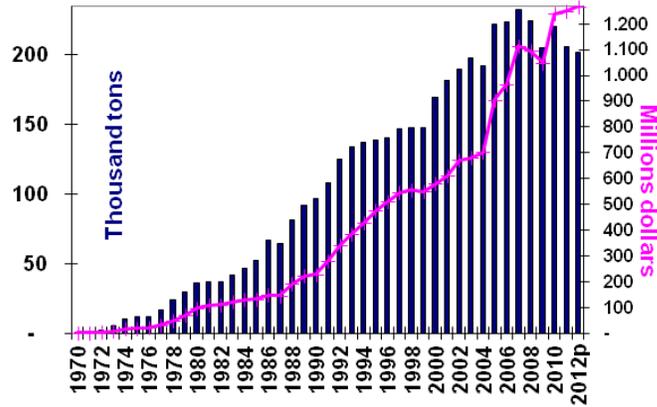
▪ Floricultura

Los cultivos de flores en el área de estudio se establecieron en la década del 70. En la actualidad factores como la revaluación del peso frente al dólar y el encarecimiento de la mano de obra han colocado al sector en una difícil situación (DANE, 2010) presentándose cierre en varias plantaciones instauradas hace varias décadas.

En la década del 60 los costos de mano de obra, construcción e infraestructura en toda la Sabana de Bogotá eran inferiores a los de países desarrollados lo cual dinamizó el comienzo de la floricultura a gran escala con orientación a la exportación (SENA-UNAL, 1994). Adicionalmente la ubicación del aeropuerto El Dorado motivó a muchos cultivadores a asentarse en la parte occidental de la sabana, con la facilidad de consumo de agua, uso de suelo y cercanía al aeropuerto. Rápidamente la actividad comienza a crecer y a expandirse cada vez más hacia el norte de la sabana recorriendo el cauce del río y apropiándose de su ribera. Es así como en la década del 70 ya comienzan a existir plantaciones de flores en municipios como Suesca ubicados a 60 km hacia el norte de la ciudad.

Colombia es actualmente el segundo productor de flores a nivel mundial (Asocolflores, 2013), representó en 2004 el 14% de la producción mundial y sus exportaciones representan el 3% del total de las exportaciones nacionales (DANE, 2010). La Figura 12 muestra las exportaciones del país desde 1970 hasta la actualidad en millones de toneladas. Se observa un marcado aumento de las exportaciones sin embargo en el año 2007 aproximadamente cambia la tendencia y han venido disminuyendo las exportaciones, como se ha dicho debido principalmente a la caída en el precio del dólar y a las consecuencias del Tratado de Libre Comercio (TLC) con Estados Unidos (DANE, 2010).

El cultivo de flores se caracteriza por una alta intensidad en mano de obra: de acuerdo con Asocolflores el sector floricultor contrata alrededor de 4 veces más trabajadores por hectárea que el banano (segundo en la lista) y más de 7 veces más que el café (Asocolflores, 2013) por lo anterior es un renglón laboral importante en los municipios en los que tiene presencia. Andrade (1991) reporta 30 trabajos por ha, mientras que Asocolflores da una cifra de 14 para la actualidad. Esto indica que en dos décadas el número de trabajadores por hectárea ha disminuido a la mitad.

Figura 12 Exportaciones de Colombia 1970-2012

Fuente: (Asocolflores, 2013)

En décadas pasadas era común encontrar referencias respecto a los malos tratos que los trabajadores (ante todo mujeres) recibían en estos cultivos (Insuasty, 2008). Estos malos tratos incluían la exposición constante trabajo bajo pesticidas, el no respeto a los permisos de embarazo y lactancia, largos horarios, salarios bajos y en general poco cuidado por la salud del trabajador (Insuasty, 2008). En la actualidad, las exigencias de certificaciones internacionales para exportación de flores han estimulado el mejoramiento de las condiciones de trabajo en algunos cultivos de flores (Comunicación Oral, 2013).

El consumo de agua en los cultivos de flores es difícil de determinar debido a la diversidad de fuentes hídricas, que incluyen aguas lluvias, pozos profundos, acueducto y la toma directa del río Bogotá. El informe de resultados de DANE (2010) respecto al censo de floricultura del 2008, establece la prioridad del consumo de aguas lluvias (DANE, 2010 pp. 51); sin embargo, en comunicación oral⁶ se indicó que debido a los problemas económicos del sector muchas empresas suspendieron la construcción de infraestructura dedicada a la recolección de aguas lluvias, y captan el agua sobre todo del río Bogotá. En períodos secos extraen el agua de pozos profundos, sin embargo esto no está controlado por la corporación ambiental.

Los cultivos de flores para exportación tuvieron un auge en las décadas de los 80's y 90's pero desde 1995 aproximadamente empezaron a sufrir problemas financieros relacionados con la caída del dólar (DANE, 2010). La migración de cultivos de suelo a hidropónicos se dio tras el agravamiento de la plaga del hongo *Fusarium* y luego de intentar desinfectar el suelo con gran cantidad de pesticidas, al presente posiblemente más del 95% de la

⁶ Esta comunicación se realizó el 14 de mayo en el municipio de Suesca a un técnico agrícola del municipio de Suesca, trabajador por 25 años del cultivo de flores La Aurora.

producción en el área de estudio se realiza en hidroponía (Comunicación oral, 2013).

Con la implementación del sistema hidropónico y el riego por goteo una empresa puede ahorrar hasta un 70% en mano de obra (Comunicación Oral, 2013). De acuerdo a la superficie cultivada identificada para cada año en diversas fuentes y a las estimaciones de requerimientos de agua para riego suministrada en comunicación oral, el consumo de agua en los diferentes períodos de tiempo señalados es presentado en la Tabla 9 a partir de 1970 hasta el año 2009. No fue posible añadir los datos de producción debido a que no se encuentran desagregados por municipio en ninguna de las fuentes. La Tabla 10 muestra el total de consumo de agua para el área de estudio de acuerdo a los períodos mencionados.

Vale la pena mencionar que estos valores deben ser verificados con un estudio más detallado sobre el flujo de agua en la floricultura de acuerdo con los valores específicos de requerimientos de agua para cultivo y tipo de flor y valores de evapotranspiración en el área de estudio. Sin embargo, dado el alcance de este estudio se tomaran estos valores para identificar una tendencia en el uso intensivo del agua por parte de la actividad de la floricultura para sentar las bases para la realización de un estudio más detallado. Sin embargo, las tendencias observadas indican que hay un marcado aumento en el área cultivada en todos los municipios lo que aumenta a su vez los flujos de agua virtual hacia los países importadores, como Estados Unidos, Alemania y Holanda.

Tabla 9 Superficie cultivada y consumo de agua por municipio de 1970 a 2009.

Municipio	Año	# cultivos	Área (ha)	m3/semana	m3/mes	m3/año
Suesca	1970	0	0	0	0	0
	1975	1	11	4.125	16.500	198.000
	1981	4	17	6.375	25.500	306.000
	1990	17	103	38.698	154.793	1.857.510
	2009	20	194	72.750	291.000	3.492.000
Gachancipá	1970	0	0	0	0	0
	1975	0	0	0	0	0
	1981	2	11	4.125	16.500	198.000
	1990	13	46	17.072	68.288	819.450
	2009	9	118	44.250	177.000	2.124.000
Tocancipá	1970	2	3	1.125	4.500	54.000
	1975	2	3	1.125	4.500	54.000
	1981	4	10	3.750	15.000	180.000
	1990	17	74	27.681	110.723	1.328.670
	2009	31	404	151.500	606.000	7.272.000
Chocontá	1970	0	0	0	0	0
	1975	0	0	0	0	0
	1981	0	0	0	0	0
	1990	2	13	4.875	19.500	234.000
	2009	2	3	1.125	4.500	54.000

Fuente: Elaboración propia a partir de Andrade (1991); SENA-UNAL (1994); DANE (2010)

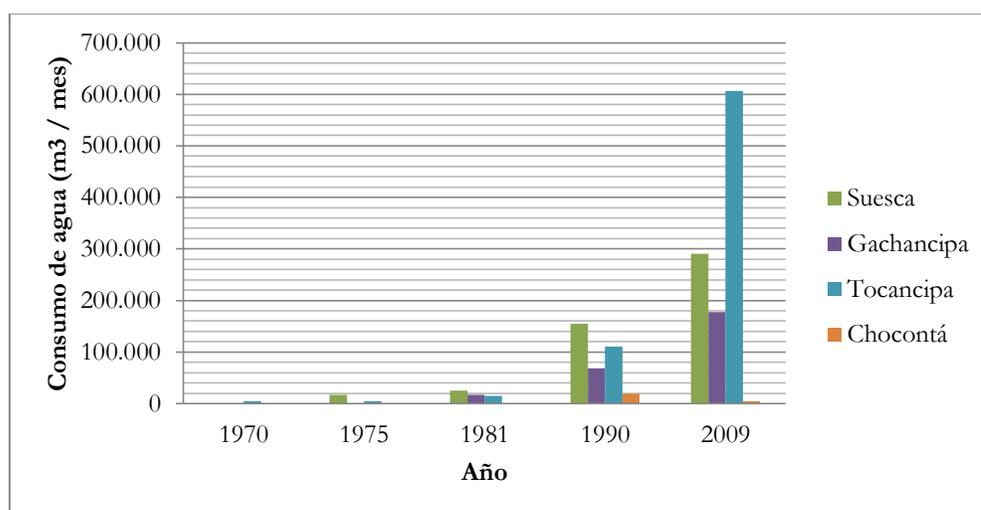
Tabla 10 Consumo de agua total para cada periodo y municipio

Municipio	CONSUMO DE AGUA (m3/mes)				
	1970	1975	1981	1990	2009
Suesca	0	16.500	25.500	154.793	291.000
Gachancipa	0	0	16.500	68.288	177.000
Tocancipa	4.500	4.500	15.000	110.723	606.000
Chocontá	0	0	0	19.500	4.500
TOTAL	4.500	21.000	57.000	353.303	1.078.500

Fuente: Elaboración propia a partir de Andrade (1991); SENA-UNAL (1994); DANE (2010)

Es necesario mencionar que los valores para los años 1970, 1975, 1981 y 1990 pueden ser sensiblemente mayores a los presentados debido a que el requerimiento de agua para riego utilizado en los cálculos es el reportado en comunicación oral para la actualidad. De acuerdo con entrevistas realizadas, los cultivos de flores en el pasado solían usar mucha más agua por hectárea que en la actualidad. Sin embargo, el área cultivada es la determinante de la cantidad de agua utilizada en el proceso y ésta innegablemente ha tenido un gran aumento.

La Figura 13 presenta gráficamente los consumos de agua por mes en cada municipio durante cada período de tiempo. Se observa el cambio drástico en el consumo de agua en treinta años por parte del sector floricultor, es interesante observar que Suesca ha tenido un mayor crecimiento que el municipio de Gachancipá siendo Suesca un municipio más alejado de la capital y que en la década del 90 Chocontá tuvo un papel importante en la floricultura de la región. Para Tocancipá el crecimiento del área cultivada, por lo tanto de consumo de agua, en los últimos diecinueve años ha sido dramático.

Figura 13 Consumo de agua total de la floricultura por período y municipio

Fuente: Elaboración propia a partir de Andrade (1991); SENA-UNAL (1994); DANE (2010)

La floricultura en la sabana de Bogotá y en este caso en la región de estudio ha tenido un avance exponencial colonizando territorio de la ribera del río por las ventajas en términos de agua, tierra y características del suelo. En ocasiones creciendo hacia el piedemonte con el fin de aprovechar el agua que llega por escorrentía y el agua de las quebradas, lo que en ocasiones ha podido lograr su desecamiento. Durante el trabajo de campo realizado, se tuvo un testimonio de una habitante de la vereda de Palmira en el municipio de Suesca quien relataba que la empresa Toto Flowers ubicada muy cerca de su predio había desviado la Quebrada La Susana únicamente para su abastecimiento, lo que hacía que ella y su familia tuvieran que recoger agua de escorrentía para sus cultivos y sus animales o en ocasiones desplazarse hasta el río (Comunicación oral, 2013).

Es importante anotar que en los últimos años los cultivadores de flores se han visto obligados por el mercado internacional a mejorar sus procesos en términos de manejo de agua, manejo integrado de plagas y en el trato a sus trabajadores. De esta manera adquieren sellos como Flor Verde que amplían las posibilidades de exportación y estimulan el mejoramiento ambiental. Sin embargo, no hay un control real de parte de la autoridad acerca de las fuentes de agua, la cantidad utilizada, la calidad de sus vertimientos y las transformaciones al paisaje que surgen de la actividad de la floricultura.

El mapa presentado en la página siguiente muestra de manera espacial la variación histórica del consumo de agua por parte de la floricultura en la zona de estudio. En 1970 la floricultura había apropiado parte del territorio del municipio de Tocancipá pero rápidamente se va apropiando de los municipios de Suesca y Gachancipá. En la década del 90 surge Chocontá como un punto importante para la floricultura en la sabana pero hacia el 2009 nuevamente disminuye la actividad en este municipio.

▪ **Industria**

La llegada de la industria a la región, a pesar de profundizarse ante todo en la década del 2000, se dió a finales de la primera mitad del siglo XX. La Tabla 11 presenta algunos tipos de industrias presentes en la zona Zipaquirá⁷ para 1960 de acuerdo con estudios realizados por la CAR (CAR, 1960; 1966). Es importante anotar que la única empresa que demanda un consumo de agua significativo para esta época es la maltería ubicada en Tocancipá, las demás industrias registradas en los censos de la corporación corresponden a panaderías o pastelerías.

⁷ De acuerdo con la clasificación por zonas en el censo realizado por la CAR (CAR, 1960) la zona que corresponde al área de estudio es la Zona Zipaquirá

Mapa 4 Variación histórica de la floricultura

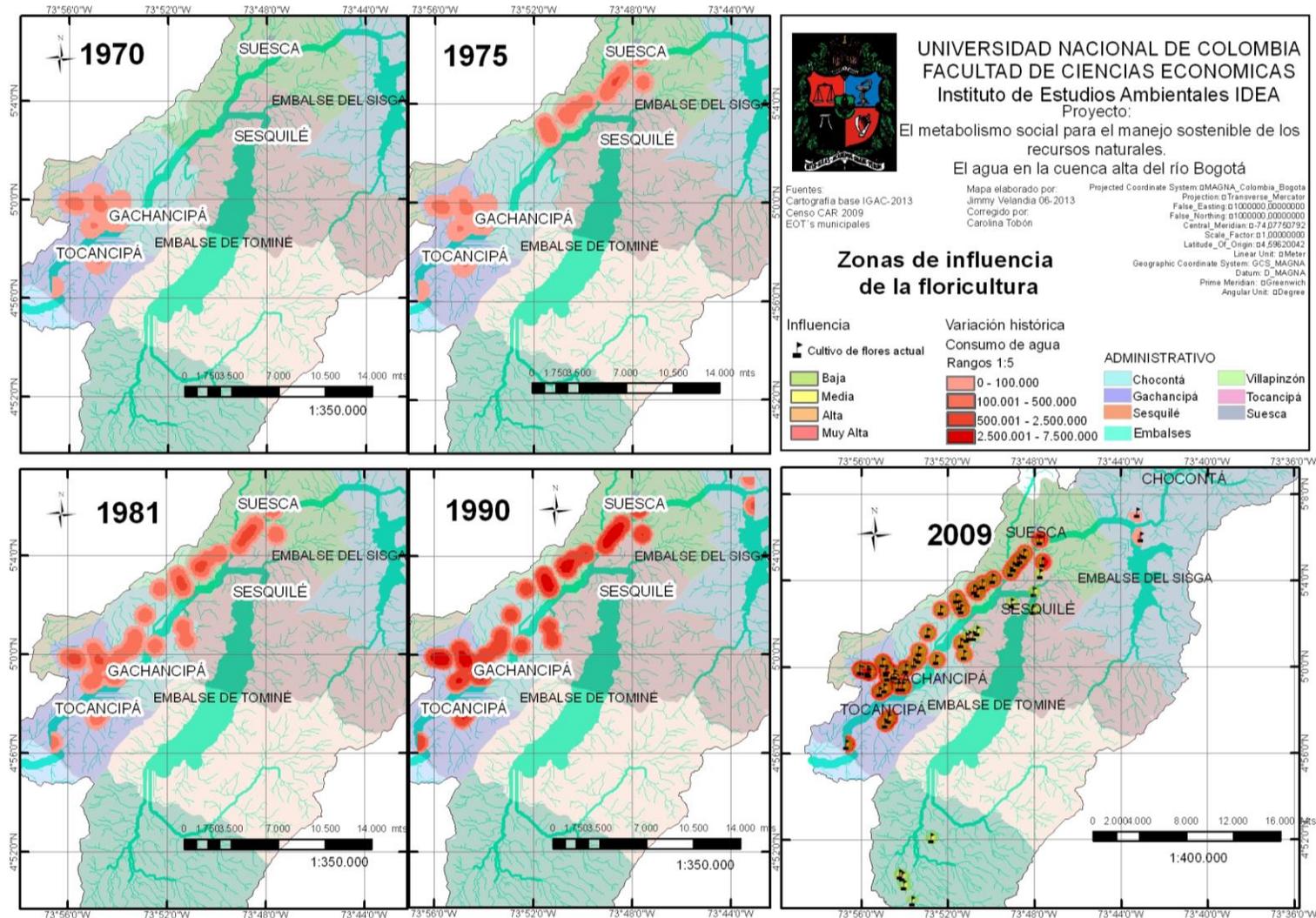


Tabla 11 Industrias presentes en la zona Zipaquirá

Tipo	1958	1960	1963
Alimentos	137	71	59
Bebidas		1	1
Textiles	2	2	
Cuero excepto calzado	3	6	12
Químicos	1	1	
Minerales no metálicos	24	24	20
Productos metálicos excepto maquinaria y transporte	2	3	2
Maquinaria y eléctricos		1	
Industrias manufactureras diversas	1	1	1

Fuente: CAR, (1960; 1966)

De acuerdo con (SENA-UNAL, 1994) el número total de industrias aumentó en la región centro norte de la sabana de Bogotá de 10 a 16 entre 1974 y 1986; en ese mismo periodo aumenta de 1924 a 2161 en Bogotá, de 50 a 65 en la zona sur y de 36 a 49 en la zona occidente (SENA-UNAL, 1994, pp. 155). Por lo anterior, se puede concluir que la localización industrial significativa en la región se dio ante todo en las últimas dos décadas.

En un estudio realizado en 1992 se encontraron en la zona de estudio 25 empresas (1 de lácteos en Suesca, 21 en Tocancipá y 3 en Villapinzón) (Herrera, 1992). Sin embargo las tres reportadas para Villapinzón incluían un cultivo de papa, el matadero municipal y una cooperativa de vivienda. Las industrias de Tocancipá incluían algunos cultivos de flores, el matadero municipal, la termoeléctrica e industria química y metalmecánica. Entre 1986 y 1992 se presentó un aumento en el número de industrias en la zona, teniendo en cuenta que el número reportado para 1986 incluía toda la sabana centro norte, dentro de la cual se encuentra el municipio de Zipaquirá.

De acuerdo con un inventario industrial realizado por el municipio de Tocancipá durante 2012 en la actualidad se tienen registradas 88 industrias que para este estudio se clasificaron en 8 categorías. La Tabla 12 muestra el número de industrias por categoría presente en el municipio. En el Anexo B se presenta cada una de las industrias por categoría y su ubicación. No fue posible establecer para ellas un valor de consumo de agua debido a la variabilidad en los procesos, variables y a las diferencias en los consumos de agua de cada una.

Tabla 12 Tipos y número de industrias en Tocancipá en la actualidad

Categorías	Número
Servicios y comercio	32
Metalmecánica	15
Química	14
Farmacéutica	6
Papel y textiles	4
Alimentos y bebidas	6
Madera	5
Construcción y otros	6
TOTAL	88

Fuente: (Gerencia de Medio Ambiente, 2012)

A pesar de que los censos económicos del DANE suministran una información importante en términos de industrias, los resultados son agrupados por departamentos y no por municipio, por lo cual no resulta de utilidad para el presente estudio.

De acuerdo con el censo de usuarios realizado por la CAR en 2009, Villapinzón tiene registradas 26 industrias de las cuales 25 son curtiembres pero no se reporta el caudal. Chocontá tiene 9 concesiones industriales, 4 para industria alimenticia y 6 para curtiembres, tampoco se registran los caudales de dichas concesiones. Suesca tiene concesiones a una industria de alimentos, dos de industria manufacturera y una minera. La industria de alimentos reporta 0,0047 L/s. Gachancipá y Tocancipá que son dos de los municipios más importantes en términos de industria reportan únicamente dos concesiones para Gachancipá (petrolera y minera) y tres para Tocancipá (metalmecánica, petrolera y minera). Ninguna de las concesiones para estos dos municipios reporta datos de caudal (CAR, 2009).

Según información suministrada por la CAR Sabana Centro en el municipio de Gachancipá se tienen registradas 27 concesiones de agua, muchas de ellas a particulares y cultivos de flores. Únicamente se encuentra entre estas concesiones una industria que reporta el mayor dato de caudal de 30,26 L/s. Las demás concesiones varían entre 0,01 L/s a un particular y 6,78 L/s a la Sociedad Flores del campo Ltda. En el municipio de Tocancipá se registran 38 concesiones de agua reportando el mayor caudal concedido a Leasing Colombia S.A con cuatro concesiones de 10,19 L/s. Las demás concesiones reportan datos de caudal entre 0,013 L/s de la diócesis de Zipaquirá y 6,2 L/s otorgado para Colombiana Kimberly Colpapel S.A junto con otra concesión de 0,56 L/s para la misma empresa. La Sociedad Diaco S.A reporta un caudal de 6 L/s y algunas otras concesiones son otorgadas a sociedades o particulares.

En términos de vertimientos para Tocancipá la CAR reportó 67 vertimientos, uno de estos reportes indica que no hay un usuario que no cuenta con el permiso de vertimiento, los demás tienen autos de requerimientos o efectivamente cumplen con un Plan de Manejo y saneamiento de vertimientos. 27 de estos vertimientos se dirigen directamente al río Bogotá, 8 al alcantarillado municipal, 21 a quebradas aledañas al río y 15 aproximadamente a otros tipos de fuentes receptoras como campos de infiltración, vallados y pozos sépticos. El municipio de Gachancipá reporta únicamente cinco vertimientos, uno de los cuales no cuenta con permiso de vertimiento y los demás se señala que se encuentran "por decidir".

Es importante mencionar que el sector industrial a pesar de tener un alto impacto en términos ambientales por el uso de recursos y la transformación social y paisajística es el sector menos estudiado en el área de estudio. No se encontraron disponibles censos históricos que reporten el total de las industrias en la zona, únicamente se recibió de parte del municipio de Tocancipá las industrias que el municipio tienen registradas que son 88, sin embargo se observó durante el trabajo de campo que las industrias del municipio son muchas más. Si bien la única información sobre consumos y vertimientos se recibió por parte de la Oficina Provincial CAR Sabana Centro se observa que esta información no reproduce la situación real de los municipios de Gachancipá y Tocancipá. Sin embargo es una base sobre la que se debe ejercer un control real de los vertimientos de las industrias en esta área debido a que la afectación a la calidad de agua en el río afecta la sostenibilidad en el abastecimiento de agua para la población.

4.2.5 Modelo conceptual del sistema

El modelo conceptual del sistema se construye con base en las premisas de Walker et al. (2002) con respecto a un sistema socio-ecológico. Para este caso particular, con ayuda de los perfiles histórico, social, económico y la caracterización física y ecológica del sistema se establecieron los ecosistemas presentes en el área de estudio y sus servicios ecosistémicos asociados, asentamientos humanos, actividades económicas de importancia en el uso del agua y los actores presentes en la cuenca, actores formales como administraciones municipales, corporación ambiental, gobernación y Ministerio de Ambiente y actores no formales como los usuarios (domésticos, agrícolas, agroindustriales e industriales).

La Figura 14 presenta el modelo conceptual del sistema de estudio en términos de las interacciones entre los anteriores factores. Las interacciones se clasificaron como: provisión (ecosistemas - servicios ecosistémicos hacia las actividades económicas), afectación (actividades económicas sobre ecosistemas - servicios ecosistémicos) y gobernanza -rendición de cuentas, como una

interacción recíproca entre actores formales de más alta jerarquía (MADS, G, CAR) sobre actores formales de menor jerarquía (AdM - AV, AM) o actores no formales como todo tipo de usuarios.

En el modelo construido es importante resaltar las relaciones de afectación (flechas rojas) que se dan entre las actividades económicas y los ecosistemas-servicios ecosistémicos presentes en el área de estudio. A su vez, la relación entre los sistemas sociales y naturales es recíproca por cuanto estos ecosistemas, gracias a sus funciones ecológicas, generan relaciones de provisión (flechas verdes) con las actividades económicas y poblaciones. Las relaciones de provisión se dan en términos de prestación de servicios ecosistémicos como la regulación del ciclo hidrológico, la provisión de agua, el control de inundaciones y la depuración natural. De esta manera se observa la fuerte presión ejercida por los sistemas humanos sobre la naturaleza en términos de uso de recursos y de afectación a los servicios ecosistémicos para la sociedad.

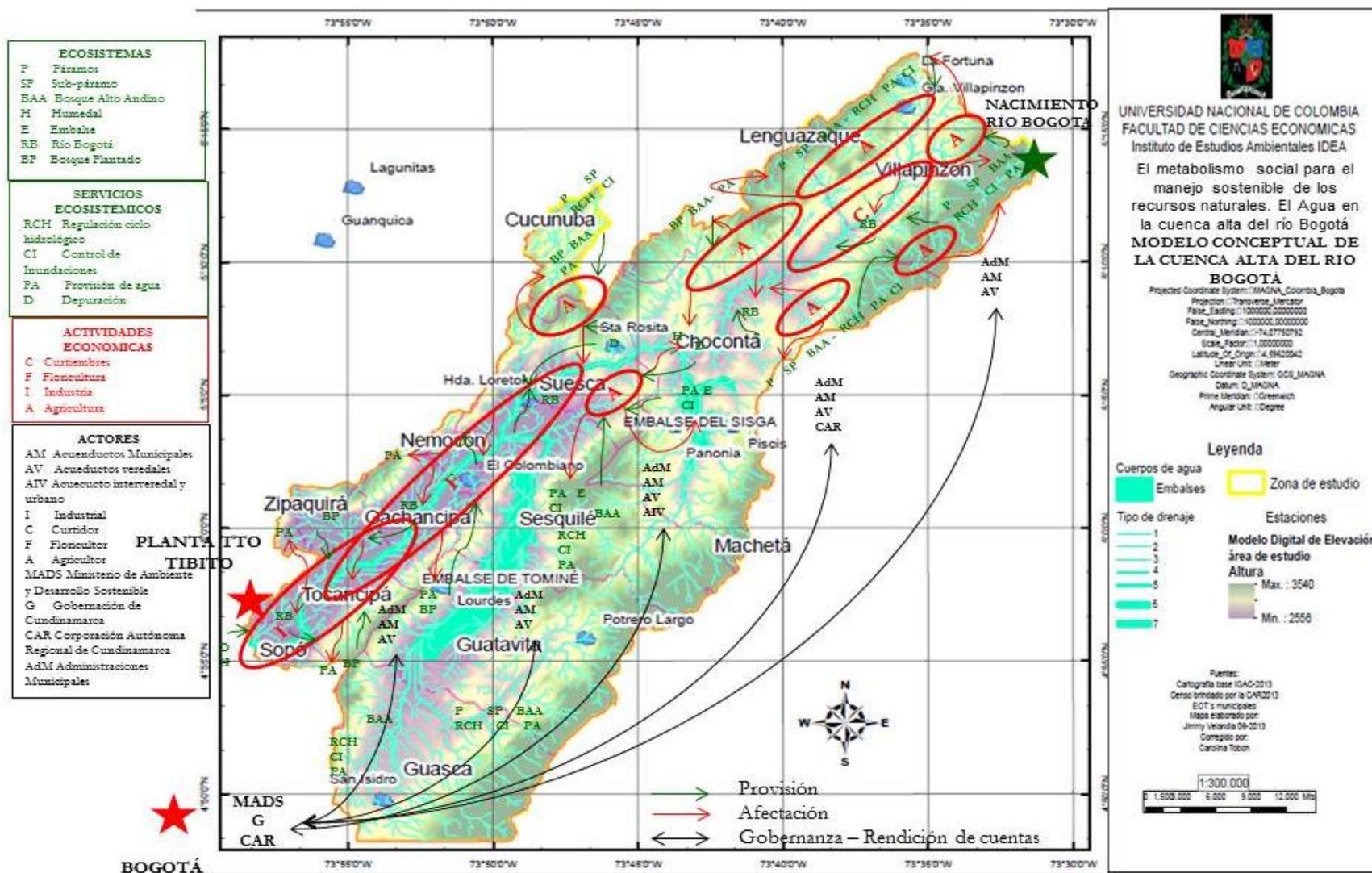
Como se observa en la Figura 14, las actividades económicas analizadas como factores direccionadores del uso del agua en la región se localizan sobre la ribera del río afectando fuertemente al sistema natural (río Bogotá). En términos históricos, estas actividades no se han planeado y localizado de manera arbitraria en estos espacios, por el contrario han sido el resultado del establecimiento de relaciones entre actores e instituciones encargadas del manejo del agua en el territorio y de las condiciones favorables en términos de disponibilidad de cuerpos hídricos, suelo y clima. Es necesario mencionar que los intereses económicos y políticos han sido un factor importante en la localización de algunas actividades.

Por otra parte, es fundamental incluir las relaciones entre actores (formales, no formales) e instituciones en el análisis de las interacciones sociedad - naturaleza y del análisis de sostenibilidad debido a que en el marco de su actuación se regula y orienta el curso de las actividades económicas y su respectiva afectación a los ecosistemas-servicios ecosistémicos.

La interacción entre actores y entre instituciones se da de manera biunívoca, por un lado de regulación en el sentido de la jerarquía burocrática de mayor nivel (MADS, G, CAR) hacia las jerarquías de menor nivel como las administraciones municipales y usuarios de todo nivel (doméstico, agrícola, agroindustrial, industrial) y por otro lado de rendición de cuentas de las de menor nivel hacia las de mayor nivel. Estas relaciones han carecido de una articulación real de los intereses de cada actor alrededor del manejo sostenible del agua probablemente por la falta de visión holística e integral de los actores en cuanto al agua como elemento ordenador del territorio y la prevalencia de intereses particulares sobre los beneficios colectivos.

En términos de rendición de cuentas, los actores de menor jerarquía que son controlados por entidades oficiales (Procuraduría o Contraloría) en ocasiones no tienen las capacidades para responder a las exigencias de la normativa, para poner en práctica las herramientas de planeación o no han generado el sentido de pertenencia por el territorio que les permitiera un conocimiento y manejo integral del mismo. Por otra parte, la sociedad aún no ha empoderado la necesidad de su actuación en cuanto al manejo del agua se refiere lo que ha hecho que los procesos de ordenamiento hayan estado dirigidos hacia intereses privados y particulares.

Figura 14 Modelo conceptual del sistema de estudio



4.3 Bases para el análisis de sostenibilidad del manejo del agua en el sistema de estudio

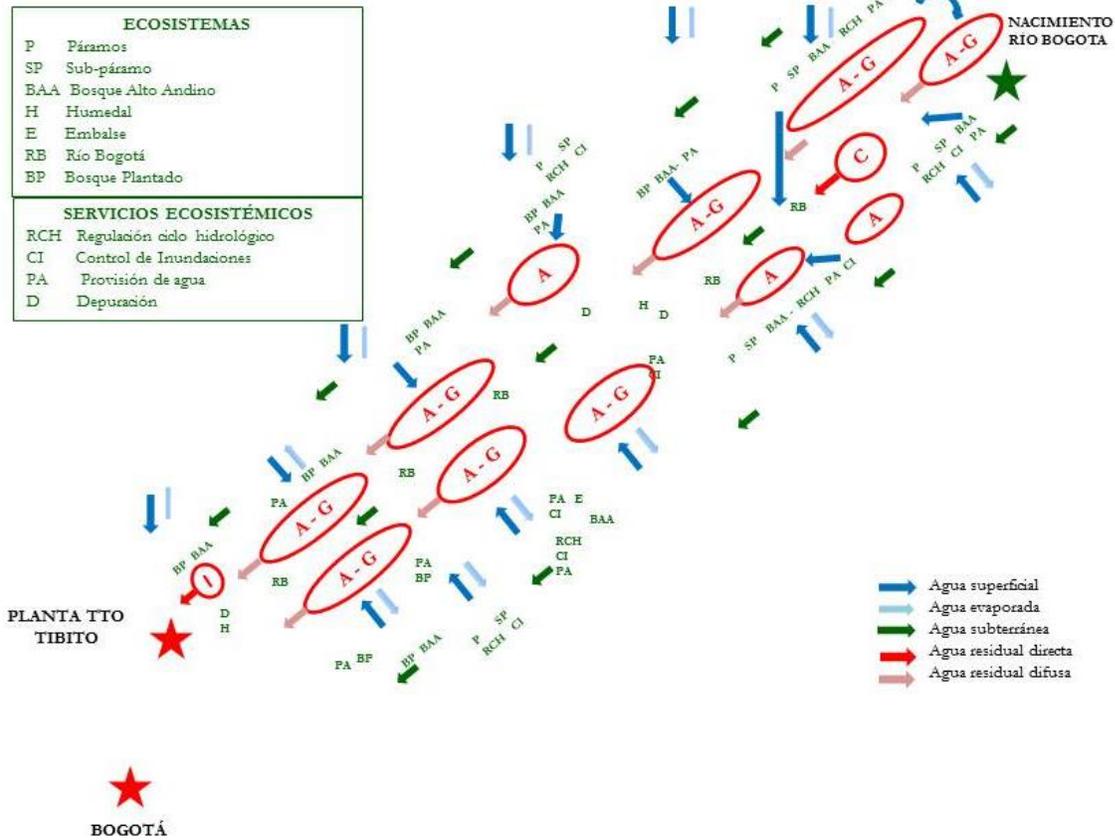
Este acápite presentará las bases para analizar la sostenibilidad del manejo del agua en el sistema de estudio a partir de los criterios teóricos derivados del metabolismo social. Se presentan en primera medida, algunos modelos conceptuales que serán de utilidad para el análisis de los flujos de agua en el sistema. Finalmente, se realiza un análisis de la sostenibilidad ambiental en términos de su dimensión física (capacidad de almacenamiento y calidad de agua) y su dimensión social (relaciones entre actores, políticas e instrumentos de planeación).

4.3.1 Modelos conceptuales para el metabolismo del agua.

Con base en el modelo conceptual presentado en la Figura 14 se identificaron los flujos de agua de entrada y salida que son fundamentales para describir y comprender el metabolismo del agua en el sistema socio-ecológico caracterizado. Los flujos de agua de entrada corresponde a: precipitaciones (flechas azul oscuro) y agua subterránea (flechas verdes) y los flujos de salida: agua residual directa (flechas rojas), agua residual difusa (flechas rosadas) y agua virtual (flechas violeta) en términos del comercio de flores, cueros y bienes y servicios de tipo industrial.

De acuerdo con la información recopilada del área de estudio a partir de la segunda mitad del siglo XX se estima que los flujos de salida de agua residual directa eran menores que en la actualidad debido a que no se encontraban tan avanzadas las actividades del curtido, la floricultura ni la industria. Sin embargo, debido a que existían en su mayoría actividades agropecuarias es probable que los flujos de agua residual difusa fueran mayores. En esta época no se presentaban flujos de agua virtual debido a que dichas actividades no generaban productos para exportación. En la Figura 15 se presenta el modelo conceptual de metabolismo del agua en la cuenca alta del río Bogotá estimado para el año 1960.

Figura 15 Metabolismo del agua en la cuenca alta del río Bogotá en 1960.



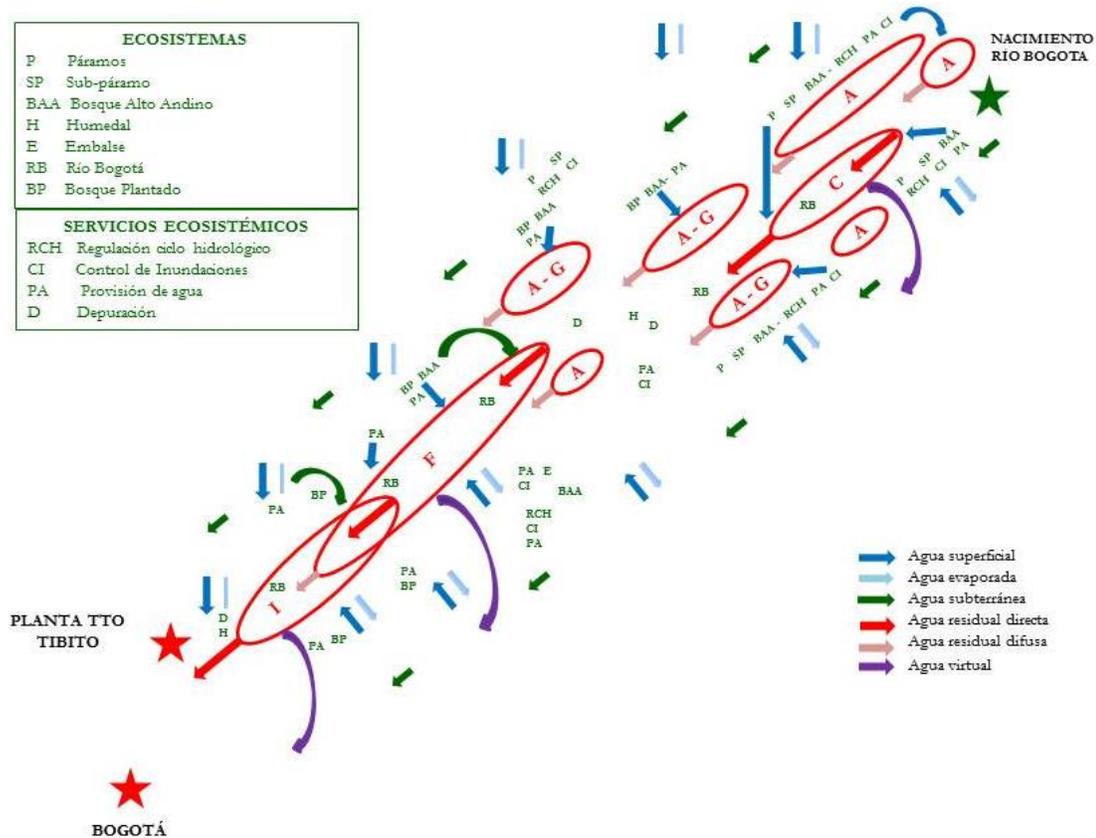
Fuente: Elaboración propia

En la actualidad, el metabolismo de agua del sistema ha cambiado, por un lado los flujos de agua residual directa han aumentado con respecto a la segunda mitad del siglo XX debido a que la actividad de curtido ha crecido al igual que la floricultura y las industrias sobre la ribera del río generando mayores vertimientos. Por otra parte se ha hecho un uso más intensivo del agua subterránea y se han generado flujos de agua virtual especialmente en la floricultura donde los productos son casi en su totalidad para exportación. La Figura 16 presenta el metabolismo del agua del sistema en la actualidad mostrando el aumento con respecto a 1960 (Figura 15) de los flujos de agua residual directa y agua virtual.

A través de la comparación de los dos modelos conceptuales de metabolismo de agua (Figura 15: 1960 y Figura 16: actualidad) se observa que los sistemas productivos presentes en la cuenca han generado drásticas modificaciones en los últimos 50 años sobre la ribera del río Bogotá. Décadas en las cuales ha crecido el sector del curtido en la parte alta de la cuenca y se han asentado otro tipo de sistemas productivos (industriales y agroindustriales) desplazando a los sistemas agrícolas que se asentaban en la

región, especialmente en los municipios más cercanos a la ciudad (Tocancipá y Gachancipá).

Figura 16 Metabolismo del agua en el sistema en la cuenca alta del río Bogotá en la actualidad



Fuente: Elaboración propia

A lo largo del sistema de estudio (desde el nacimiento del río Bogotá hasta la planta de Tibitoc) los flujos de salida como aguas residuales directas y difusas han afectado los flujos de entrada de agua superficial y subterránea. Estos flujos de salida, a su vez, contienen una cantidad de nutrientes que altera el metabolismo material del sistema ecológico influyendo en el ciclo de nutrientes en el suelo (nitrógeno, fósforo, potasio) y así en los modos de producción y uso de agua agrícola. La extracción de agua subterránea por parte de la floricultura se realiza sin control ni inventario sobre la cantidad de acuíferos, la cantidad de agua que aportan y sus tiempos de recarga. Lo anterior puede alterar el ciclo de agua subterránea, el sistema hídrico en conjunto y la capacidad de almacenamiento de la cuenca hidrográfica.

En la parte más alta de la cuenca las modificaciones más drásticas se han dado por el crecimiento desordenado de las curtiembres más no por el asentamiento de otros sistemas productivos. En el municipio de Chocontá se han ubicado industrias como Cemex y una

fábrica de licores, sin embargo, no es comparable con el crecimiento industrial del municipio de Tocancipá, municipio en el que no se ha logrado el control necesario por parte de la autoridad ambiental o del municipio para evitar que las industrias presentes se apropien por completo del territorio colonizando la zona aluvial del río. La localización de estas industrias ha estado relacionada con las señales que dio Bogotá frente a la industrialización dentro de ella, expulsando la industria presente en la urbe. La solución para ellas fue localizarse en los municipios aledaños a la ciudad, entre ellos Tocancipá.

A partir de estos modelos conceptuales de metabolismo de agua en el sistema de estudio es posible interpretar y analizar los procesos metabólicos de apropiación, circulación, consumo y excreción. El proceso de transformación no se analiza debido a que no se considera que sea un proceso en el que el agua sea el flujo de entrada sujeto a transformación. En el sistema existen procesos de transformación de otro tipo de materiales que generan flujos de excreción en el sistema modificando las condiciones de calidad del agua.

La Figura 17 presenta un esquema de los procesos metabólicos teniendo como unidades de apropiación las actividades económicas en el área de estudio (curtido, floricultura, e industria). En esta figura se puede observar que los procesos de apropiación, consumo y excreción están asociados a una afectación a ecosistemas y servicios ecosistémicos. En este caso, cada una de las actividades económicas apropia servicios ecosistémicos como provisión de agua, regulación del ciclo hidrológico y control de inundaciones proveídos por ecosistemas como los páramos, subpáramos y bosques altoandinos, alterando así los flujos de entrada y salida de agua superficial y agua subterránea del sistema.

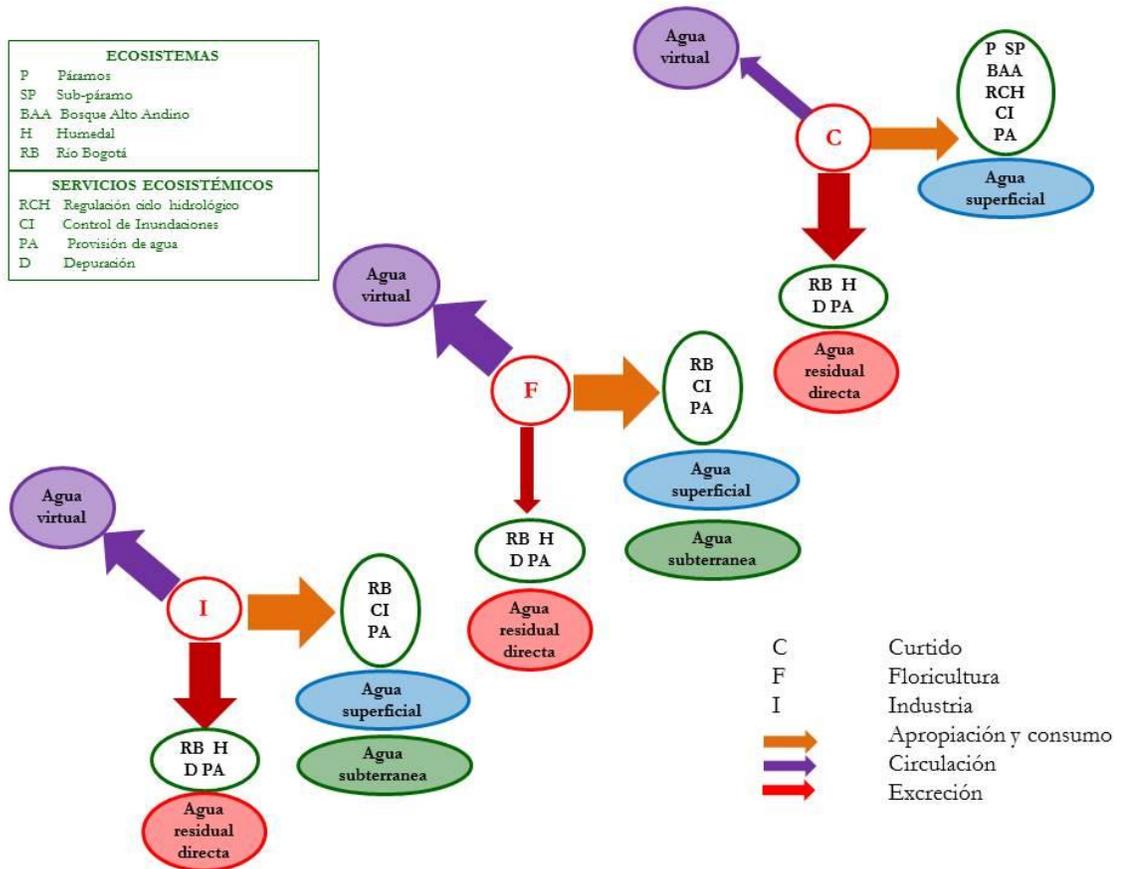
El proceso de excreción afecta significativamente los ecosistemas río y humedal afectando a su vez los servicios de provisión de agua y la capacidad de depuración natural del sistema hídrico en su conjunto. En la figura se observan diferentes intensidades para las flechas que indican los procesos de apropiación (naranja), circulación (violeta) y excreción (roja). Esta diferencia de intensidades se da debido a que la actividad de curtido por ejemplo tiene un nivel de apropiación de servicios menor en términos de consumo de agua al de la actividad de las flores, sin embargo sus flujos de excreción son mayores que los de la floricultura. Por lo tanto, la flecha que indica el proceso de apropiación en el curtido es menos gruesa que la que indica este mismo proceso en la floricultura.

Por el contrario, la flecha que indica el proceso de excreción es mucho más gruesa en el curtido que la indica este mismo proceso para la floricultura. Se consideró que la intensidad en los flujos

de excreción era la misma de la actividad industrial y de curtido debido a la falta de información para los vertimientos industriales.

Los flujos de circulación (flechas violeta) corresponden a agua virtual la cual implica la cantidad de agua que está contenida en el producto (cuero, flores, productos industriales). En este caso, la intensidad es mayor en las actividades de floricultura e industria que en la actividad de curtido debido a que la dinámica exportadora de la floricultura en Colombia es mucho más fuerte que la que podrían tener las curtiembres en esta región.

Figura 17 Procesos metabólicos en en la cuenca alta del río Bogotá en la actualidad.



Fuente: Elaboración propia

En el área definida para el estudio a partir de la segunda mitad del siglo XX los procesos de apropiación, consumo, circulación y excreción han aumentado su magnitud e intensidad de tal manera que han transformado el paisaje y han generado modificaciones sociales, ambientales y económicas sobre el sistema aumentando las respuestas negativas del sistema natural sobre el sistema humano en forma de períodos de intensas inundaciones seguidos por períodos de intensas sequías. Los problemas de contaminación se han agudizado dado el aumento de flujos de excreción,

especialmente del sector industrial lo que ha afectado la provisión de agua para la población.

4.3.2 Sostenibilidad ambiental

La sostenibilidad ambiental es analizada desde la perspectiva física y social. En estas dos dimensiones se analizan variables físicas como la capacidad de almacenamiento de la cuenca en términos de balance hídrico, la calidad del agua del río y variables sociales como las relaciones entre los actores involucrados en el manejo del agua, las políticas formuladas y los instrumentos de planeación vigentes.

▪ Sostenibilidad física

La sostenibilidad física se analiza desde el punto de vista del balance hídrico y la calidad del agua. El balance hídrico ofrece la comprensión del ciclo del agua a nivel superficial y subterráneo y la calidad del agua ilustra los efectos de los vertimientos sobre la estructura y función de los ecosistemas presentes en la cuenca.

▪ Balance hídrico.

Durante los tres años analizados (1990, 2000, 2012) los meses entre marzo y noviembre fueron los meses con mayores entradas que salidas, es decir con una capacidad de almacenamiento positiva a través de la cual recarga el suelo con el excedente. Caso contrario ocurre en los meses de diciembre a febrero en los que la diferencia es negativa, ya que es en esos meses en los que se va a consumir la reserva disponible de agua en el área de estudio.

No fue posible estimar valores de entrada de agua por recarga de acuíferos debido a que no existen consenso entre los estudios realizados acerca de las metodologías de cálculo, el número de pozos y la recarga de cada uno de ellos. JICA (2009) reporta datos de recarga subterránea de Bogotá y la sabana de: 36 mm/año (CAR), 8 mm/año (INGEOMINAS), y 145 mm/año (JICA) respectivamente. Estos tres estudios emplearon el método de balance hídrico para calcular los valores de recarga subterránea. Los valores estimados de evapotranspiración, presentaron grandes diferencias en estos estudios, lo que llevó a una variación significativa en los valores estimados de recarga subterránea.

En este aspecto, es importante analizar especialmente la actividad de la floricultura la cual hace uso intensivo de agua subterránea en los períodos secos, períodos en los que como se observó se presenta un déficit de agua y la cuenca debe tomar para su funcionamiento el agua que ha sido almacenada en períodos lluviosos. No se tiene conocimiento de la cantidad de agua

subterránea que la cuenca puede ofertar, no se conoce el tiempo de recarga de los acuíferos o si todos los acuíferos se pueden recargar, por lo tanto no se sabe hasta qué punto las actividades económicas, especialmente la floricultura, pueden tomar agua de pozos profundos sin afectar la sostenibilidad del recurso. De acuerdo con JICA (2009) un uso inadecuado del agua subterránea puede causar un abatimiento del nivel freático y otras consecuencias negativas. Es necesario que la autoridad ambiental genere una verdadera línea base del agua subterránea en la región de manera que pueda conocerse el límite que no se debe sobre pasar en aras de la sostenibilidad.

▪ *Calidad de agua.*

Este aspecto es fundamental para analizar la sostenibilidad en el sistema de estudio por cuanto los flujos de excreción directa y difusa tienen una gran influencia sobre el sistema y teniendo en cuenta que este sistema es una cuenca hidrográfica tendrá efecto sobre una porción de los flujos de entrada para unidades de apropiación ubicadas aguas abajo del punto de excreción. La excreción difusa implica la infiltración en el suelo, como la generada en cultivos por el uso de fertilizantes y plaguicidas que migran por los flujos de aguas subterráneas alterando la calidad del agua. La excreción directa tiene efectos significativos sobre el uso del agua teniendo en cuenta los contaminantes que han sido vertidos, domésticos, industriales y agrícolas.

El río Bogotá, en su nacimiento fue declarado Reserva Natural en 1985, en años anteriores este páramo era escenario de agricultura y ganadería⁸ (Comunicación oral, 2013). Hace 25 años se expulsó el último cultivo y desde la declaración de la reserva se han realizado proyectos de compra de predios para ampliar el área de conservación. La Fotografía 1 (a) muestra la Laguna de Gacheneque donde nace el río Bogotá en el Páramo de Guacheneque junto con el guardabosque de la reserva⁹ y (b) muestra la laguna del mapa que se forma unos kilómetros más abajo del nacimiento.

A partir de este punto se crea un sistema hídrico compuesto por acuíferos subterráneos y cauces superficiales que conforman lagunas y caídas de agua que unos kilómetros más adelante abastecerán a 19 acueductos veredales del municipio de

⁸ Esta información fue suministrada en comunicación oral con el guardabosque y guía de la Reserva Natural Nacimiento del Río Bogotá, originario del municipio de Villapinzón el día 14 de abril de 2013.

⁹ Según la leyenda que se cuenta en la región, Gacheneque significa en lengua muisca India Airada (o brava) debido a que se creía que la laguna se tragaba a la gente que paseaba en sus alrededores. Hace 110 años algunos campesinos de la región le tiraron desde el alto de la Calavera 7 cargas de sal para desencantar la laguna y desde ese entonces es posible visitarla (Comunicación oral, 2013)

Villapinzón¹⁰ y solo tres de ellos cuenta con planta de tratamiento de agua potable¹¹.

Fotografía 1 (a) Laguna de Gacheneque, Páramo de Guacheneque. (b) Laguna del mapa



(a)



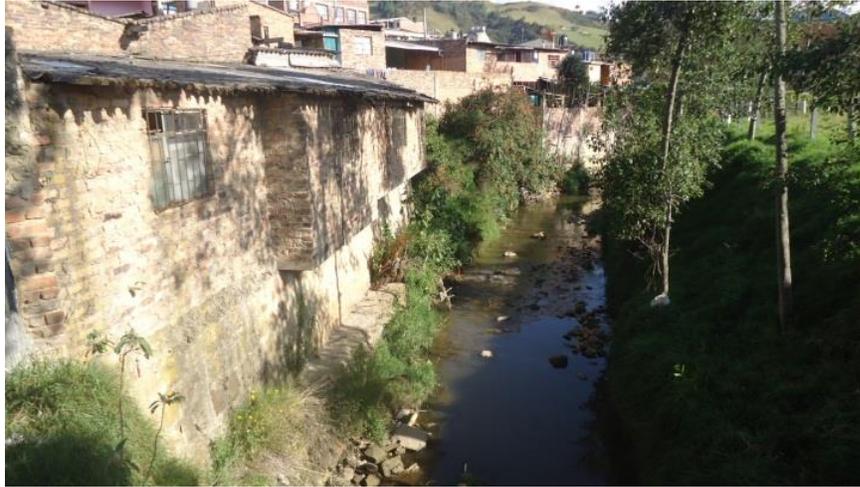
(b)

Una vez el río atraviesa el municipio de Villapinzón recibe descargas de aguas residuales domésticas e industriales debido a que el municipio no cuenta con Planta de Tratamiento de sus aguas y no todas las curtiembres tratan las suyas. Aquí se vierten altas cargas de materia orgánica expresada en (DBO, DQO), sólidos suspendidos y disueltos en el agua que se expresan en sólidos totales, grasas y aceites, nitrógeno total, fósforo, sulfuros, sales de cromo, entre otros. La Fotografía 2 muestra la ubicación de las casas en el municipio de Villapinzón sobre el río.

¹⁰ En el páramo de Guacheneque nacen el río Bogotá, Upía, Blanco, Guatiquía, Negro, Opón y otros.

¹¹ Esta información fue suministrada por la secretaría de infraestructura y servicios públicos del municipio de Villapinzón en un documento llamado: Empresas prestadoras Acueductos Rurales

Fotografía 2 Río Bogotá en el municipio de Villapinzón



A partir del municipio de Suesca se encuentran asentados cultivos de flores quienes en ocasiones descargan a vallados o directamente al río el agua residual de los procesos de riego, fertilización y fumigación. Estos compuestos varían en composición química pero no son típicamente detectables en los análisis de calidad de agua que se realizan rutinariamente. Las Fotografía 3 (a) y (b) muestran parte de la zona de flores en los municipios de Suesca y Gachancipá ubicadas en la ribera del río Bogotá.

Fotografía 3 (a) Invernaderos en el municipio de Suesca (b) Invernaderos en el municipio de Gachancipá.



(a)



(b)

En algunas veredas de Gachancipá como San Martín y en casi todo el municipio de Tocancipá (principalmente las veredas La Fuente, Tibito, Canavita) se han asentado invernaderos de flores, numerosas y diversas industrias que vierten sus descargas, algunas tratadas algunas no directamente al río afectando negativamente la calidad del agua y dificultando su posterior tratamiento y suministro al 30% de la población capitalina y a 11 municipios de la Sabana de Bogotá.

Esta situación genera grandes desequilibrios en el sistema en su conjunto pues no sólo afecta la vida acuática y las condiciones ecológicas de la cuenca, sino que afecta la provisión de agua para riego en toda el área y para consumo humano en el municipio de Suesca (acueducto interveredal y urbano Tausaquirá), en el municipio de Gachancipá (Acueducto de la vereda de San Martín) y en el municipio de Tocancipá (Planta de potabilización de agua de Tibitoc).

Históricamente han sido las curtiembres las responsables de la gran parte de la contaminación en la cuenca alta del río debido a que sus vertimientos tienen grandes cantidades de materia orgánica, sólidos, sulfuros y cromo, entre otros y se ubican en la ribera del mismo. Sin embargo, en la actualidad este sector ha venido realizando esfuerzos para mejorar las condiciones de calidad en sus vertimientos y por lo tanto en el río Bogotá mientras que industrias de todo tipo han venido asentándose rápida y desordenadamente en los municipios de Gachancipá y Tocancipá sin un control real y efectivo sobre la calidad de sus vertimientos.

El sistema hídrico del río Bogotá en el área definida para el estudio tiene dos puntos importantes en términos de depuración natural (ver Figura 14), una vez el río ha abandonado los municipios de Villapinzón y Chocontá y está cerca de entrar al municipio de Suesca, hay una zona de inundación con vegetación propia de humedal como juncos, en donde se depuran algunos contaminantes quedando atrapados en la vegetación. Durante el

trabajo de campo realizado para esta investigación se identificó este punto y se observaron personas que pescaban en el río una vez superada esta zona de depuración. En los puntos anteriores las personas no utilizaban el agua del río más que para regar sus cultivos y en ocasiones dar de beber a sus animales.

Posteriormente, se encuentra otro punto importante en el municipio de Suesca, conocido como el "Cañón de la Lechuza" en donde el río pasa por una pendiente considerable aumentando su capacidad de oxigenación y mejorando sus condiciones de calidad. A la altura del municipio de Tocancipá se encuentra otra zona de humedal en la vereda Tibitoc sin embargo, no ha sido posible recuperar este humedal debido al asentamiento de la industria en la zona aluvial del río Bogotá que entre otros cambios importantes ha generado interrupciones en el cauce mismo. En el recorrido del río, en términos de calidad de agua es importante el aporte de ríos y quebradas tributarias como El Tejar, el río Sisga y el desagüe del embalse Tominé cuyos caudales ayudan a aumentar el caudal y diluir la contaminación que proviene de los vertedores aguas arriba.

La Fundación Al Verde vivo realizó en 1999 un estudio fisicoquímico sobre la calidad del agua del río entre 1958 y 1997. Para 1958 y 1971 únicamente se registraron valores de oxígeno disuelto. Para 1983, 1993 y 1997 se registró Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). Nitrógeno total para 1993 y de Sólidos (suspendidos, disueltos y totales), cromo y fósforo. Estos parámetros fueron analizados en diferentes estaciones entre el nacimiento del río y la estación Espino en el municipio de Tocancipá.

Los valores más altos de materia orgánica representados en DBO y DQO se presentaron en diferentes años después del municipio de Villapinzón, probablemente por la descarga de aguas residuales domésticas directamente al río. Los valores de sólidos y cromo también son más altos en este punto. En general en todos los puntos entre 1983 y 1997 se presentó un aumento en la concentración de materia orgánica y sólidos. Antes y después del municipio de Tocancipá se observa que hay una disminución en el oxígeno disuelto y aumento en la materia orgánica (DBO, DQO), sin embargo debido a que todas las estaciones no tienen todos los datos no es posible dar una conclusión más concreta para este estudio.

La Empresa de Acueducto de Bogotá (EAAB) y la Universidad Nacional realizaron un estudio en 2009 sobre un modelo dinámico de calidad de agua para el río Bogotá analizando los resultados entre 2002 y 2009. El oxígeno disuelto presentó una gran disminución tanto en 2002 como en 2009 en la estación El Espino en el municipio de Tocancipá. Los valores de DBO y DQO presentan un pico en el municipio de Villapinzón que coincide también con los valores de NKT (nitrógeno total) tanto en 2002 como en 2009 aunque en 2002 la tendencia era mayor que en 2009. La DQO también presenta un pico

en Villapinzón para 2009. Si bien es cierto una vez el río deja el municipio de Villapinzón las aguas residuales domésticas e industriales hacen que la calidad sea muy baja, sin embargo, a la altura de Tocancipá, previo a llegar a la PTAP Tibitoc también se observan picos importantes en materia orgánica, sólidos, nitrógeno total y oxígeno disuelto. A pesar de que en magnitud la calidad de agua en Villapinzón es mucho más baja que en Tocancipá, los vertimientos de las industrias, algunos tratados otros no hacen que se dificulte el tratamiento que debe realizarse al agua para provisión a la población.

Finalmente, la EAAB registró anualmente desde 1998 hasta 2012 los valores de diferentes parámetros en la bocatoma que conduce el agua a la planta de potabilización de agua de Tibitoc registrando un aumento significativo en parámetros como: Manganeseo, conductividad, nitrógeno amoniacal, materia orgánica, lo que ha dificultado el tratamiento del agua llegando a cerrar la planta por 244 días durante el año 2012.

De acuerdo con la empresa esta contaminación proviene del corredor industrial de los municipios de cuenca alta del río. El manganeso (Mn), de acuerdo con la EAAB, genera problemas de precipitación en tuberías generando sabor y color en el agua potable, no es nocivo para la salud pero dificulta el tratamiento. El Mn además puede encontrarse asociado a materia orgánica en su forma soluble y si se encuentra en presencia de aguas poco oxigenadas se precipita. Es un metal que se encuentra naturalmente junto con el hierro y en ocasiones puede desarrollar microorganismos lo que afecta el agua para consumo humano y para uso industrial. Este metal se utiliza en industrias químicas, siderúrgicas y también tiene usos no metalúrgicos.

Sin embargo, durante el trabajo de campo realizado se observó que en los municipios de Suesca y Gachancipá se localizan plantas de potabilización de agua de acueductos veredales que se suplen de agua del río Bogotá. De acuerdo con comunicaciones orales con fontaneros de los acueductos el agua del río no presenta mayores problemas por contaminación por lo que es muy probable que la mayor alteración por cantidad de vertida directamente se presente en el municipio de Tocancipá debido al alto número de industrias y el deficiente control que se realiza sobre ellas.

En términos de sostenibilidad ecológica la calidad de agua es esencial pues altera el equilibrio ecológico de la cuenca y a la vez afecta los flujos de agua de provisión para la población o para diversos usuarios. En este caso es necesario resaltar la importancia del servicio ecosistémico que presta la cuenca en términos de depuración natural debido a sus funciones ecológicas. Este servicio debe ser valorado económicamente y se debe estudiar un esquema de pago en la cuenca por este servicio ambiental.

▪ Sostenibilidad social

Junto con la sostenibilidad física de la cuenca se analiza la sostenibilidad desde el punto de vista social con el ánimo de dar una visión completa de la sostenibilidad ambiental. Dentro de la sostenibilidad social se tienen en cuenta aspectos como las relaciones entre los usuarios del agua y el papel de las instituciones, la orientación de las políticas y de los instrumentos de planeación.

En términos de las relaciones entre actores como autoridades y usuarios locales se identifican dificultades. Las autoridades ambientales no tienen un control real sobre el manejo del agua en el territorio ni ejercen eficientemente sus funciones. Además, las comunidades locales tampoco se empoderan de un proceso de mejoramiento ni exigen ni ejercen una mejor gestión sobre el manejo del agua. Por otra parte los demás actores involucrados no trabajan de manera articulada con las autoridades de manera que los diferentes esfuerzos tengan éxito.

Los recursos públicos no han sido destinados adecuadamente para la recuperación del río Bogotá. Desde el año 1991 se garantizó desde el gobierno nacional un crédito de la CAR con el Banco Interamericano de Desarrollo para el "Programa de Saneamiento ambiental de la cuenca alta del Río Bogotá" cuyo objetivo era "mejorar las condiciones ambientales y productivas de la cuenca alta del Río Bogotá, mediante el mejoramiento de la calidad de las aguas, para permitir su utilización múltiple en abastecimiento de agua potable, en actividades agrícolas y pecuarias y para preservar la flora y la fauna".

Se aspiraba lograr este objetivo a través de los siguientes componentes: Saneamiento (construcción de 23 PTARs, 7 rellenos sanitarios, y 8 sistemas de pretratamiento de residuos de sacrificio de ganado); riego y manejo de ciénagas y lagunas, recuperación de suelos y forestación y gestión ambiental. Dos décadas más tarde el uso de los recursos no se ve reflejado en un mejoramiento de la calidad del río y de la calidad de vida de la población.

Se han construido plantas de tratamiento que a la fecha no se encuentran operando adecuadamente. Inicialmente fueron operadas por la CAR y desde octubre del año 2012 fueron entregadas a los municipios quienes no tienen destinado presupuesto para este propósito ni tienen las capacidades para operar estas plantas. El municipio de Villapinzón, a 11 kilómetros del nacimiento del río no tiene planta de tratamiento de aguas residuales domésticas ni industriales y además no tiene una cultura de ahorro y uso eficiente del agua debido a la suficiencia de fuentes hídricas en su región (Municipio de Villapinzón, 2010).

El municipio de Suesca y Gachancipá, a pesar de tener planta de tratamiento de aguas residuales no tiene clara su operación ni puede comprometer los recursos para operarla y mantenerla adecuadamente, lo que supone un problema en términos de calidad de agua en el río. Adicionalmente no hay un control sobre los cultivos de flores que se vienen asentando en el municipio ni sobre los que han debido cerrar gracias a la coyuntura económica actual de la floricultura.

Los municipios de Gachancipá y Tocancipá han sido invadidos por el sector industrial sin ningún control ni planeación por parte de las administraciones municipales ni la autoridad ambiental. De acuerdo con información revisada en el Archivo Central del Municipio de Tocancipá, la autoridad ambiental CAR emitió un concepto técnico respecto del Plan de Ordenamiento Territorial en el cual indicaba que la industria no debía ubicarse en la vereda Tibito ni en las veredas de la zona aluvial del río Bogotá. Ante esto el municipio respondió que únicamente dejaría ubicada la industria Malterías Unidas porque ya llevaba varias décadas allí (desde la década del 60 ya se reportaba esta industria) y que no se desarrollaría más la zona industrial¹². En la actualidad, las veredas Canavita, La Fuente y Tibito, pertenecientes a la zona aluvial del río son escenario de asentamientos industriales y sufren una fuerte presión sobre la calidad del agua del río y sobre el cauce principal.

Es interesante analizar el crecimiento del metabolismo del agua en estos municipios y a la vez el crecimiento en la población de los mismos. En las Figuras 7 y 8 se observó el aumento en la población, especialmente drástico en los municipios de Tocancipá y Gachancipá que han sido los municipios donde la dinámica industrial se ha asentado de manera más profunda. En los demás municipios se observaron aumentos más graduales que los anteriores. Lo anterior, se ha dado gracias a la migración de mano de obra para la industria y para los cultivos de flores, generando en los municipios una dinámica social en la cual muchos de los pobladores no pertenecen al territorio y su relación es mucho más lejana con él.

Es importante anotar que el establecimiento y desarrollo de la industria en esta región probablemente ha estado ligado a intereses económicos y políticos que han llevado a que no se realice un control real sobre el consumo ni sobre los vertimientos que se descargan en el río y que afectan de manera negativa la provisión de agua para casi cinco millones de personas entre capitalinos y sabaneros. El POMCA del río Bogotá en su aparte sobre la demanda industrial en la subcuenca Sisga-Tibitoc no realiza un inventario riguroso de la industria ni una tendencia en su crecimiento, únicamente realiza una estimación de la demanda

¹² Archivo central de Tocancipá Caja 452 Carpeta 9 Folio 20 - 42 - 44

industrial como un porcentaje (6,87%) de la demanda doméstica. Es importante que se hagan inventarios juiciosos sobre el asentamiento industrial, de lo contrario se seguirá realizando una planeación inadecuada y descontextualizada del territorio, lo que genera efectos negativos sobre la prestación de servicios ecosistémicos para la población.

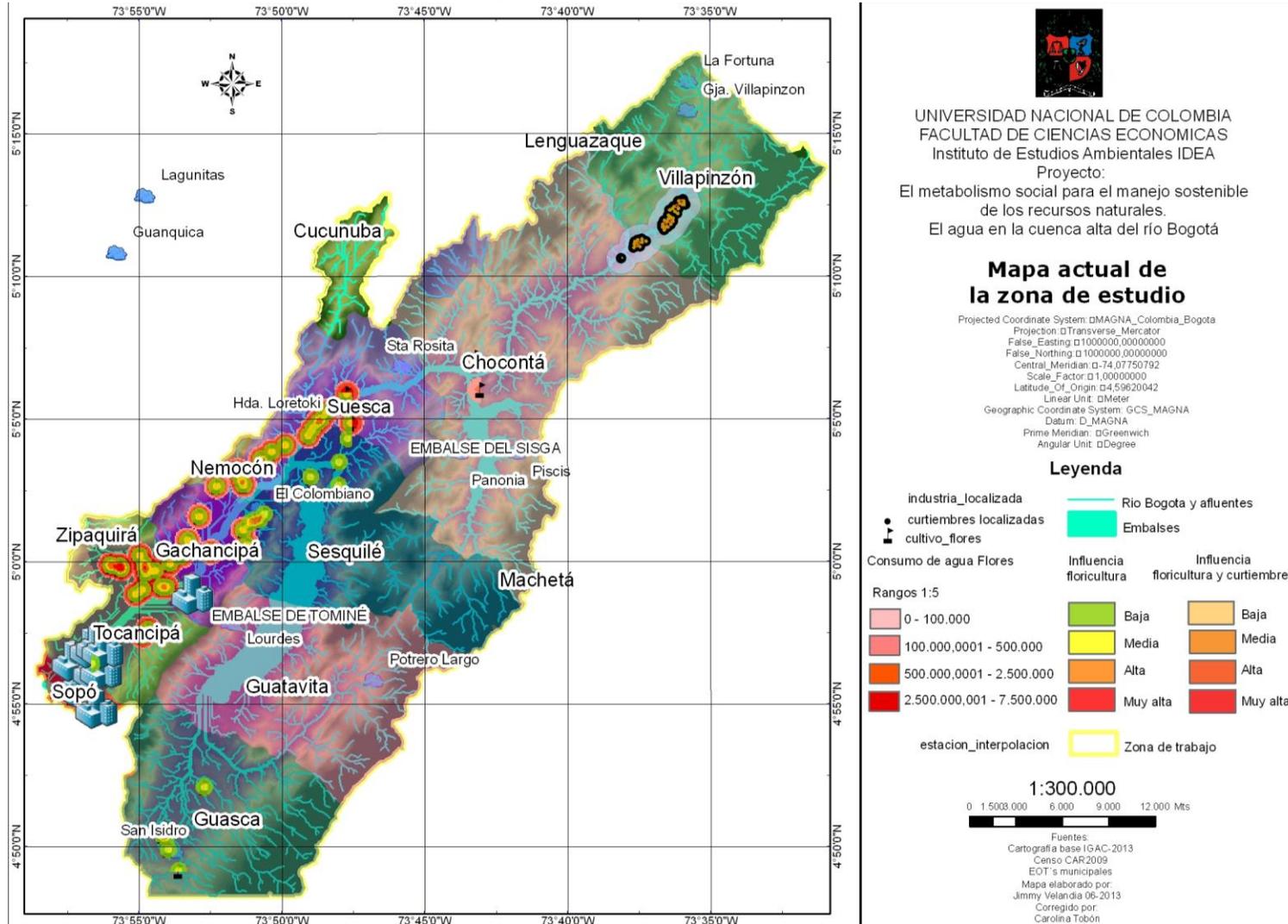
Finalmente al respecto de políticas para la recuperación del río Bogotá, desde el documento desarrollado por el Consejo Nacional de Política Económica y Social de Colombia -CONPES 3320- (DNP, 2004) existen diversas medidas orientadas a optimizar el manejo ambiental del Río Bogotá, el plan de acción contempla diferentes programas y proyectos que se podrían clasificar en dos grupos (1) proyectos de naturaleza de comando y control (2) programas con una visión sostenible que contribuyen a preservar o aumentar la resiliencia de la cuenca.

Aquellos proyectos de naturaleza de comando y control tienden a generar patologías en el sistema (Holling & Meffe, 1996) pues reducen la capacidad del sistema de adaptarse a los cambios que se presentan. Estos proyectos están relacionados con ampliación, construcción y mejoramiento de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), operación y mantenimiento de embalses, adecuación hidráulica del Río entre otros. Sin embargo en el segundo grupo se encuentran proyectos con una visión de sostenibilidad como la protección de cuencas abastecedoras, la preservación de ronda hidráulica del río, programas de educación ambiental, de producción más limpia, monitoreo, modelación de la calidad del agua y de la oferta hídrica e investigación, ordenamiento ambiental de la cuenca y manejo integral de residuos sólidos.

Es importante que las autoridades ambientales, el ministerio, academia, sociedad civil y todos los actores involucrados en el manejo del agua en la cuenca alta del río Bogotá trabajen coordinadamente con un interés común que es el de recuperar el río Bogotá como fuente de abastecimiento y como ordenador del territorio controlando el creciente metabolismo social.

El mapa que se presenta en la página siguiente es el mapa actual de la zona de estudio en el que se muestra la intensidad de la presión ejercida sobre las fuentes hídricas de la región. Desde el nacimiento del río se percibe un uso intensivo del agua y durante su recorrido tanto los cauces superficiales como los flujos subterráneos son víctimas del uso indiscriminado y de todo tipo de contaminación vertida de manera directa o difusa al sistema hídrico por parte de la actividad del curtido, de la floricultura y de la industria. Este mapa permite ver que el crecimiento de estas actividades se ha intensificado sobre la ribera del río y que esto a su vez afecta el sistema socio-ecológico en su conjunto.

Mapa 5 Mapa actual de la cuenca alta del río Bogotá



La planeación del territorio ha sido en función del agua, pero no para su cuidado y conservación sino para su uso indiscriminado en términos de captaciones y vertimientos. Cada una de las actividades económicas que se analizaron dentro de los factores direccionadores del uso del agua en la región se han asentado en la ribera del río por las ventajas que esta ubicación genera, como la cercanía a una fuente de agua y a un sumidero. Es importante cambiar esta visión utilitarista que se tiene sobre el río por una visión holística que contemple el beneficio colectivo más que un interés particular.

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

El metabolismo social, como marco teórico, conceptual y metodológico ofrece criterios para el análisis de sostenibilidad del manejo de un recurso natural. Entre estos criterios se encuentran el establecimiento de límites y umbrales del sistema, la interrelaciones entre los diversos subsistemas en términos de flujos físicos, la definición de escalas temporales y espaciales y el estudio de transiciones socio-ecológicas para la comprensión de las dinámicas ambientales. A partir de un conocimiento integral del sistema y de los criterios mencionados es posible diseñar estrategias sostenibles para evitar que el aumento en el metabolismo social de un sistema atente contra la sostenibilidad en términos del manejo de sus recursos naturales.

El sistema de estudio definido para esta investigación, la cuenca alta del río Bogotá, es un sistema complejo, socio-ecológico, con relaciones múltiples y bidireccionales que involucran ecosistemas y servicios ecosistémicos, actores formales, no formales y actividades económicas como el curtido, la floricultura y la industria. A partir de la comprensión de este sistema en términos de sus flujos físicos es posible ver el aumento del metabolismo en el tiempo y analizar las serias afectaciones que ha sufrido su base natural debido al intenso y creciente metabolismo del agua.

Con base en el estudio del metabolismo social del agua en la cuenca alta del río Bogotá a partir de la segunda mitad del siglo XX se puede concluir que el sistema de estudio en términos de manejo de agua es insostenible y que de seguir la tendencia de metabolismo creciente este sistema puede conducirse a un colapso afectando seriamente la provisión de servicios ecosistémicos fundamentales para el bienestar humano como provisión de agua, control de inundaciones, regulación del ciclo hidrológico y depuración natural.

Entre los factores direccionadores del uso del agua estudiados se considera que el curtido de pieles puede tomar una trayectoria sostenible debido a los procesos de mejoramiento y resolución de conflictos que se han llevado a cabo en la última década y que de

seguir este curso podrán conducir a esta actividad hacia la sostenibilidad.

La floricultura, por su parte está marcada por la dinámica de exportaciones y comercio internacional y sus mejoramientos están orientados en este sentido, de manera que deben continuar las exigencias del mercado mundial y fortalecer las exigencias de la autoridad nacional en aras de que se den manejos integrales de los recursos y se mejore la calidad de vida de los trabajadores alternando con esquemas de pago por servicios ambientales que le son prestados a la actividad debido a su intensivo uso del recurso hídrico. Sin embargo, es necesario generar mayor conocimiento frente a las consecuencias del uso intensivo de agua subterránea y de los componentes de los plaguicidas y fertilizantes en el agua para tener un control real sobre la cantidad y calidad del agua del río y las posibles afectaciones que este tipo de compuestos puedan generar para la salud humana y para los ecosistemas.

Por su parte, el metabolismo industrial en esta zona requiere un cambio en la tendencia creciente que ha seguido en los últimos quince años debido a que ha generado condiciones de insostenibilidad. La amenaza más importante para señalar es la falta de información que se tiene sobre el corredor industrial en el municipio de Tocancipá y sobre sus efectos sociales y ecológicos.

El metabolismo del agua en la cuenca alta del río Bogotá ha estado condicionado principalmente por los flujos de consumo y excreción por parte de las actividades económicas analizadas debido a su intensificación en los últimos 20 años. Por su parte, los flujos de agua virtual también se han intensificado, principalmente los de la floricultura dada su alta dinámica de producción para la exportación. Esta dinámica de intensificación corresponde también a un incremento en la población de estos municipios, especialmente en los municipios de Gachancipá y Tocancipá donde el metabolismo industrial ha crecido de manera intensa en los últimos veinte años.

A través de este estudio se resalta la relación entre el ordenamiento territorial y metabolismo de la sociedad en donde un metabolismo creciente ha condicionado el ordenamiento del territorio y ha generado intensas presiones sobre el sistema natural que compone la cuenca alta del río Bogotá y en especial sobre el río Bogotá afectando la vocación de este espacio natural.

5.2 Recomendaciones

Los servicios ecosistémicos que presta la cuenca alta del río Bogotá se deben a funciones ecológicas de los ecosistemas y es de vital importancia conservarlos para la sostenibilidad. Por lo anterior, es necesario valorar estos servicios en términos

económicos y diseñar esquemas de pago por estos servicios para la sostenibilidad de la cuenca del río Bogotá integrados en el ordenamiento territorial.

Para una toma de decisiones acertada y coherente con las realidades complejas del manejo del agua es fundamental tener un profundo conocimiento de los sistemas productivos que se asientan en el río, especialmente frente a la industria que se asienta en Gachancipá y Tocancipá en donde el crecimiento industrial no ha sido planificado ni se tiene suficiente conocimiento acerca de sus dinámicas y sus procesos para diseñar estrategias sostenibles.

Es necesario y urgente generar mayor conocimiento sobre la dinámica de agua subterránea, su cantidad, tiempo de recarga, entre otros debido a que es una fuente de suministro de agua alternativa al agua superficial y de lluvia y actualmente es usada de manera intensiva por los cultivos de flores sin una planeación de la cantidad de agua que puede utilizarse en los meses de déficit, lo que puede ocasionar consecuencias negativas sobre la dinámica natural de la cuenca y en general sobre el ciclo hidrológico antrópico y natural.

Es urgente que las instituciones trabajen coordinadamente en pro de un interés común que es el de mejorar las condiciones ambientales de la cuenca alta del río Bogotá, no sólo condiciones de equilibrio ecológico sino también de mejoramiento de la calidad de vida de la población.

La información generada para la toma de decisiones en términos de ordenamiento territorial debe ser integral, no debe ser aislada ni generar indicadores simples que no conducen a la comprensión de las relaciones entre la sociedad y la naturaleza. Esta información debe surgir de fuentes primarias y de la integración de conocimientos tradicionales y científicos.

A pesar de que las instituciones tienen un papel importante en el manejo de los recursos naturales, es fundamental la participación de la sociedad en los procesos de ordenamiento del territorio. Gracias a la participación de las comunidades es posible visualizar las necesidades reales de una población en un entorno natural determinado y sería posible resaltar los intereses de una colectividad sobre los intereses particulares. Son las comunidades locales quienes deben apropiarse su territorio y conocerlo para poder defenderlo y transformarlo.

ANEXOS

Anexo A. Análisis hidrológico

Para el análisis hidrológico se analizaron las variables: Precipitación, Evapotranspiración, Temperatura y Caudal para finalmente calcular el balance hídrico en los tres períodos analizados. En la Tabla A1 se presenta el resumen de las variables, estaciones, unidades y fuentes utilizadas:

Tabla A1. Descripción de variables hidrológicas analizadas

VARIABLE	CANTIDAD	ESTACIÓN	UNIDADES	FUENTE
Temperatura	2	Guaymaral	°C	CAR
		Guatavita		CAR
Evaporación	2	La Fortuna	Total mensual (mm)	CAR
		Guaymaral		CAR
Caudales	3	Villapinzón	Medio mensual (m ³ /s)	CAR
		Tocancipá		CAR
		Pte. La Virgen		EAAB
Precipitación	20	Guaymaral	Total mensual (mm)	CAR
		La Fortuna		CAR
		Panonia		IDEAM
		Piscis		IDEAM
		Potrero Largo		IDEAM
		Lourdes		IDEAM
		Guanquica		IDEAM
Lagunitas	IDEAM			

		San Isidro		IDEAM
		Tabio Granja		IDEAM
		Villapinzón		IDEAM
		Santa Rosita		IDEAM
		El Colombiano		IDEAM
		Granja Providencia		IDEAM
		Hda. Loretoki		IDEAM
		Tibitoc		EAAB
		Guatavita		CAR
		Úmbita		IDEAM
		Ventaquemada		IDEAM
		Esc. Colombiana de Ing.		IDEAM

Precipitación

Para el análisis de la precipitación se realizó un análisis de consistencia de los datos y posteriormente el llenado de datos faltantes en donde se utilizó la metodología del inverso de la distancia que está sustentada en la literatura como un buen aproximado siempre y cuando se cuente con el 95% de registros completos.

Se construyeron los hietogramas de precipitación media mensual para cada una de las décadas en las 20 estaciones contempladas para esta variable. Las tablas A2, A3 y A4 muestran el análisis de precipitación total mensual para los tres periodos de estudio

Tabla A2. Precipitación total 2012

ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN TOTAL MEDIA MENSUAL (mm) A 2012													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media
Guaymaral	30,4	56,5	67,1	96,1	83,5	59,7	48,2	44,4	65,8	112,3	94,6	47,0	67,1
La Fortuna	21,5	35,6	53,0	96,5	93,6	72,4	73,0	58,7	61,3	88,9	82,3	38,3	64,6
Panonia	26,4	33,5	67,5	95,1	123,4	130,2	131,8	110,0	80,9	101,0	80,5	33,1	84,4
Piscis	17,8	35,1	61,1	97,5	165,7	205,6	241,2	165,7	85,5	88,2	71,4	27,0	105,1
Potrero Largo	38,0	51,0	71,1	94,5	139,5	160,9	171,7	121,4	72,0	114,6	90,4	50,4	98,0
Lourdes	42,3	54,8	94,2	98,3	115,7	78,1	76,8	60,7	66,4	110,9	110,4	54,8	80,3
Guanquica	29,5	45,5	89,2	101,0	100,5	61,5	62,3	55,2	65,7	112,9	101,3	45,5	72,5
Lagunitas	35,6	48,0	95,0	96,2	100,3	56,3	61,5	55,0	65,7	101,8	92,0	45,3	71,1
San Isidro	32,3	40,2	60,7	81,2	89,2	68,2	68,9	61,4	51,3	85,9	80,4	42,9	63,5
Tabio Granja	42,8	52,6	70,4	106,0	100,4	56,8	65,5	52,2	67,2	115,3	104,0	61,6	74,6
Villapinzón	21,8	37,7	66,2	80,2	93,8	68,9	68,6	54,7	55,6	83,3	84,3	41,4	63,0

Santa Rosita	18,4	30,5	70,0	73,8	91,7	80,9	89,2	73,1	57,1	92,0	75,4	42,0	66,2
El Colombiano	35,1	41,1	76,0	103,6	104,3	73,0	70,5	63,6	67,2	103,0	79,2	33,1	70,8
Granja Providencia	28,7	46,1	78,3	102,4	100,3	68,5	55,8	47,2	64,9	102,0	83,3	53,8	69,3
Hda. Loretoki	12,6	22,3	45,9	50,9	73,5	47,5	41,9	40,1	43,6	59,6	51,4	20,9	42,5
Tibitoc	39,7	55,3	77,6	110,2	108,0	60,3	55,8	50,3	61,4	107,5	100,7	51,3	73,2
Guatavita	39,7	42,9	66,4	88,9	84,8	57,1	52,7	48,7	50,0	92,3	77,2	42,9	62,0
Úmbita	21,8	32,5	62,7	112,8	122,5	122,7	131,0	115,8	91,6	116,0	97,9	40,9	89,0
Ventaquemada	13,0	24,1	50,2	102,8	123,9	127,0	134,1	119,2	89,3	91,6	75,3	31,1	81,8
ECI	48,9	61,2	92,4	90,9	100,7	58,8	43,2	39,0	63,9	114,1	101,9	65,3	73,4
MEDIA	29,8	42,3	70,8	93,9	105,8	85,7	87,2	71,8	66,3	99,7	86,7	43,4	73,6

Tabla A3. Precipitación total 2000

ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN TOTAL MEDIA MENSUAL (mm) A 2000													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media
Guaymaral	25,9	54,6	66,1	88,4	82,6	58,3	45,1	44,4	66,8	107,3	88,7	44,5	64,4
La Fortuna	19,1	34,2	53,4	90,7	90,5	71,6	75,1	55,4	62,1	84,8	78,0	34,9	62,5
Panonia	27,6	31,5	63,8	75,1	104,1	111,2	136,8	96,1	73,0	90,8	78,0	36,1	77,0
Piscis	21,7	40,9	65,2	90,8	180,1	229,9	292,5	159,0	90,4	95,3	77,2	31,2	114,5
Potrero Largo	37,4	59,7	69,4	76,5	120,5	144,1	193,8	113,5	66,4	102,4	79,3	54,3	93,1
Lourdes	38,1	55,4	82,5	76,4	95,0	68,7	70,5	50,4	56,6	94,7	103,7	54,2	70,5
Guanquica	34,3	50,1	95,8	85,3	96,9	58,2	69,9	59,3	64,9	120,5	101,9	45,8	73,6
Lagunitas	38,8	53,5	104,1	89,4	96,8	56,1	68,1	66,0	64,8	107,5	90,0	50,8	73,8
San Isidro	35,7	30,1	62,7	65,9	85,5	57,7	69,1	61,8	44,3	75,3	76,0	44,0	59,0
Tabio Granja	49,6	51,9	71,3	88,4	76,5	46,4	64,4	52,4	59,8	119,9	104,4	57,7	70,2
Villapinzón	22,6	36,3	72,9	59,9	89,3	63,1	72,5	49,8	55,8	74,2	75,5	42,8	59,5
Santa Rosita	22,1	28,7	77,3	56,5	92,4	72,5	97,9	72,8	51,8	73,2	65,2	44,3	62,9
El Colombiano	29,3	41,5	71,4	80,8	98,2	70,1	69,3	61,1	65,1	92,1	75,8	32,4	65,6
Granja Providencia	32,3	47,2	67,1	95,6	90,5	63,8	51,7	46,6	61,0	89,0	86,3	55,3	65,5
Hda. Loretoki	10,8	19,5	41,5	33,9	56,9	34,7	35,1	27,9	32,9	46,7	40,5	21,5	33,5
Tibitoc	40,9	49,3	75,5	99,0	103,6	53,8	47,2	46,7	54,0	99,0	101,1	48,5	68,2
Guatavita	39,8	42,3	66,9	88,2	83,5	57,9	52,1	49,2	48,9	90,4	75,2	42,5	61,4
Úmbita	22,4	34,4	60,5	117,7	124,2	126,1	139,1	119,0	95,3	114,7	99,4	40,3	91,1
Ventaquemada	12,4	23,4	48,0	98,1	117,0	122,0	137,0	117,2	85,8	88,9	70,8	28,3	79,1
ECI	55,7	54,6	97,3	83,5	91,8	57,9	42,0	43,8	56,2	108,9	104,9	67,3	72,0
MEDIA	30,8	42,0	70,6	82,0	98,8	81,2	91,5	69,6	62,8	93,8	83,6	43,8	70,9

Tabla A4. Precipitación total 1990

ANÁLISIS DE PRECIPITACIÓN TOTAL MEDIA MENSUAL (mm) A 1990													
ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Media
Guaymaral	27,7	52,1	62,0	88,2	87,2	54,2	46,3	44,7	59,3	102,6	83,7	45,0	62,7

La Fortuna	18,7	33,9	47,8	98,6	87,0	73,6	66,0	56,2	60,2	83,7	78,4	31,5	61,3
Panonia	18,0	35,4	57,7	70,2	98,8	113,9	126,7	86,2	79,2	102,2	80,6	35,6	75,4
Piscis	14,1	49,6	60,7	88,3	183,9	249,6	295,2	125,3	84,6	110,8	96,9	39,2	116,5
Potrero Largo	13,6	77,1	64,5	69,1	117,6	139,2	188,7	84,5	77,8	99,1	66,3	55,0	87,7
Lourdes	19,0	52,7	101,1	60,7	101,9	61,9	73,1	49,7	64,4	108,9	97,3	52,4	70,3
Guanquica	19,9	50,7	88,8	77,6	86,3	64,3	63,9	37,8	71,4	149,2	91,0	29,2	69,2
Lagunitas	29,5	54,9	97,7	81,0	106,5	69,9	61,1	46,8	92,5	128,2	93,6	47,6	75,8
San Isidro	3,5	8,9	110,0	40,5	93,0	62,6	72,5	49,7	59,8	89,6	60,0	70,1	60,0
Tabio Granja	19,2	46,1	57,3	63,6	84,8	22,7	51,3	30,6	51,0	131,3	93,7	52,8	58,7
Villapinzón	8,1	41,5	121,7	46,8	79,5	63,2	70,1	38,7	65,5	84,7	68,9	33,0	60,1
Santa Rosita	14,4	33,2	113,0	50,7	124,5	90,7	102,2	32,1	58,2	64,0	54,3	82,1	68,3
El Colombiano	27,8	51,3	91,8	103,3	119,3	92,8	83,0	74,3	112,6	85,3	72,0	45,3	79,9
Granja Providencia	25,6	38,0	54,9	103,6	90,2	65,1	53,7	47,4	71,2	87,9	63,5	55,7	63,1
Hda. Loretoki	7,6	20,0	39,3	31,9	40,1	33,4	27,0	23,1	44,3	49,8	38,8	13,7	30,7
Tibitoc	27,8	47,9	70,8	106,5	96,1	54,8	38,9	36,5	56,9	95,2	90,5	53,3	64,6
Guatavita	39,6	43,7	66,8	90,9	82,8	58,9	51,1	46,2	51,0	91,9	75,1	42,2	61,7
Úmbita	23,0	34,1	63,6	132,6	130,7	136,8	144,6	130,3	104,7	124,4	109,8	39,1	97,8
Ventaquemada	12,1	22,6	44,0	99,7	111,3	118,5	124,8	116,5	84,7	89,0	69,4	28,3	76,7
ECI	11,9	39,3	71,3	59,1	104,4	65,6	43,1	45,9	79,6	122,9	108,2	61,6	67,7
MEDIA	19,0	41,6	74,2	78,1	101,3	84,6	89,2	60,1	71,4	100,0	79,6	45,6	70,4

En las siguientes gráficas (Figuras A1, A2 y A3) se muestra el comportamiento de precipitación de cada década.

Figura A1. Precipitación total media mensual 2012

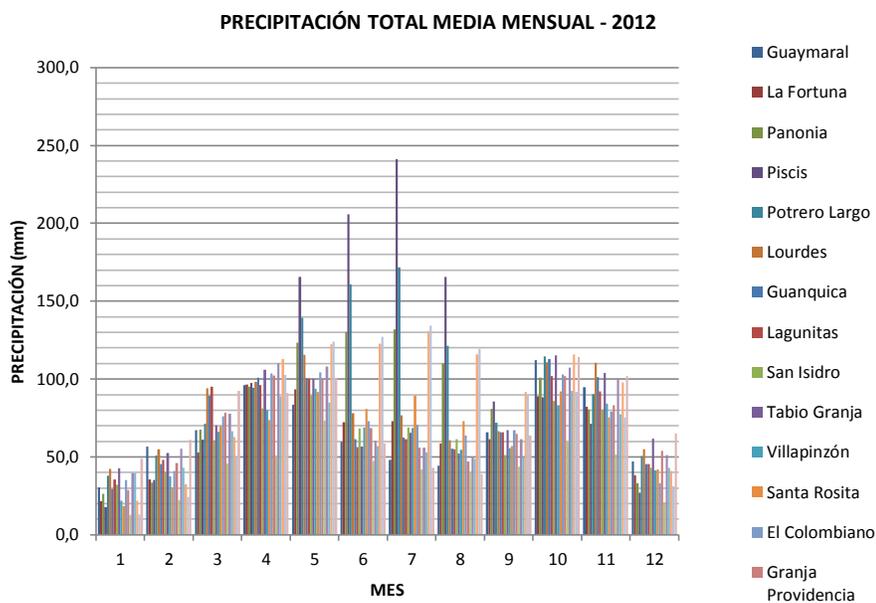


Figura A2. Precipitación total media mensual 2000

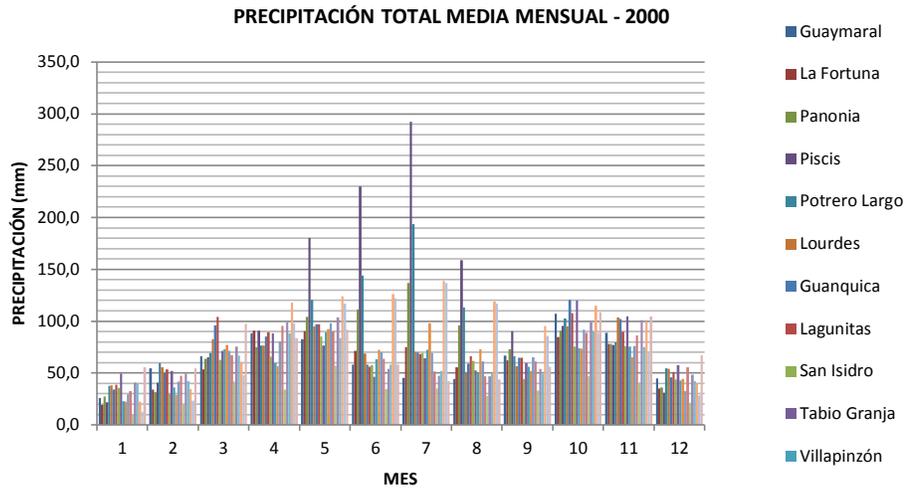
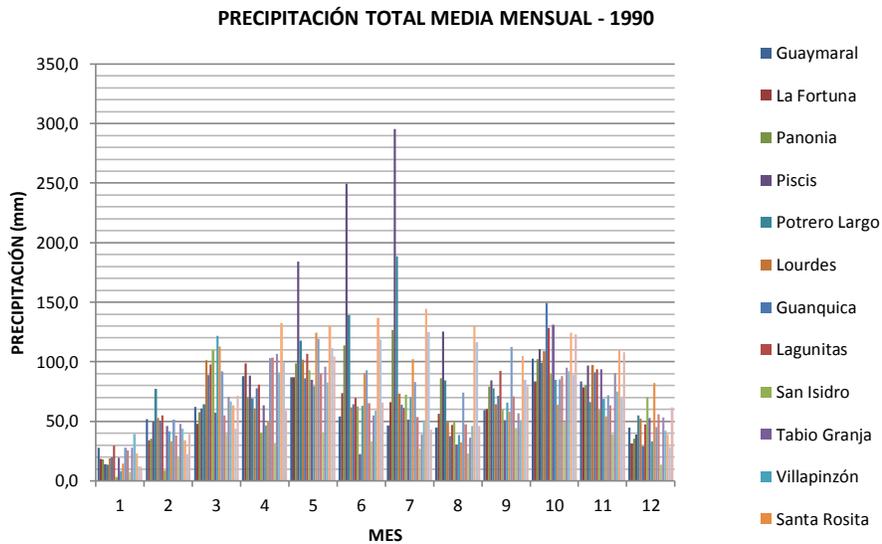


Figura A3. Precipitación total media mensual 1990



Evapotranspiración Potencial

La evapotranspiración potencial corresponde a la máxima pérdida que presenta una superficie expuesta libremente a condiciones ambientales y en la que se garantiza el abastecimiento de agua. Para ello, se utiliza el tanque evaporímetro clase A para su estimación.

Consiste en un tanque de forma cilíndrica hecho en fibra de vidrio o acero galvanizado de 48" de diámetro y altura de 10", dispuesto sobre una plataforma de madera con una altura

también de 10". El tanque debe mantener un nivel de agua a 2" del borde para garantizar abastecimiento de agua constante y diariamente se hace una medición del nivel con un micrómetro de tal forma que luego de hacer un balance hidrológico sobre el tanque se obtenga la cantidad de agua evaporada.

Sin embargo, el valor obtenido de evaporación corresponde a una estimación específica, que es mayor a la que experimentaría un lago ubicado en la misma zona, por lo que se realiza una corrección por un factor K_{TK} que varía entre 0.65 y 0.82 y que para propósitos prácticos equivale a 0.70 en este estudio.

$$ET_P = K_{TK} * ET_{TK}$$

Análisis de datos

Las estaciones La Fortuna y Guaymaral están instrumentadas con el tanque vaporímetro. Las medidas del tanque fueron corregidas por su respectivo factor K_{TK} y se presentan a continuación en la Tabla A4, además del promedio mensual correspondiente en mm.

Tabla A4. Evapotranspiración potencial mensual de las estaciones La Fortuna

MES	EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL MENSUAL (mm)							
	LA FORTUNA				GUAYMARAL			
	2012	2000	1990	2012	2000	1990	1980	
Enero	60,0	60,3	41,4	64,2	63,6	64,7	68,5	
Febrero	52,4	49,9	56,5	57,7	56,7	56,9	62,5	
Marzo	54,8	50,5	40,5	59,3	59,0	63,3	67,2	
Abril	47,5	42,9	53,1	51,0	53,2	53,6	57,6	
Mayo	49,4	44,0	47,0	51,3	54,2	55,2	59,2	
Junio	47,1	45,3	35,8	47,0	49,4	50,8	55,6	
Julio	40,9	38,0	43,1	52,1	53,4	55,7	59,4	
Agosto	44,4	44,4	42,2	51,0	52,4	54,6	58,9	
Septiembre	45,1	45,2	49,7	55,2	55,8	57,8	61,7	
Octubre	45,2	44,2	39,8	54,5	55,7	56,2	62,0	
Noviembre	45,1	45,7	35,3	53,0	54,9	57,0	62,6	
Diciembre	53,2	54,2	61,7	58,0	60,2	60,3	64,3	
MEDIA	48,8	47,1	45,5	54,5	55,7	57,2	61,6	

También se cuenta con el registro de temperatura en la estación de Guatavita y Guaymaral que se muestra en la tabla A5.

Tabla A5. Registro de temperatura anual Estaciones Guaymaral y Guatavita

MES	TEMPERATURA MEDIA MENSUAL (°C)							
	ESTACIÓN GUAYMARAL				ESTACIÓN GUATAVITA			
	2012	2000	1990	1980	2012	2000	1990	1980
Enero	12,9	12,8	12,6	12,0	13,3	13,8	13,8	13,7
Febrero	13,1	13,2	13,0	12,6	13,4	14,3	14,3	14,4

Marzo	13,7	13,5	13,4	12,9	13,7	14,7	14,7	14,7
Abril	13,8	13,7	13,6	13,3	13,7	14,7	14,7	14,7
Mayo	13,6	13,2	13,1	13,2	13,6	14,5	14,4	14,4
Junio	12,8	13,0	13,2	12,9	12,8	13,7	13,7	13,7
Julio	12,5	12,6	12,8	12,4	12,4	13,2	13,1	13,1
Agosto	12,7	12,7	12,9	12,4	12,6	13,4	13,3	13,3
Septiembre	12,9	12,9	12,9	12,4	12,9	13,5	13,5	13,5
Octubre	13,0	13,0	13,1	12,6	13,1	13,8	13,8	14,1
Noviembre	13,2	13,2	13,3	12,8	13,0	14,0	14,1	14,3
Diciembre	12,9	13,0	12,9	12,2	13,1	13,7	13,7	13,8
MEDIA	13,1	13,1	13,1	12,6	13,0	13,9	13,9	13,9

Metodología: Thornthwaite

Esta metodología depende únicamente de los valores de temperatura media mensual y se desarrolló para obtener datos de evapotranspiración potencial en un mes estándar de 30 días y 12 horas de insolación diaria (E_s). Para obtener la evaporación potencial ajustada a la longitud del día, así como al número de días en el mes, hay que multiplicar por un factor de corrección que depende del mes analizado, así como de la latitud en la cual se encuentra la zona de estudio. La evapotranspiración potencial en las estaciones Guaymaral y Guatavita en los períodos de estudio se muestra en la Tabla A6.

Tabla A6. Evapotranspiración potencial estaciones Guaymaral y Guatavita en los períodos de estudio

ANÁLISIS A 2012										
	ESTACIÓN GUAYMARAL					ESTACIÓN GUATAVITA				
	T (°C)	i	Es	f	Ep (mm)	T (°C)	i	Es	f	Ep (mm)
ENERO	12,9	4,2	53,6	1,020	54,7	13,3	4,4	55,6	1,020	56,7
FEBRERO	13,1	4,3	54,9	0,925	50,8	13,4	4,5	56,3	0,925	52,1
MARZO	13,7	4,6	58,1	1,035	60,2	13,7	4,6	57,8	1,035	59,8
ABRIL	13,8	4,7	58,6	1,020	59,8	13,7	4,6	58,0	1,020	59,2
MAYO	13,6	4,5	57,2	1,060	60,7	13,6	4,6	57,6	1,060	61,0
JUNIO	12,8	4,2	53,2	1,035	55,1	12,8	4,1	52,9	1,035	54,7
JULIO	12,5	4,0	51,4	1,060	54,5	12,4	4,0	51,1	1,060	54,1
AGOSTO	12,7	4,1	52,5	1,055	55,4	12,6	4,0	51,8	1,055	54,7
SEPTIEMBRE	12,9	4,2	53,8	1,015	54,6	12,9	4,2	53,3	1,015	54,1
OCTUBRE	13,0	4,2	53,8	1,030	55,4	13,1	4,3	54,8	1,030	56,5
NOVIEMBRE	13,2	4,3	54,9	0,995	54,6	13,0	4,2	53,9	0,995	53,6
DICIEMBRE	12,9	4,2	53,5	1,015	54,3	13,1	4,3	54,6	1,015	55,4
MEDIA	13,1	I (Ei)	51,620		55,8	13,1	I (Ei)	51,799		56,0
		a	1,305				a	1,308		
ANÁLISIS A 2000										
	ESTACIÓN GUAYMARAL					ESTACIÓN GUATAVITA				
	T (°C)	i	Es	f	Ep (mm)	T (°C)	i	Es	f	Ep (mm)
ENERO	12,8	4,1	52,8	1,020	53,8	13,8	4,7	58,6	1,020	59,8
FEBRERO	13,2	4,3	54,9	0,925	50,8	14,3	4,9	61,2	0,925	56,6
MARZO	13,5	4,5	56,6	1,035	58,6	14,7	5,1	63,2	1,035	65,4
ABRIL	13,7	4,6	57,9	1,020	59,0	14,7	5,1	63,6	1,020	64,9
MAYO	13,2	4,3	54,9	1,060	58,2	14,5	5,0	62,3	1,060	66,1
JUNIO	13,0	4,3	54,3	1,035	56,2	13,7	4,6	58,2	1,035	60,2
JULIO	12,6	4,1	52,0	1,060	55,1	13,2	4,3	55,0	1,060	58,2
AGOSTO	12,7	4,1	52,5	1,055	55,4	13,4	4,4	56,1	1,055	59,2
SEPTIEMBRE	12,9	4,2	53,3	1,015	54,1	13,5	4,5	57,0	1,015	57,9
OCTUBRE	13,0	4,2	54,0	1,030	55,6	13,8	4,7	58,7	1,030	60,4
NOVIEMBRE	13,2	4,4	55,2	0,995	54,9	14,0	4,7	59,5	0,995	59,2
DICIEMBRE	13,0	4,2	53,8	1,015	54,6	13,7	4,6	58,1	1,015	58,9
MEDIA	13,1	I (Ei)	51,294		55,5	13,9	I (Ei)	56,754		60,6
		a	1,300				a	1,384		

ANÁLISIS A 1990										
	ESTACIÓN GUAYMARAL					ESTACIÓN GUATAVITA				
	T (°C)	i	Es	f	Ep (mm)	T (°C)	i	Es	f	Ep (mm)
ENERO	12,6	4,1	52,1	1,020	53,2	13,8	4,6	58,2	1,020	59,4
FEBRERO	13,0	4,3	54,2	0,925	50,2	14,3	4,9	61,1	0,925	56,5
MARZO	13,4	4,5	56,3	1,035	58,3	14,7	5,1	63,3	1,035	65,5
ABRIL	13,6	4,6	57,5	1,020	58,7	14,7	5,1	63,5	1,020	64,7
MAYO	13,1	4,3	54,5	1,060	57,7	14,4	5,0	61,9	1,060	65,6
JUNIO	13,2	4,3	54,9	1,035	56,8	13,7	4,6	57,6	1,035	59,7
JULIO	12,8	4,1	52,9	1,060	56,1	13,1	4,3	54,8	1,060	58,1
AGOSTO	12,9	4,2	53,3	1,055	56,2	13,3	4,4	55,6	1,055	58,7
SEPTIEMBRE	12,9	4,2	53,6	1,015	54,5	13,5	4,5	56,7	1,015	57,6
OCTUBRE	13,1	4,3	54,8	1,030	56,4	13,8	4,7	58,6	1,030	60,3
NOVIEMBRE	13,3	4,4	55,6	0,995	55,3	14,1	4,8	60,0	0,995	59,7
DICIEMBRE	12,9	4,2	53,3	1,015	54,1	13,7	4,6	57,7	1,015	58,6
MEDIA	13,1	I (Ei)	51,383		55,6	13,9	I (Ei)	56,533		60,4
		a	1,301				a	1,381		

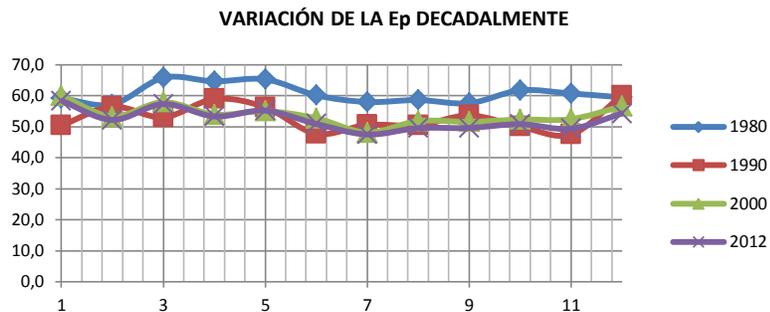
Donde:

- $i = \left(\frac{T(^{\circ}\text{C})}{5}\right)^{1.514}$
- $I = \sum i$
- $a = 675 * 10^{-9} * I^3 - 771 * 10^{-7} * I^2 + 1792 * 10^{-5} * I + 0.49239$
- $Es = 16.2 * \left(\frac{10 * T(^{\circ}\text{C})}{I}\right)^a$
- $ET_p = Es * f$

Se definió un valor constante de evaporación dada la similitud de los valores obtenidos mes a mes. Para ello, se uso de la información que entregaron las estaciones Guatavita y La Fortuna, que se encuentran dentro del área de estudio y se promediaron sus valores mensuales decadales para así obtener un único valor. A continuación se presenta la tabla A7 con la evaporación potencial para el total del área de estudio. La variación de la evapotranspiración desde 1980 hasta 2012 se muestra en la Figura A4.

Tabla A7. Evaporación potencial del área de estudio

EVAPORACIÓN POTENCIAL DEL ÁREA DE ESTUDIO (mm)				
MES	1980	1990	2000	2012
Enero	59,2	50,4	60,0	58,4
Febrero	57,2	56,5	53,3	52,2
Marzo	65,8	53,0	57,9	57,3
Abril	64,6	58,9	53,9	53,3
Mayo	65,3	56,3	55,0	55,2
Junio	60,2	47,7	52,7	50,9
Julio	58,0	50,6	48,1	47,5
Agosto	58,6	50,4	51,8	49,6
Septiembre	57,6	53,6	51,6	49,6
Octubre	61,7	50,1	52,3	50,8
Noviembre	60,7	47,5	52,5	49,4
Diciembre	59,5	60,1	56,6	54,3
MEDIA	60,7	52,9	53,8	52,4

Figura A4. Variación de la evapotranspiración desde 1980 hasta 2012

Caudales

A continuación se presentan los histogramas de caudales medios mensuales decadales para 3 estaciones a lo largo del cauce del río Bogotá en el área de estudio. Si bien la estación Puente la Virgen no está considerada dentro del área de estudio, es el punto en el cual de acuerdo con el POMCA (CAR, 2006) termina la cuenca alta del río. En las Tablas A8, A9 y A10 se muestran los caudales medios de cada estación analizada y las figuras A5, A6 y A7 presentan los mismos datos de manera gráfica.

Tabla A8. Caudal medio estación Villapinzón

CAUDAL MEDIO ESTACIÓN VILLAPINZÓN (m ³ /s)				
MES	AÑOS			
	2012	2000	1990	1980
Enero	0,196	0,186	0,252	-
Febrero	0,178	0,160	0,212	-
Marzo	0,247	0,276	0,390	-
Abril	0,415	0,458	0,801	-
Mayo	0,734	0,807	1,090	-
Junio	1,001	1,039	1,504	-
Julio	1,145	1,337	1,153	-
Agosto	0,962	1,007	1,106	-
Septiembre	0,706	0,813	1,214	-
Octubre	0,869	1,040	1,783	-
Noviembre	1,028	1,200	2,366	-
Diciembre	0,906	1,206	2,597	-
MEDIA	0,699	0,794	1,206	-

Figura A5. Caudal medio estación Villapinzón

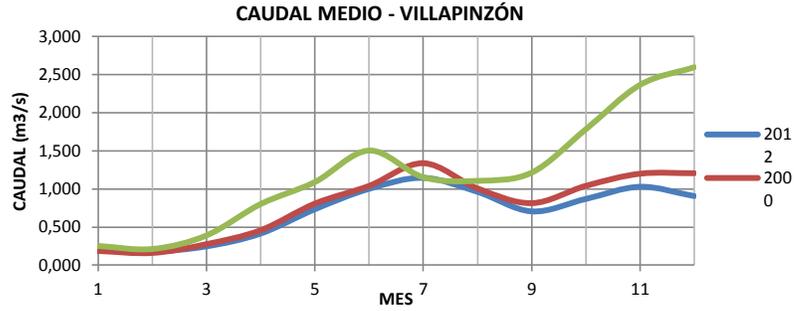


Tabla A9. Caudal medio estación Tocancipá

CAUDAL MEDIO ESTACIÓN TOCANCIPÁ (m3/s)				
MES	AÑOS			
	2012	2000	1990	1980
Enero	9,656	10,767	12,376	13,330
Febrero	10,368	11,347	13,192	13,255
Marzo	10,060	10,808	12,048	12,292
Abril	9,495	10,380	11,865	12,240
Mayo	8,660	8,767	9,684	9,468
Junio	8,531	8,341	9,453	9,949
Julio	9,485	9,531	10,574	11,558
Agosto	9,052	8,864	10,079	11,345
Septiembre	8,937	9,329	10,493	10,962
Octubre	8,558	8,853	9,726	9,887
Noviembre	8,173	8,309	9,065	8,149
Diciembre	8,700	9,307	10,891	9,719
MEDIA	9,140	9,550	10,787	11,013

Figura A6. Caudal medio estación Tocancipá

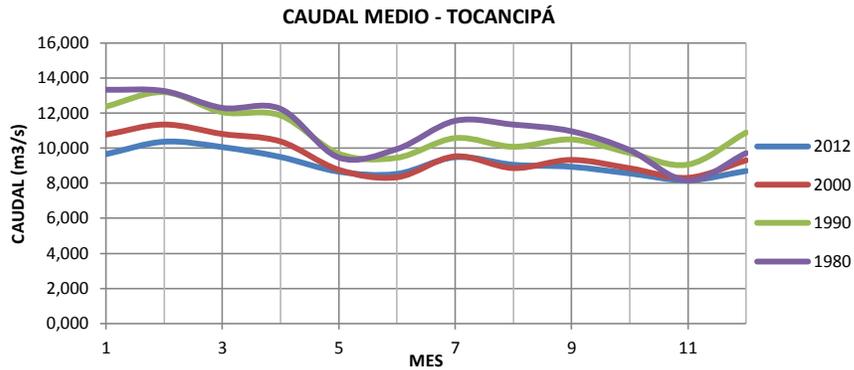
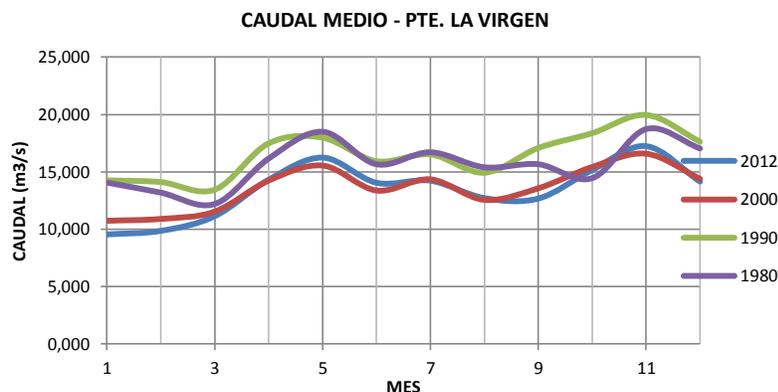


Tabla A10. Caudal medio estación Puente La Virgen

CAUDAL MEDIO ESTACIÓN PTE. LA VIRGEN (m ³ /s)				
MES	AÑOS			
	2012	2000	1990	1980
Enero	9,549	10,736	14,261	14,066
Febrero	9,857	10,900	14,106	13,191
Marzo	11,132	11,532	13,448	12,199
Abril	14,309	14,237	17,481	16,156
Mayo	16,241	15,547	17,975	18,492
Junio	14,048	13,372	15,924	15,659
Julio	14,228	14,345	16,519	16,705
Agosto	12,712	12,558	14,920	15,397
Septiembre	12,673	13,567	17,079	15,663
Octubre	15,159	15,422	18,365	14,447
Noviembre	17,235	16,580	19,952	18,721
Diciembre	14,150	14,398	17,631	17,037
MEDIA	13,441	13,599	16,472	15,644

Figura A7. Caudal medio estación Puente La Virgen

Obtención de la Curva de Duración de Caudales (CDC)

Se define la Curva de Duración de Caudales como la representación gráfica, en orden decreciente, de los caudales (Q) observados durante un tiempo que se expresa en porcentaje. Para la obtención de la CDC se hizo uso de la información registrada en las estaciones de Villapinzón, Tocancipá y Puente La Virgen en Cota. Se descartó el registro de los años en los que la estación no estuvo en operación o aquel año en el que había 2 o más meses en los que no se había tomado registro.

Método de Weibull

Para la construcción de la CDC se requiere el caudal máximo registrado año tras año. Luego, se ordenan los caudales de mayor a menor para poder aplicar la función para el cálculo de

probabilidad de Weibull, se le asigna un orden m a cada uno de los datos y se estima la probabilidad de ocurrencia a cada uno de los caudales ordenados. Las Tablas A11, A12 y A13 muestran la duración de los caudales de cada estación analizada.

Tabla A11. Duración de caudales estación Villapinzón

VILLAPINZÓN					
AÑO	Q _{máx.}	Q _{máx.*}	m	Pr	Tr (años)
1991	1,551	2,600	1	0,05	20,00
1992	1,452	2,331	2	0,10	10,00
1993	1,142	2,150	3	0,15	6,67
1994	2,331	2,125	4	0,20	5,00
1995	0,346	1,659	5	0,25	4,00
1996	1,584	1,584	6	0,30	3,33
1997	2,600	1,551	7	0,35	2,86
1998	2,125	1,452	8	0,40	2,50
1999	1,120	1,437	9	0,45	2,22
2000	0,820	1,195	10	0,50	2,00
2001	1,031	1,142	11	0,55	1,82
2002	1,437	1,120	12	0,60	1,67
2003	0,898	1,074	13	0,65	1,54
2004	1,659	1,031	14	0,70	1,43
2005	1,074	0,943	15	0,75	1,33
2006	2,150	0,898	16	0,80	1,25
2007	0,943	0,820	17	0,85	1,18
2008	1,195	0,768	18	0,90	1,11
2009	0,768	0,346	19	0,95	1,05

Tabla A12. Duración de caudales estación Tocancipá

TOCANCIPÁ					
AÑO	Q _{máx}	Q _{máx*}	m	Pr	Tr (años)
1970	12,750	27,910	1	0,03	36,00
1972	27,910	25,426	2	0,06	18,00
1973	18,710	23,610	3	0,08	12,00
1974	14,970	22,840	4	0,11	9,00
1975	22,480	22,480	5	0,14	7,20
1976	22,840	21,376	6	0,17	6,00
1977	23,610	19,740	7	0,19	5,14
1978	11,160	18,710	8	0,22	4,50
1979	16,910	17,985	9	0,25	4,00
1980	17,928	17,928	10	0,28	3,60
1982	11,600	16,910	11	0,31	3,27
1983	21,376	16,615	12	0,33	3,00
1984	10,503	15,688	13	0,36	2,77
1986	17,985	14,970	14	0,39	2,57

1987	25,426	14,922	15	0,42	2,40
1988	15,688	13,350	16	0,44	2,25
1991	13,350	12,750	17	0,47	2,12
1992	19,740	12,543	18	0,50	2,00
1993	6,910	11,953	19	0,53	1,89
1994	8,630	11,823	20	0,56	1,80
1995	7,298	11,600	21	0,58	1,71
1996	8,225	11,320	22	0,61	1,64
1997	11,320	11,160	23	0,64	1,57
1998	8,656	10,503	24	0,67	1,50
1999	7,598	10,307	25	0,69	1,44
2000	8,173	9,960	26	0,72	1,38
2001	9,960	9,801	27	0,75	1,33
2002	16,615	8,656	28	0,78	1,29
2003	9,801	8,630	29	0,81	1,24
2004	14,922	8,561	30	0,83	1,20
2005	10,307	8,225	31	0,86	1,16
2006	12,543	8,173	32	0,89	1,13
2007	11,823	7,598	33	0,92	1,09
2008	11,953	7,298	34	0,94	1,06
2009	8,561	6,910	35	0,97	1,03

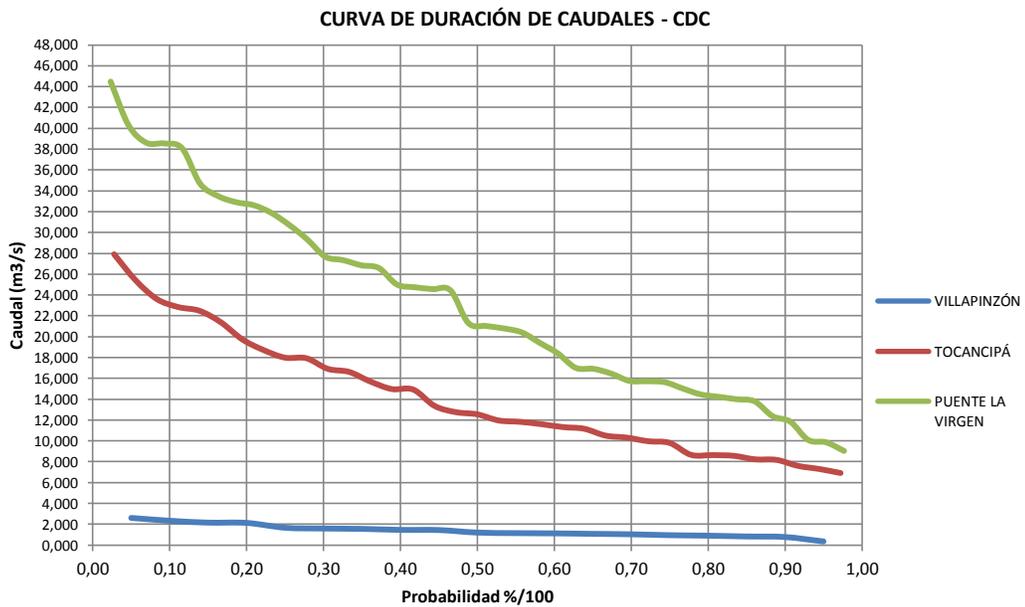
Tabla A13. Duración de caudales estación Puente La Virgen

PUENTE LA VIRGEN					
AÑO	Q _{máx}	Q _{máx*}	m	Pr	Tr (años)
1971	18,395	44,480	1	0,02	43,00
1972	33,501	40,300	2	0,05	21,50
1973	25,007	38,611	3	0,07	14,33
1974	21,303	38,548	4	0,09	10,75
1975	17,005	38,076	5	0,12	8,60
1976	26,580	34,697	6	0,14	7,17
1977	20,401	33,501	7	0,16	6,14
1978	19,394	32,912	8	0,19	5,38
1979	34,697	32,616	9	0,21	4,78
1980	24,743	31,865	10	0,23	4,30
1981	32,912	30,703	11	0,26	3,91
1982	38,611	29,322	12	0,28	3,58
1983	27,673	27,673	13	0,30	3,31
1984	12,374	27,340	14	0,33	3,07
1985	16,444	26,853	15	0,35	2,87

1986	32,616	26,580	16	0,37	2,69
1987	38,548	25,007	17	0,40	2,53
1988	38,076	24,743	18	0,42	2,39
1989	24,444	24,561	19	0,44	2,26
1990	29,322	24,444	20	0,47	2,15
1991	13,992	21,303	21	0,49	2,05
1992	16,910	21,023	22	0,51	1,95
1993	15,722	20,784	23	0,53	1,87
1994	15,752	20,401	24	0,56	1,79
1995	11,831	19,394	25	0,58	1,72
1996	10,082	18,395	26	0,60	1,65
1997	9,031	17,005	27	0,63	1,59
1998	15,621	16,910	28	0,65	1,54
1999	21,023	16,444	29	0,67	1,48
2000	14,223	15,752	30	0,70	1,43
2001	9,857	15,722	31	0,72	1,39
2002	20,784	15,621	32	0,74	1,34
2003	13,791	15,010	33	0,77	1,30
2004	27,340	14,451	34	0,79	1,26
2005	24,561	14,223	35	0,81	1,23
2006	44,480	13,992	36	0,84	1,19
2007	15,010	13,791	37	0,86	1,16
2008	26,853	12,374	38	0,88	1,13
2009	14,451	11,831	39	0,91	1,10
2010	30,703	10,082	40	0,93	1,08
2011	40,300	9,857	41	0,95	1,05
2012	31,865	9,031	42	0,98	1,02

La figura A8 presenta las curvas de duración de caudal para cada estación.

Figura A8. Curvas de duración de caudal estaciones de estudio



Balance Hídrico Mensual

Las tablas A13, A14 y A15 presentan los balances hídricos desde la década del 90 hasta la actualidad.

Tabla A13. Balance hídrico año 1990

1990							
Mes	P (mm)	Ep (mm)	Q (m3/s)	P-Ep (mm)	Reserva (mm)	Δ Res. (mm)	Infiltración (m3/s)
Ene	14,6	50,4	12,376	-35,8	0,0	0,0	0,000
Feb	44,5	56,5	13,192	-12,0	0,0	0,0	0,000
Mar	76,8	53,0	12,048	23,8	23,8	23,8	7,573
Abr	67,9	58,9	11,865	9,0	32,8	9,0	5,341
May	105,2	56,3	9,684	48,9	81,7	48,9	44,160
Jun	116,5	47,7	9,453	68,8	150,4	68,8	80,932
Jul	131,2	50,6	10,574	80,6	231,0	80,6	117,940
Ago	69,6	50,4	10,079	19,2	250,2	19,2	100,996
Sep	73,0	53,6	10,493	19,4	269,5	19,4	108,646
Oct	93,4	50,1	9,726	43,3	312,8	43,3	137,153
Nov.	74,5	47,5	9,065	27,0	339,8	27,0	142,207
Dic.	45,7	60,1	10,891	-14,4	0,0	-339,8	0,000

Tabla A14. Balance hídrico año 2000

2000							
Mes	P (mm)	Ep (mm)	Q (m3/s)	P-Ep (mm)	Reserva (mm)	Δ Res (mm)	Infiltración (m3/s)
Ene	28,4	60,0	10,767	-31,6	0,0	0,0	0,000
Feb	40,0	53,3	11,347	-13,3	0,0	0,0	0,000
Mar	66,5	57,9	10,808	8,6	8,6	8,6	0,000
Abr	72,8	53,9	10,380	18,9	27,5	18,9	8,736
May	109,0	55,0	8,767	54,0	81,4	54,0	47,073
Jun	110,5	52,7	8,341	57,8	139,2	57,8	72,889
Jul	133,3	48,1	9,531	85,2	224,4	85,2	118,112
Ago	83,5	51,8	8,864	31,7	256,0	31,7	109,788
Sep	63,8	51,6	9,329	12,2	268,3	12,2	106,341
Oct	87,4	52,3	8,853	35,1	303,4	35,1	130,723
Nov	76,9	52,5	8,309	24,4	327,8	24,4	136,957
Dic	40,4	56,6	9,307	-16,2	0,0	-327,8	0,000

Tabla A15. Balance hídrico 2012

2012							
Mes	P (mm)	Ep (mm)	Q (m3/s)	P-Ep (mm)	Reserva (mm)	Δ Res.. (mm)	Infiltración (m3/s)
Ene	27,5	58,4	9,656	-30,9	0,0	0,0	0,000
Feb	39,3	52,2	10,368	-12,9	0,0	0,0	0,000
Mar	67,3	57,3	10,060	10,0	10,0	10,0	0,000
Abr	89,8	53,3	9,495	36,5	46,4	36,5	24,695
May	114,6	55,2	8,660	59,4	105,8	59,4	59,489

Jun	113,1	50,9	8,531	62,2	168,0	62,2	86,408
Jul	125,0	47,5	9,485	77,5	245,5	77,5	123,734
Ago	92,5	49,6	9,052	42,9	288,5	42,9	127,623
Sep	67,8	49,6	8,937	18,2	306,6	18,2	125,020
Oct	95,7	50,8	8,558	44,9	351,5	44,9	154,910
Nov	82,0	49,4	8,173	32,6	384,2	32,6	163,713
Dic	39,6	54,3	8,700	-14,7	0,0	-384,2	0,000

Anexo B. Inventario de Industrias de Tocancipá

Este anexo contiene el inventario de industrias del municipio de Tocancipá clasificado en ocho categorías. Este inventario fue suministrado por la Gerencia de Medio Ambiente del municipio y se presenta en la Tabla B1.

Tabla B1. Inventario de industrias del municipio de Tocancipá

SERVICIOS Y COMERCIO			
#	Nombre	Tipo	Ubicación
1	Empresa de Servicios Públicos de Tocancipá	Servicios públicos.	Calle 10 # 6 - 63
2	Corporación Sergh	Reciclaje	Vereda Verganzo, Sector Gaviotas
3	General Risg Service	Mantenimiento de maquinaria de perforación.	Vereda Verganzo, sector Limajay
4	Transportes y servicios Transer S.A.	Transporte	Vereda Canavita, Bodega Potensa - Vía Colpapel
5	Geospectro SAS	Estudios de exploración sísmica.	Kilómetro 20, Parque Industrial Acropolis
6	Parque Industrial Acropolis	Inmobiliaria.	Vereda Canavita
7	Servicom Asociados Ltda. "PETROBRAS"	Distribucion de combustibles	Carretera Central del Norte, Kilometro 35
8	SLS ENERGY S.A.S. (HPPS)	Mantenimiento y alquiler maquinaria petrolera	Carretera central del norte, kilómetro 20
9	Emgesa S.A. ESP	Termoeléctrica	Vereda Canavita, Continuo al Autodrómo
10	Lavadero La Esmeralda	Lavado de autos	Vereda La Esmeralda, al lado del santandereano
11	Pablo Sierra	Mantenimiento maquinaria de perforación petrolera.	Kilometro 22.5 - Autopista Norte
12	Parque Industrial Tibitoc	Inmobiliaria.	Kilometro 2, via Briceño - Zipaquirá
13	Transportes Montejo Ltda.	Transporte de carga	Carretera Central del norte Kilómetro 37
14	San Antonio Internacional	Mantenimiento de taladros petroleros.	Vda Canavita, Vía canavita-Sopó
15	Serinc drilling	Servicios de perforación de pozos petroleros - no perforación.	Km 1,1 Vía Briceño Zipaquirá
16	nabors drilling	Servicios de perforación de pozos petroleros - no perforación.	Km 1 Vía Briceño zipaquirá
17	wilson workover	Alquiler y préstamo de equipos de perforación.	Km 1,1 Vía Briceño Zipaquirá
18	Beta Energy Corp - Sucursal Colombia	Servicios de perforación de pozos petroleros - no perforación.	-----
19	cales y enmiendas	Comercialización de productos agrícolas	Verganzo
20	Parque Industrial Gran Sabana	Inmobiliaria.	Vereda tibitó, Lote M Tcancipá

21	Parque Industrial Trafalgar	Inmobiliaria.	Tibitoc
22	Parque Industrial Favrica	Inmobiliaria.	-----
23	Parque Industrial Oikos	Inmobiliaria.	Canavita
24	Parque Industrial Kargo	Inmobiliaria.	Canavita
25	Foster Ingenieria Ltda	Alquiler y venta de formaleta mecánica y andamios.	-----
26	Emecom Ltda	Diseño, fabricación y montaje de estructuras.	Km 20,5 Autopista norte, vereda canavita
27	Mamut de Colombia S.A.	Transporte extrapesado y extradimensionado	Vereda Canavita entrada para Ebel
27	Autodromos S.A.	Esparcimiento.	Km 36 Via Zipaquirá, vda Verganzo
28	Artimfer	Comercialización e importación de accesorios para la conducción de fluidos.	-----
29	Contiental Drilling Company S.A.S	Servicios relacionados con extracción petróleo y gas.	Vereda Verganzo
30	Agregados El Rodeo	Comercio al por mayor de materiales de construcción, ferretería y vidrio	Km 3 vía Briceño - Zipaquirá
31	Koba Colombia S.A.S	Comercio al por menor de alimentos (víveres en general), bebidas y tabaco	Km 2 vía Briceño - Zipaquirá
32	Hidrocorp	Servicios de tratamiento de aguas.	Carrera 4a N° 17-82 Autopista
METALMECANICA			
#	Nombre	Tipo	Ubicación
1	Ferrofábril Colombia Ltda.	Fabricación estructuras metálicas	Kilometro 21, autopista norte.
2	Industrias JAPAN S.A.	Fabricación partes de motocicleta.	Kilometro 29, autopista norte.
3	Sidenal S.A.	Almacenamiento de chatarra y elaboración de mallas electrosoldadas	Vereda Tibitoc - Diagonal al Autodromo
4	VA Tools Ltda	Fabricación herramientas para el área de hidrocarburos.	Parque Industrial Acropolis Bod. 12, 13 y 14
5	Diacó S.A.	Industria básica: hierro y acero.	Kilometro 2, diagonal al Autodromo de Tocancipá
6	Precco Ltda	Metalmeccánica.	Kilómetro 23, Vía Bogotá - Tunja
7	Mincivil	Acopio mineral de hierro.	Km 19, vía Briceño - Zipaquirá.
8	Metalurgia Construcel Colombia S.A. METACOL	Fabricación de material Hidrostático	Vereda Canavita - Sector Dulcinea
9	Comtecol S.A.S.	Fabricación de torres de enfriamiento.	Puente Aranda / Bogotá
10	Industrias Magma S.A.	Fundición de acero.	Km. 39 - Autopista Norte, vereda Verganzo.
11	Materiales de Colombia MATCO	Fabricación de minerales no metálicos.	km 4 vereda Canavita
12	Incolnox	Fabricación de tanques, depósitos y recipientes de metal	Canavita vía Colpapel
13	Akros (Colodos)	Fabricación/mantenimiento equipos para controlar sólidos en perforación.	Km 38 y 39 Autopista norte, vereda Verganzo
14	Frana International S.A.S.	Fabricante de núcleos ferromagnéticos para transformadores eléctricos.	Parque Ind Gran Sabana
15	Flexon Llaves	Fabricación llaves y herrajes	Parque Industrial Trafalgar
QUIMICA			
#o	Nombre	Tipo	Ubicación
1	Productos Químicos Panamericanos PQP	Industria química	Kilometro 41, Autopista Norte
2	Aislapor SAS	Producción y comercialización de poliestileno expandible	Vereda Canavita - Predio el pencil
3	Linde Colombia SA	Producción de gases del aire.	Kilometro 37, Autopista Norte
4	Gases tecnologías y servicios S.A.	Producción y comercialización de gases.	Vereda Verganzo, sector Limajay
5	Sika Colombia SA	Producción y Comercialización de productos Químicos para la construcción	Kilometro 20.5, Autopista Norte
6	Procesos y Aditivos especiales SAS	Maquila de Productos Agroquímicos.	Sector Dulcinea
7	Pelpak S.A.	Fabricación de envases plásticos	Km 20, carretera central del norte
8	Crown de Colombia S.A.	Fabricación de envases para bebidas	Vereda Tibitoc - Vía Autodromo.

9	Recliclene S.A	Fabricación y transformación de materiales plásticos	Parque Industrial Gran Savana, Via autodromo de Tocancipá
10	Plastilene S.A	Fabricación y transformación de materiales plásticos	Parque Industrial Gran Savana, Via autodromo de Tocancipá
11	Lípesa Colombia S.A.	Industria Química	Carretera central Bogotá - Tunja, frente a Bavaria.
12	Praxair	Gases Industriales	Vda Tibitoc
13	Carvajal	Empaques	Parque Ind Gran Sabana
14	Sinea	Fabricación de tapas plásticas	Parque Ind. Trafalgar Bd 9 a 11
FARMACEUTICA			
#	Nombre	Tipo	Ubicación
1	Bel Star - Ebel	Fabricación de cosméticos y perfumes.	Vereda Canavita, Kilometro 22 Autopista Norte
2	Sisbita Biotecnology S.A.S.	Proceso biotecnológico	Vereda Canavita
3	Laboratorio Pisa farmacéutico Colombia	Almacenamiento y etiquetado de productos farmacéuticos	Calle 20 # 69b - 36
4	Laboratorio Naturasol	Fabricación de productos farmacéuticos	Vereda Canavita - Sector Dulcinea
5	Paul Calley	Fabricación de jabones y detergentes	-----
6	Laboratorios Sudamericanos S.A.	Fabricación de jabones y detergentes	Parque Tibitoc Bd 25b y 26b
PAPEL Y TEXTILES			
#	Nombre	Tipo	Ubicación
1	Toptex S.A.	Industria Textil	Vereda Canavita - Zona industrial
2	Colombiana Kimberly COLPAPEL S.A.	Fabricación artículos papel y cartón.	Kilometro 2.5, via canavita
3	Pulpack Ltda.	Fabricación de cubetas para huevos	Kilometro 2.5, Vía Briceño - Zipaquirá
4	Packing S.A.	Fabricación de cajas de cartón	Autopista norte, kilómetro 28
ALIMENTOS Y BEBIDAS			
#o	Nombre	Tipo	Ubicación
1	Lucta Gran Colombiana SAS	Fabricación y comercialización de aromas, fragancias y aditivos para alimentación animal	Vía Autodromo, kilometro 2.
2	Bavaria S.A.	Elaboración de malta, cerveza y otras bebidas	Autopista norte, kilómetro 20
3	Quala	Elaboración de productos alimenticios y bebidas	Tibitoc
4	Malterías Unidas S.A.	Producción de malta, elaboración de cerveza y otras bebidas malteadas	Km 6, vía Briceño Zipaquirá
5	LactoLife	Fabricación y Comercialización de Quesos Italianos	Parque Industrial Trafalgar
6	La Finca	Producción de concentrados para animales	Tibitoc
MADERA			
#o	Nombre	Tipo	Ubicación
1	Manufacturas terminadas S.A. "MANTESA"	Fabricación y Comercialización de artículos derivados de la madera	Kilómetro 23, Carretera central del norte
2	forestal cimitarra	Aserrado, cepillado e impregnación de madera	Canavita
3	manufacturas en maderas cimitarra	Aserrado, cepillado e impregnación de madera	Autonorte km 32 Canavita
4	Imandina	Aserrado, cepillado e impregnación de madera	Autopista norte km 32 vereda canavita
CONSTRUCCION Y OTROS			
#	Nombre	Tipo	Ubicación
1	Morteros Tequendama	Fabricación de Mortero seco	Vereda Canavita, Vía Ebel - Colpapel
2	CGL Compañía geofísica latinoamericana SAS	Todo relacionado con hidrocarburos y todo tipo de material energético	Parque Industrial Acropolis Bod. 7 y 14
3	Agregados Britalia	Trituración de escombros y lavado de arena	Vereda Verganzó - Predio Britalia
4	Ecopetrol S.A.	Transporte de hidrocarburos	Vereda El Porvenir
5	Camco S.A.S.	Acopio de Carbón	Kilometro 2.6, vía Briceno - Zipaquirá

6	Cemex	Fabricación de cemento, cal y yeso	km 28 carretera central del norte
---	-------	------------------------------------	-----------------------------------

Bibliografía

- Aguilera, F. (1998). Hacia una nueva economía del agua: cuestiones fundamentales. Presented at the Congreso Ibérico sobre gestión y planificación de aguas. El agua a debate desde la Universidad: Hacia una nueva cultura del agua, Zaragoza: Arrojo y Martínez.
- Andrade, P. (1991). *Localización y difusión de la floricultura en Colombia: el caso de la Sabana de Bogotá*. Bogotá.
- Asocolflores. (2013, January). *The Colombian Flower Industry*.
- Beck, A. (1991). *Life Introduction to Biology*. Addison-Wesley Longman, Incorporated.
- Beltrán, M. J., & Velázquez, E. (2011). Del metabolismo social al metabolismo hídrico. Asociación de Economía Ecológica en España EcoEcoEs.
- Bernal. (2008). Sabana de Bogotá: el conflicto por los recursos naturales y la situación ecológica. In *Palacio, G (2008). Historia Ambiental de Bogotá y La Sabana, 1805 - 2005*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Instituto Amazónico de Investigación IMANI.
- Bertalanffy, L. (1950). The theory of Open Systems in Physics and Biology. *Science*, 111(2872).

- Boyden, S. . (1992). *Biohistory: The interplay between human society and the biosphere. Past and present. Man and biosphere series, 8*(Paris. UNESCO-Parthenon Publishing Group. Casterton Hall, Park Ridge. New Jersey).
- CAR. (1960). *Censo de industrias en el área de la CAR*. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de la Sabana de Bogotá y de los Valles de Ubaté y Chiquinquirá.
- CAR. (1966). *La industria manufacturera en el área de la CAR (Estudio preliminar)*. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de la Sabana de Bogotá y de los Valles de Ubaté y Chiquinquirá.
- CAR. (2006). *Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Bogotá*. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- CAR. (2009). *Censo de usuarios en la jurisdicción de la CAR*. Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Carrizosa, -j. (2005). *Desequilibrios territoriales y sostenibilidad local: Conceptos, metodologías y realidades*. (Universidad Nacional de Colombia - Instituto de Estudios Ambientales.). Bogotá.
- CAR-SGC. (1998). *Cuenca alta del Río Bogotá: Descripción y diagnóstico*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Chapagain, A. ., & Hoekstra, A. . (2004). *Water Footprints of Nations*. (No. 16). UNESCO-IHE Institute for Water Education. University of Twente.

- Contraloría de Cundinamarca. (2008). *Estado de los recursos naturales y del ambiente de Cundinamarca*. Bogotá D.C: Contraloría Delegada para el Medio Ambiente.
- Cussó, X., Garrabou, R., Olarieta, J. R., & Tello, E. (2006). Balances energéticos y uso del suelo en la agricultura catalana: una comparación entre mediados del siglo XIX y finales del siglo XX. *UHE Working papers, Universitat Autònoma de Barcelona*, (07).
- DANE. (1969). *XIII Censo Nacional de Población* (p. 131). Bogotá, Colombia: Departamento Nacional de Estadística.
- DANE. (1978). *XIV Censo Nacional de Población y III de Vivienda*. República de Colombia: Departamento Nacional de Estadística.
- DANE. (1989). *Censo Nacional de Colombia. Cuadros de población total con ajuste final de cobertura por secciones del país y municipios* (p. 73). Bogotá, Colombia: Departamento Nacional de Estadística.
- DANE. (2005). *Censo General 2005 Nivel Nacional*.
- DANE. (2010). *Informe de Resultados: Censo de Fincas Productoras de Flores en 28 municipios de la Sabana de Bogotá y Cundinamarca 2009*. Cundinamarca: DANE.
- Díaz, C. (2011). *Metabolismo de la ciudad de bogotá D.C: una herramienta para el análisis de la sostenibilidad ambiental urbana* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.

- DNP. (2004). Documento CONPES 3320. Estrategia para el manejo ambiental del Río Bogotá. Departamento Nacional de Planeación.
- Dueñas, G. (1997). *Los hijos del pecado. Ilegitimidad y vida familiar en la Santafé de Bogotá colonial*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Eisenmenger, N., Ramos Martín, J., & Schandl, H. (2007). Análisis del metabolismo energético y de materiales de Brasil, Chile y Venezuela. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 6, 17-39.
- Escobar, L. (1993). *Villapinzón*. Villapinzón, Cundinamarca: Litográficas Mundial.
- Escobar, L. . (2004). *Villapinzón*.
- Fals Borda, O. (1975). *La historia de la cuestión agraria en Colombia*. Bogotá: Publicaciones La Rosca.
- Fischer-Kowalski, M. (1997). Society's Metabolism. On the Childhood and Adolescence of a Rising Conceptual Star. In Redclift, M., Woodgate, G. *The International Handbook of Environmental Sociology*. (pp. 119-137). Cheltenham: Edward Elgar.
- Fischer-Kowalski, M, & Weisz, H. (1999). Society as hybrid between material and symbolic realms. Toward a theoretical framework of society-nature interaction. *Advances in human ecology*, 8, 215-251.

- Fischer-Kowalski, M. (1998). Society's Metabolism: The Intellectual History of Materials Flow Analysis, Part I, 1860-1970. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1), 61-78.
- Fischer-Kowalski, Marina, & Haberl, H. (2007). *Socioecological Transitions and Global Change. Trajectories of Social Metabolism and Land Use*. Northampton, MA: Edward Elgar Publishing Limited.
- Fisher -Kowalski, M. (2011). Analyzing sustainability transitions as a shift between socio-metabolic regimes. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1, 152-159.
- Foster, J. (2000). *Marx's Ecology: Materialism and Nature*. Monthly Review Press.
- Gadgi, M., & Guha, R. (1992). *This Fissured Land: An Ecological History Of India*. Berkeley: University of California Press.
- Gerencia de Medio Ambiente. (2012). *Inventario de industrias municipio de Tocancipá*. Tocancipá: Municipio de Tocancipá.
- Giampietro, M, Mayumi, K., & Burkens, S. (2001). Multiple-scale integrated assessment of Societal metabolism: an analytical tool to Study development and sustainability. *Environment, Development and Sustainability*, 3, 275-307.
- Giampietro, M, Mayumi, K., & Martinez Alier, J. (2000). Introduction to the Special Issues on Societal Metabolism: Blending New Insights from Complex System Thinking with Old Insights from Biophysical Analyses of the Economic Process. *Population and Environment: A Journal of Interdisciplinary Studies*, 22(2).

- Giampietro, Mario, Mayumi, K., & Bukkens, S. (2001). Multiple scale integrated assesment of societal metabolism: An analytical tool to study development and sustainability. *Environment, development and sustainability*, (3), 275-307.
- Godelier, M. (1986). *The mental and the material: Thought economy and society*. London: Blackwell verso.
- Gonzalez de Molina, M. (2009). Sociedad, Naturaleza, Metabolismo Social. Sobre el estatus teórico de la historia ambiental. In Loreto. R. *Agua, poder urbano y metabolismo social* (Primera Edición.). Puebla, Mexico.
- González de Molina, M., & Guzmán Casado, G. (2007). Transición socio-ecológica y su reflejo en un agroecosistema del sureste español (1752-1997). *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 7, 55-70.
- Gual, M. . (2005). *Políticas de promoción de la energía renovable. Un modelo de análisis sistémico-coevolutivo* (Tesis Doctoral). Universidad Pablo de Olavide, España.
- Haberl, H., Fisher -Kowalski, M., Kraussman, F., Martínez Alier, J., & Winiwarter, V. (2009). A Socio-metabolic Transition towards Sustainability? Challenges for Another Great Transformation. *Sustainable Development*, 19, 1-14.
doi:10.1002/sd.410
- Herrera, M. (1992). *Determinación de fuentes puntuales de contaminación, informe final*. Bogotá, Colombia: Corporación Autónoma Regional.

- Hoekstra, A. ., & Chapagain, A. . (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water resource Management*, 21, 35-48. doi:10.1007/s11269-006-9039-x
- Holling, C. (2001). Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. *Ecosystems*, 4, 390 - 405. doi:10.1007/s10021-001-0101-5
- Holling, C. ., & Meffe, G. . (1996). Command and control and the pathology of natural resource management. *Conservation Biology*, 10(2), 328-337.
- IDEA-SWITCH. (2011). *Iniciativas ambientales en la cuenca alta del Rio Bogotá. Curtiembres de Villapinzón y Chocontá y manejo integral del agua en Tominé: Resultados del proyecto SWITCH "el manejo sostenible del agua en las ciudades del mañana."* Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Insuasty, T. (2008). *Prevalencia de síntomas depresivos en trabajadores de cultivos de flores de la Sabana de Bogotá con exposición ocupacional crónica a plaguicidas (herbicidas, fungicidas e insecticidas)*. Universidad Nacional de Colombia.
- Leff, E. (2007). *La complejidad ambiental: del logos científico al diálogo de saberes* (Red Colombiana de Formación Ambiental.). Bogotá D.C.
- Loreto, R. (2009). *Agua, poder urbano y metabolismo social*. Puebla, Mexico: Benemerita Universidad Autónoma de Puebls.

- Madrid, C, & Cabello, V. (2011). Re-opening the black box in Societal Metabolism: the application of MuSIASEM to water. Working Papers on Environmental Sciences.
- Madrid, C, Cabello, V., & Giampietro, M. (2013). Water-Use Sustainability in Socioecological Systems: A Multiscale Integrated Approach. *BioScience*, 63, 14-24.
- Madrid, Cristina, & Velazquez, E. (2008). El metabolismo hídrico y los flujos de agua virtual. Una aplicación al sector hortofrutícola de Andalucía (España). *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 8, 29-47.
- Marquez, G. (1998). Un enfoque de sistemas sobre la sostenibilidad. In Sachs, W. *La Gallina De Los Huevos De Oro, Debate Sobre El Concepto De Desarrollo Sostenible* (Vol. 1, pp. 90 - 101).
- Martínez Alier, J. (2003). Ecología industrial y metabolismo socioeconómico: concepto y evolución histórica. *Revista de Economía Industrial*, 351(Panorama General), 15-26.
- Martínez Alier, Joan. (2004). *MARXISM, SOCIAL METABOLISM, AND ECOLOGICALLY UNEQUAL EXCHANGE*. Class, Lund University, World Systems Theory and the Environment,.
- MAVDT. (2010). Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico en Colombia.
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *Limits to growth*. Boston: MIT Press.
- Meisel, A., & Ramírez, M. (2010). *Economía Colombiana del Siglo XIX*. Bogotá: Fondo de Cultura Económica.

- Mingorría, S., & Gamboa, G. (2010). *Metabolismo socio-ecológico de comunidades campesinas Q'eqchi' y la expansión de la agro-industria de caña de azúcar y palma africana: Valle del río Polochic, Guatemala*. Instituto de Ciencia y Tecnología ambientales - Uab, Instituto de Estudios Agrarios y Rurales - CONGCOOP.
- Municipio de Villapinzón. (2010). *Programa de ahorro y uso eficiente de agua*.
- Naredo, J. . (2009). *El agua virtual y la huella hidrológica en la Comunidad de Madrid*. Canal de Isabel II.
- Odum, E. (1973). *Fundamentals of ecology* (3 ed.). Philadelphia: Saunders.
- Odum, E. (1993). *Ecology and our endangered life-support systems*. Massachusetts: Sinauer Associated Inc.
- Odum, E., & Barrett, G. (2006). *Fundamentos de Ecología* (5 ed.). Cengage Learning Latin America.
- Ojeda, D. (2004). *Diagnóstico ambiental por vertimiento de residuos de curtiembres al río Bogotá en el corredor industrial Villapinzón - Chocontá cuenca alta del río Bogotá*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Pahl-Wostl, C. (2009). A conceptual framework for analysing adaptive capacity and multi-level learning processes in resource governance regimes. *GLOBAL ENVIRONMENTAL CHANGE*, 19, 354-365.
- Palacio, G., & Rouillon, M. (2008). La urbe modernizada: elementos para una historia ambiental de Bogotá (1920 - 1980). In

- Palacio, G (2008). *Historia Ambiental de Bogotá y La Sabana, 1805 - 2005*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Instituto Amazónico de Investigación IMANI.
- Purves, W., Orians, G., & Heller, H. (1992). *Life: The Science of Biology* (3 ed.). Sunderland, MA: Sinauer.
- Ringhofer, L. (2010). *Fishing, Foraging and Farming in the Bolivian Amazon: On a Local Society in Transition*. New York: Springer.
- Ruiz, M. (2008). Lineamientos para una historia agro-ambiental de la sabana de Bogotá (1850 - 1999). In Palacio, G (2008). *Historia Ambiental de Bogotá y La Sabana, 1805 - 2005*. Universidad Nacional de Colombia. Instituto Amazónico de Investigación IMANI.
- SENA-UNAL. (1994). *¿Hacia dónde va la Sabana de Bogotá? Modernización, conflicto, ambiente y sociedad*. Bogotá: Sección Publicaciones SENA.
- Sieferle, R. (2003). Sustainability in a World History Perspective. In B. Benzing & B. Herrmann (Eds.), *Exploitation and overexploitation in societies past and present* (pp. 123-142). Münster: LIT.
- Sieferle, R. . (1997). *Rückblick auf die natur: eine Geschichte des Menschen und seiner Umwelt (Lookingback at Natura; A history of Man and his environment)*. Munich, Germany Luchterhand.
- Steurer, A. (1996). Materials flow accounting and analysis: Where to go at an European level (pp. 217-219.). Presented at the

Proceedings of the Third Meeting of the London Group on Natural Resource and Environmental Accounting, Stockholm: Statistics Sweden.

Tello, E., Cussó, X., & Olarieta, J. R. (2008). Sobre la sostenibilidad de los sistemas agrarios. Balances de nutrientes y sistemas de fertilización en la agricultura catalana a mediados del siglo XIX. Presented at the Congreso de Historia Agraria, Córdoba, España.

Tello, E., Garrabou, R., & Cussó, J. (2003). Tras las huellas ecológicas del metabolismo social: Una propuesta metodológica para analizar el paisaje como humanización del territorio (pp. 1-25). Presented at the III Seminario sobre evolución del territorio como punto de encuentro transdisciplinar, organizado por la Universidad de las Islas Baleares, Palma de Mallorca.

Toledo, V, & González de Molina, M. (2007). El metabolismo social. Las relaciones entre la sociedad y la naturaleza. In *La Perspectiva Ambiental en las Ciencias Sociales*. Barcelona: Editorial Icaria.

Toledo, V, & González de Molina, M. (2011). *Metabolismo, naturaleza e historia Hacia un teoría de las transformaciones socioecológicas*. Barcelona: Icaria editorial.

Toledo, Víctor. (2008). Metabolismos rurales: hacia una teoría económico-ecológica de la apropiación de la naturaleza. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*, 7, 1-26.

- Vallejo, M. C. (2010). *Perfiles metabólicos de tres economías andinas: Colombia, Ecuador y Perú* (PhD Thesis). Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales (FLACSO) - Sede Ecuador, Quito.
- Van der Hammen, T. (1998). Plan Ambiental de la Cuenca Alta del Río Bogotá, análisis y orientaciones para el ordenamiento territorial. Corporación Autónoma Regional (CAR) de Cundinamarca.
- Vargas, C. (1983). *Determinación de la carga contaminante de las industrias del curtido en el área de Villapinzón*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Velazquez, E. (2008). El agua virtual y el metabolismo hídrico: Un instrumento para gestionar los recursos hídricos. In *Aportes para una estrategia ambiental alternativa: Indicadores de sustentabilidad y políticas ambientales*. Ecuador.
- Walker, B., Carpenter, S., Anderies, J., Abel, N., Cumming, G., Janssen, M., ... Pritchard, R. (2002). Resilience Management in Social-ecological Systems: a Working Hypothesis for a Participatory Approach. *Conservation Ecology*, 6(1), 14.
- Zambrano, F., Gutierrez, E., & Vargas, J. (2009). *Historia de Bogota: Conquista y colonia, Siglo XIX, Siglo XX*. Villegas Editores S.A.