



Modelación y Simulación Dinámica para la Gestión de Caudales en la Cuenca Alta del Río Pamplonita - Un Balance Hídrico de Consumo-

Fernández N¹, Suárez C A¹, Pérez E A¹

¹ Centro de Investigaciones en Hidroinformática, Universidad de Pamplona.

Email: nfernandez@unipamplona.edu.co;hidroinformatica@unipamplona.edu.co

ABSTRACT

Water management Decision-Making, is a task that could be supported with a solid scientific base. Dynamic system modeling is an effective and an alternative to respond to this challenge and an effective communication tool among technicians, managers and stakeholders. In this context, three dynamic models for the water management of the Pamplonita River Basin was developed on the basis of 2004 water use legal rules by regional environmental agency-CORPONOR for the sub-basins El Volcán and Monteadentro, and the data from the National Statistics Department-DANE for water demand and population trends in Pamplona N. S., as well. From these models it was possible to carry out several simulations for these two cases. First of all, flow increments about 10% and 30% for the 219 users showing that these conditions are not adequate to maintain water supply and ecological flows. Secondly, the offer and water supply model for the population of the city in 2025, showed water scarcity in 2012. As an answer to this fact, several possible scenes were simulated in order to find the optimal conditions to maintain the water supply until 2045.

KEY WORDS

Dynamic systems, Discharge Managenmet, Water Supply Modelling, **Vensim**, Hydroinformatics.

RESUMEN

La toma de decisiones acerca de la gestión integral del agua, es una tarea que debe estar respaldada en una base científica sólida. Para responder a este reto, la modelación de sistemas dinámicos se convierte en una alternativa efectiva de comunicación entre los técnicos, administradores y usuarios del recurso en general. En este contexto, se desarrollaron tres modelos dinámicos para la gestión del agua en la cuenca Alta del Río Pamplonita, soportados tanto en la reglamentación de la corporación ambiental regional-CORPONOR en cuanto al uso del agua en las microcuencas El Volcán y Monteadentro en el año 2004, como en los datos de consumo de agua y proyección poblacional de la ciudad de Pamplona por parte del departamento nacional de estadística-DANE. A partir de ellos fue posible, para el primer caso, establecer 2 escenarios prospectivos de demanda de agua en las



microcuencas, correspondientes a incrementos del 10 y 30% para los caudales asignados a 219 usuarios, que demostró la no suficiencia del caudal base para mantener tanto, los caudales de abastecimiento de los usuarios de la microcuenca, del acueducto y el caudal ecológico en ninguno de escenarios. Para el segundo caso, el modelo de oferta y abastecimiento de agua para la población proyectada a 2025 mostró que de no tomarse diferentes contingencias el agua en la ciudad alcanzará su límite en el año 2012. Como respuesta a ello, se simularon diferentes escenarios que revelaron, que con la previsión adecuada es factible lograr abastecimientos de agua potable hasta aproximadamente el año 2045.

PALABRAS CLAVES

Sistemas Dinámicos, Gestión de Caudales, Modelos de Abastecimiento, Vensim, Hidroinformática.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la Gestión del Recurso Hídrico requiere del desarrollo de herramientas que soporten la toma de decisiones informada sobre una base científica sólida, como respuesta a las necesidades y situaciones cambiantes sector. Estas herramientas de apoyo a la gestión del recurso, deben contar con la suficiente flexibilidad para abordar los retos hídricos y optimizar la contribución del agua al desarrollo sostenible. Lo anterior tiene como propósito, producir información consistente y comparable que sea la base del proceso de toma de decisiones y que permita una mejor administración del agua, especialmente en aspectos como la prevención de situaciones que atenten contra la integridad humana y de los ecosistemas.

Lo anterior toma mayor importancia al considerar el mecanismo del flujo de decisiones, que regularmente toma lugar y que se observa en la figura 1a, en contraste tanto con el enfoque ver-prever-decidir, que aplica regularmente el IDEAM para fines de pronóstico hidrológico (Fig 1b), como con la concepción del Centro de Hidroinformática de la Universidad de Pamplona, (CIH) (Fig 1c).

Así, la aplicación de un correcto flujo en la toma de decisiones, conduce a la cadena lógica de *Dato -> Análisis -> Información -> Conocimiento -> Toma de Decisión*, en la que

el conocimiento se considera la base fundamental de nuestra sociedad de hoy.

Como se puede desprender de la Figura 1c, la contribución que las ciencias computacionales pueden tener la solución de problemas complejos referidos a la calidad y cantidad del agua, se ha constituido como una alternativa de gran importancia en la toma de decisiones informada y en la producción de conocimiento. Precisamente, la aplicación de estas ciencias a la eco-hidrología ha derivado en un marco de trabajo colaborativo e interdisciplinario de investigación, que a su vez ha dado origen al paradigma de la *Hidroinformática* (Abbot, 1991). Sobre esta base disciplinar, actualmente, existe la oportunidad de desarrollar sistemas de información computacionales desarrollados bajo el enfoque sistemas dinámicos y de inteligencia artificial, que pueden ser integrados con herramientas WEB, tecnologías de automatización y control, y tecnologías telemáticas

Sin embargo, en el ámbito colombiano, acciones que consideren el establecimiento de este tipo de sistemas de información, son escasos. Tal es el caso de la Cuenca Alta del Río Pamplonita, en la que a pesar del interés de diferentes sectores por la protección del agua, existe incertidumbre en cuanto a su

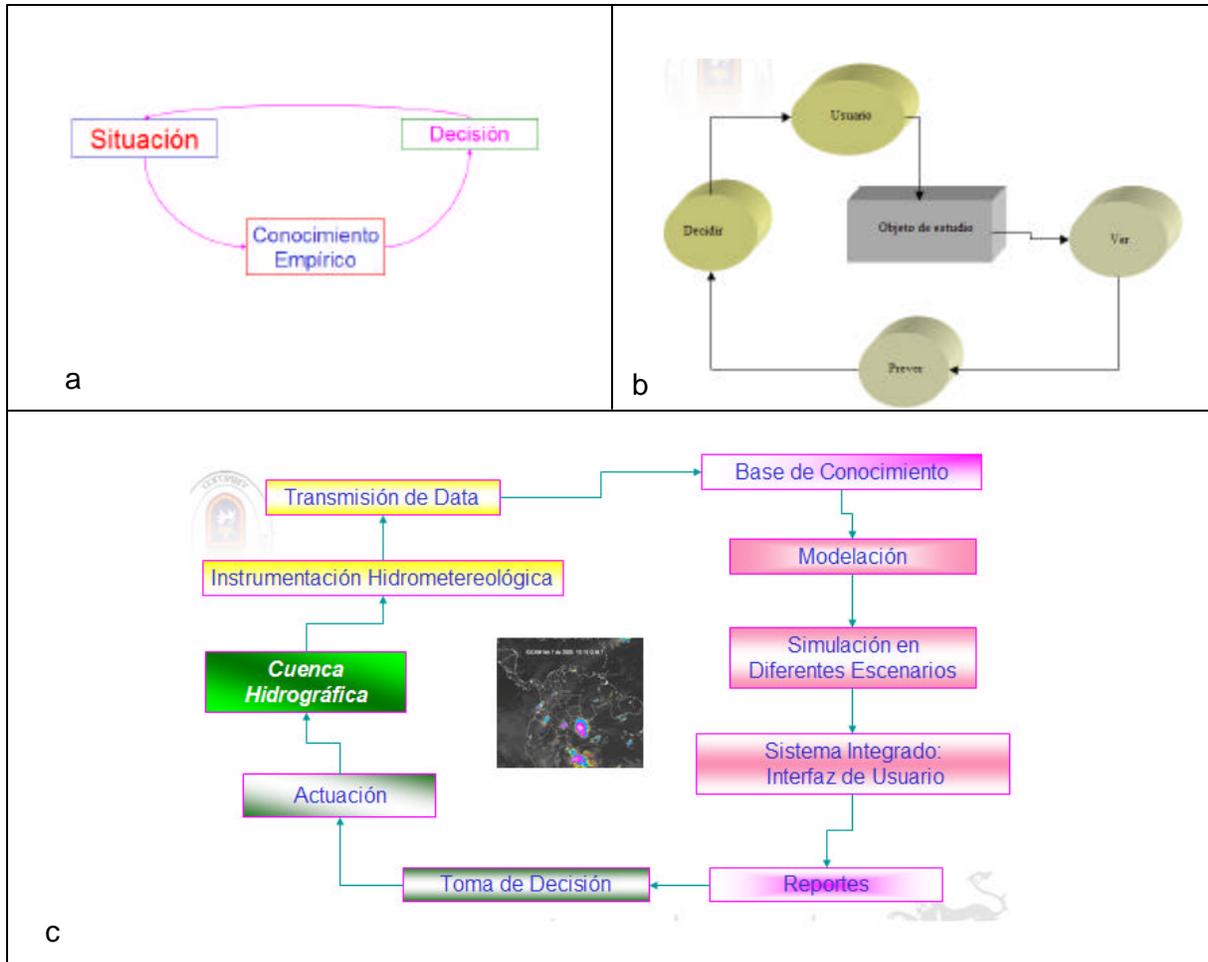


Figura 1. Prototipos de Flujo de Toma de Decisiones. **a. Empírica; b. Flujo del IDEAM; c. Propuesta CIH.**

disponibilidad en calidad y cantidad en años futuros, en razón a su creciente número de sus pobladores, actividades económicas y aspectos de tipo sociocultural.

Situaciones como las anteriores pueden ser abordadas de manera adecuada a través del enfoque de la *teoría de los sistemas dinámicos*, establecida por el Profesor J.W. Forrester en el instituto tecnológico de Massachussets (MIT) como un conjunto de herramientas que representan la estructura de sistemas complejos, así como el análisis de su comportamiento (Fan, et al., 2007). El rasgo mas importante de los sistemas dinámicos, consiste en elucidar la estructura endógena del sistema en cuestión, para describir las relaciones de los elementos del sistema y experimentar con el cambio en las

relaciones dentro del mismo, cuando diferentes decisiones son incluidas (Forrester, 1961). Las relaciones, son descritas por medio de mecanismos causales e influencias sobre las entidades del sistema (Word y Shelly, 1999), a través de variables de tipo nivel y tasas, que constituyen la base matemática del modelo, normalmente expresados en ecuaciones diferenciales o de diferencia. Un tercer tipo de variable son las auxiliares, entendidas como medios por los cuales la información asociada con los estados actuales del sistema (niveles), es transformada en tasas que conducen a cambios futuros en el tiempo (Guo, et al., 2001). Es de resaltar, que el sistema puede ser completamente representado en razón de sus procesos físicos, químicos y biológicos, de manera que este tipo de modelación es ideal para



representar sistemas ecológicos. Por otra parte, de acuerdo con Randers (1996), la modelación dinámica sigue los pasos generales de modelación de conceptualización, formulación, prueba y validación, e implementación. Cabe destacar que el mayor esfuerzo de este enfoque, está en los 3 primeros pasos, con los que se asegura que las relaciones y los mecanismos causales fueron correctamente representados antes de la implementación.

En este contexto, el Centro de Investigaciones en Hidroinformática de la Universidad de Pamplona, abordó con un enfoque de sistemas dinámicos, el estudio del balance hídrico en las cuencas abastecedoras del acueducto municipal de la ciudad de Pamplona, acorde con las proyecciones poblacionales hasta alcanzar la capacidad máxima de los caudales, es decir la oferta límite. A partir de los resultados aquí explícitos, se espera brindar información a los tomadores de decisión, que permita que el agua en la Cuenca del Alta del Río Pamplonita, se desarrolle y administre de forma equitativa y sea utilizada para promover las metas sociales y económicas de desarrollo a mediano y largo plazo, sin que se comprometa la sustentabilidad de los ecosistemas vitales que intervienen en su ciclo,

ni perjudique la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus necesidades de agua.

2 ASPECTOS METODOLÓGICOS

2.1 Descripción del Área

El área de estudio correspondió a las microcuencas El Volcán y Monteadentro (Fig. 2), así como al casco urbano de la ciudad de Pamplona, las cuales están ubicadas en la cuenca del río Pamplonita que se encuentra sobre la Cordillera Oriental de Colombia, al Sureste del Departamento de Norte de Santander, entre las coordenadas planas X1-300.000 a X2-420.000 y Y1-150.000 a Y2-190.000, y las coordenadas geográficas 72°25 a 72°45 de Longitud Oeste y 7°20 a 8°25 de Latitud Norte. (CORPONOR, 2004)

2.1.1 Microcuenca El Volcán

La microcuenca El Volcán o El Rosal hace parte de la Cuenca alta del Río Pamplonita, se encuentra ubicada al Sur-Occidente del casco urbano del municipio de Pamplona, entre las coordenadas planas X_1 -1'303.500 a X_2 -1'306.500 y Y_1 -1'151.800 a Y_2 -1'156.000. (Acosta et al 2003)

Considerada hoy como área estratégica, sus aguas fluyen hacia el noreste para conformar

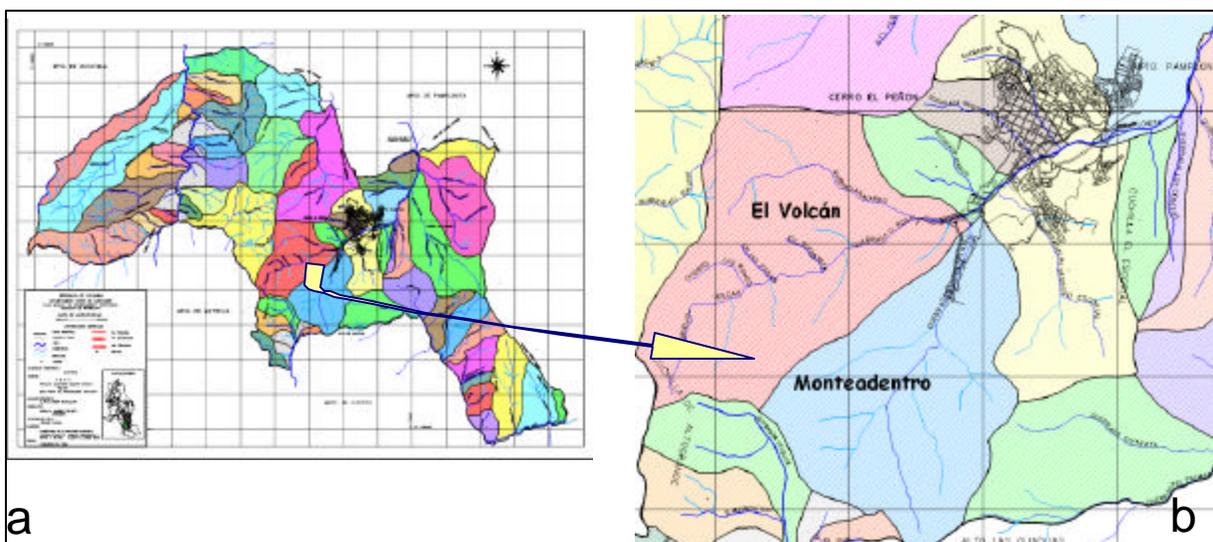


Figura 2 Área de Estudio. a. Mapa general del municipio de Pamplona. b. detalle de las microcuencas el Volcán y Monteadentro.



junto con la Quebrada Monte dentro el Río Pamplonita a los 2.340 msnm. En su recorrido de 6.35 Kms tiene como afluentes principales la Quebrada Navarro, Quebrada Los Monos, Quebrada La Despensita, Quebrada Agua Blanca, Quebrada Chinchipa, Quebrada El Salto, Chorro de Buena Vista y Chorro El Zanjón del Mortiño, creando una red hidrográfica con diversidad de paisajes y condiciones topográficas y climatológicas típicas de la zona alta andina.

El área aproximada de la microcuenca es de 10.6 Km² abarcando un perímetro de 17.25 Km. (CORPONOR, 2004)

La Microcuenca EL Volcán esta compuesta por las veredas: El Rosal, El Totumo, Alto Grande, Navarro, Jurado y el barrio El Zulia, la población reportada para el año 2003 correspondió a una población de 279 habitantes distribuidos en 52 familias. (Acosta et al 2003).

De acuerdo al ordenamiento de ríos planteado por R. E. Horton, la cuenca presenta las siguientes características hidrográficas:

- Numero de orden: 3
- Relación de bifurcación: 4,5
- Relación de longitud: 8,33
- Densidad de drenaje: 17,22 m/ha
- Pendiente promedio de la quebrada: 20,26%

La zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-Mb) se encuentra entre los 2.000 a 2.800 msnm, de clima frío, con un rango de temperatura entre los 12 y 17 °C, con una precipitación anual entre 1.000 y 2.000 mm. Esta zona de vida se extiende a lo largo de 175 Ha, que representa el 24,14% del total de área de la microcuenca.

La zona de vida Bosque Húmedo Montano (bh-M) se encuentra entre los 2.800 y 3.800 msnm, de clima muy húmedo sub-páramo, con un rango de temperatura entre los 6 y 12 °C, y con precipitación anual entre 500 y 1000 mm. Esta zona de vida se extiende a lo largo de 550 Has, lo que representa el 75,86% del total del área de la microcuenca.

En los suelos de la microcuenca de la Quebrada El Volcán o El Rosal predomina la ganadería en mayor porcentaje que la agricultura; sin embargo, entre los productos agrícolas que mas se cultivan esta la arveja, zanahoria, cebolla de hoja, frijol, maíz, papa, trigo, curaba, mora y arracacha.

2.1.2 Microcuenca Monte dentro

La microcuenca Monte dentro hace parte de la Cuenca alta del Río Pamplonita, se encuentra ubicada al Sur del casco urbano del municipio de Pamplona, entre las coordenadas planas X₁-1.301.300 a X₂-1.306.400 y Y₁-1.153.800 a Y₂-1.157.600. (Acosta et al 2003)

La Microcuenca Monte dentro nace al Sur Oriente de la región del municipio de Pamplona Norte de Santander a 3.200 msnm. Es un nacimiento denominado El Chorro de las Pavas ubicado en la finca Las Pavas, sus aguas fluyen hacia el noreste para conformar junto con la Quebrada El Volcán el Río Pamplonita a los 2.340msnm. En su recorrido de 5.2 Kms tiene como afluentes principales la Quebrada Teorema, Quebrada Cepeda, Quebrada Cerrajones, Quebrada Piñuelal y Quebrada La Corcova, creando una red hidrográfica con diversidad de paisajes y condiciones topográficas y climatológicas típicas de la zona andina.

El área aproximada de la microcuenca es de 9.8 Km² abarcando un perímetro de 15.8 Km. (CORPONOR, 2004).

La Microcuenca Monte dentro esta compuesta por una vereda de su mismo nombre, la población reportada para el año 2003 correspondió a una población de 378 habitantes distribuidos en 82 familias. (Acosta et al 2003)

De acuerdo al ordenamiento de ríos planteado por R. E. Horton, la cuenca presenta las siguientes características hidrográficas:

- Numero de orden: 3
- Relación de bifurcación: 4,25
- Relación de longitud: 3,07
- Densidad de drenaje: 20,34 m/ha



- Pendiente promedio de la quebrada:
13,36%

La zona de vida Bosque Húmedo Montano Bajo (bh-Mb) se encuentra entre los 2.000 a 2.800 metros sobre el nivel del mar, de clima frío, con un rango de temperatura entre los 12 y 17 °C, con una precipitación anual entre 1.000 y 2.000 mm. Esta zona de vida se extiende a lo largo de 485 Has, que representa el 43.69% del total de área de la microcuenca.

La zona de vida Bosque Húmedo Montano (bh-M) se encuentra entre los 2.800 y 3.800 msnm, de clima muy húmedo sub-páramo, con un rango de temperatura entre los 6 y 12 °C, y con precipitación anual entre 500 y 1000 mm. Esta zona de vida se extiende a lo largo de 625 Has, lo que representa el 56.31% del total del área de la microcuenca.

En los suelos de la microcuenca de la quebrada Monteadentro o Cariongo predomina la agricultura en mayor porcentaje que la ganadería; entre los productos agrícolas que mas se cultivan esta la cebolla de hoja, frijol, maíz, papa, trigo, curaba, mora y arracacha.

2.2 Modelación

2.2.1 Información Base para el Modelado

La información base para el modelado la constituyó la reglamentación de las microcuencas Volcán y Monteadentro, realizada por la Corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental-CORPONOR en el año 2004 para un total de 219 Usuarios (Resolución 0683 del 27 de Diciembre de 2004). Esta reglamentación tuvo como soporte los usos y cantidades previstos presentados en la tabla 1,

así como la asignación de un caudal ecológico del 15% del caudal promedio correspondiente a 15.3 l/s para Monteadentro y 16.46 l/s para el sistema de El Volcán

A partir de esta reglamentación fue posible establecer el número de usuarios, actividades agrícolas desarrolladas, el cálculo de la demanda de cada uno de los usuarios, y la derivación los respectivos caudales, que alimentaron los diferentes modelos desarrollados.

2.2.2 Plataforma para la construcción del modelo

El modelo fue construido vía Vensim®, un software para la modelación dinámica de sistemas, de manera que todas las ecuaciones, parámetros, coeficientes, y factores fueron simplificados a través de cálculos conducidos por Vensim®.

2.2.3 Arquitectura del Modelado

El modelado consideró 3 casos, a saber, dos modelos que integraron la red hidrológica tanto de la microcuenca El Volcán y Monteadentro; y el modelo para abastecimiento que relacionó la ofertas y demandas totales de usuarios en las microcuencas y el casco urbano, en contraste con la dinámica poblacional de la ciudad.

2.2.3.1 Microcuencas El Volcán y Monteadentro.

Para efectos prácticos, a continuación se presenta la forma genérica la relación básica de modelación para las microcuencas objeto de estudio, que estuvo dada por balances de masa en las quebradas y afluentes principales, que relacionaron la oferta y la demanda en el curso específico (Fig. 3, Ec. 1).

Tabla 1 Criterios Para la Distribución de Caudales en Microcuencas El Volcán y Monteadentro

CONSUMO	REQUERIMIENTO	LITROS / DÍA
Humano	0.0011574 Lts. /seg.	100 Litros / Personas / Día
Escuela / Colegios	0.0005767 Lts. /seg.	50 Litros / Alumno / Día
Ganado	0.0003472 Lts. /seg.	30 Litros / Cabeza / Día
Aves	0.0001736 Lts. /seg.	10 - 15 Litros / 100 aves / Día
Piscicultura: 100 Kg./Peso vivo	5 Lts. /seg.	432.000 Litros / Día
Cultivos varios piso térmico frío	0.25 Lts. /seg. / Ha	21.000 Litros / Hectárea / Día



Figura 3 Esquema General de Modelado para las Microcuencas

La forma de expresión de este balance de masa fue dada por una ecuación diferencial, que describió la tasa de cambio de la variable caudal en un determinado tiempo (ecuación 1).

$$\frac{dQ}{dt} = f(Q, t) \quad \text{Ec.1}$$

Donde Q significa el caudal en l/seg y $f(Q, t)$ es la fórmula de la que depende el caudal en el tiempo y que en contexto fue entendida como:

$$\frac{dQ}{dt} = Q_{\text{afuentes}} - Q_{\text{demand}} = 0 \quad \text{Ec.2}$$

Cabe destacar que este balance se igualó a cero, debido que el sistema presenta un equilibrio entre los caudales asignado a la demanda y la oferta neta, la cual ya tiene descontado el caudal ecológico. Lo anterior se interpreta como que la tasa de cambio de la variable caudal es cero. Así, desde las consideraciones anteriores, fue posible establecer las relaciones para la respectiva red hídrica de cada microcuenca (Anexo 1 a 4).

- Escenarios de Simulación para los Caudales Asignados en la Microcuenca

Los escenarios planteados correspondieron a incrementos en la asignación a cada uno de los usuarios de las microcuencas, hasta alcanzar niveles que sobrepasaron la oferta y que correspondieron a aumentos del 10 y 30%.

2.2.3.2 Arquitectura del Modelo Para Abastecimiento de la Ciudad de Pamplona

Este modelo consideró la información consolidada de la oferta de caudales de cada una de las microcuencas; el caudal ecológico del 15%; el caudal tomado por las bocatomas del acueducto, al igual que las captaciones de adicionales; el consumo per-cápita; la dinámica poblacional dada por los nacimientos y defunciones, en contraste con la tasa de mortalidad y la esperanza de vida (Fig 4).

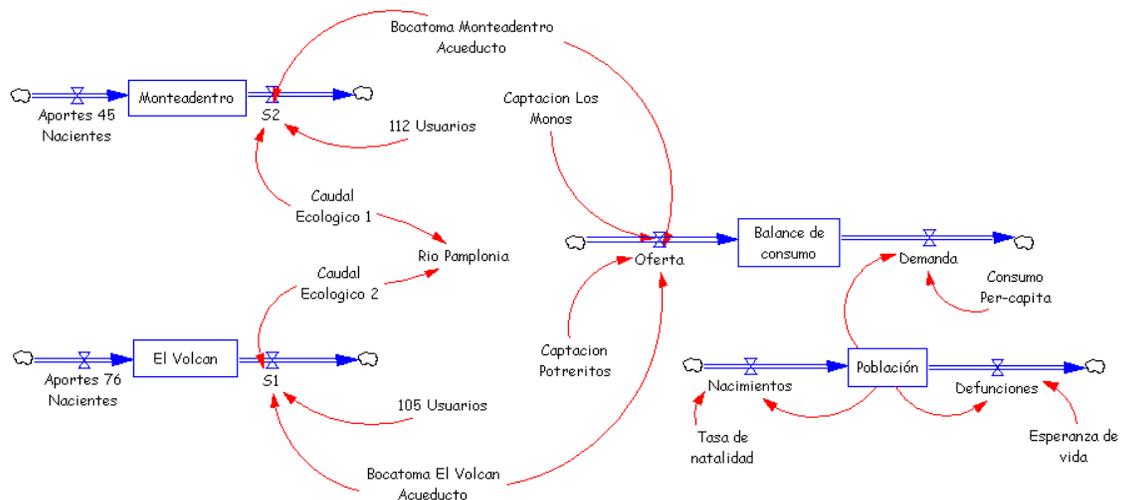


Figura 4 Modelo Relacional para el Abastecimiento de Agua Potable en la Ciudad de Pamplona



- **Sistemas de ecuaciones**

El sistema de ecuaciones estuvo compuesto por un total de 23, las que se listan a continuación:

- (01) «105 Usuarios»= 2825.28 Unid: m3/dia
- (02) «112 Usuarios»= 2878.85 Unid: m3/dia
- (03) Aportes 45 Nacientes= 9478.08 Unid: m3/dia
- (04) Aportes 76 Nacientes= 8812.8 Unid: m3/dia
- (05) Balance de consumo= Oferta-Demanda Unid: m3/dia
- (06) Bocatoma El Volcan Acueducto= 4320 Unid: m3/dia
- (07) Bocatoma Monte dentro Acueducto= 5184 Unid: m3/dia
- (08) Captacion Los Monos= 1296 Unid: m3/dia [0,1728,0.1]
- (09) Captacion Potreritos= 1296 Unid: m3/dia [0,1728,0.1]
- (10) Caudal Ecologico 1= 1415.23 Unid: m3/dia
- (11) Caudal Ecologico 2= 1667.52 Unid: m3/dia
- (12) «Consumo Per-capita»= 0.167 Unid: m3/hab-dia [0,200,0.5]
- (13) Defunciones = Población/Esperanza de vida Unid: **undefined**
- (14) Demanda = Población*»Consumo Per-capita» Unid: m3/hab-dia

- (15) El Volcan= Aportes 76 Nacientes-S1 Unid: m3/dia
- (16) Esperanza de vida= 80 Unid: años [0,80]
- (17) TIEMPO FINAL = 2025 Unid: Year.
- (18) TIEMPO INICIAL = 2007 Unid: Year.
- (19) Monte dentro= Aportes 45 Nacientes-S2 Unid: m3/dia
- (20) Nacimientos= Población*Tasa de natalidad Unid: Nacimientos
- (21) Oferta= Captacion Potreritos+Captacion Los Monos+Bocatoma Monte dentro Acueducto+ Bocatoma El Volcan Acueducto. Unid: m3/(dia*hab)
- (22) Población= INTEGRAL ((+Nacimientos-Defunciones),66439) Unid: personas/año
- (23) Rio Pamplonita= INTEGRAL (Caudal Ecologico 1+Caudal Ecologico 2, 3082.75) Unid: m3/dia

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN

3.1. Aumentos de la Asignación de Caudales en Microcuencas El Volcán y Monte dentro

De acuerdo con las simulaciones realizadas, se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 2, en la que se observa en primera instancia que para la microcuenca Monte dentro, CORPONOR, asignó el total del caudal disponible, en tanto que en El Volcán se dejó un pequeño de excedente de 4 l/s, lo cual daría un margen para una mayor utilización en épocas de estiaje.

Tabla 2 Simulaciones del Incremento en la Asignación de Caudales

Caudales	Fuente	
	Monte dentro (Q l/s)	El Volcán (Q l/s)
1. Caudal base	109.7	102
2. Caudal ecológico (15%)	16.38	19.3
3. Caudal disponible	93.24	87.6
4. Caudal Asignado a Usuarios microcuencas	33.24	33.6
5. Caudal Asignado a Bocatoma	60	50
6. Excedente (a caudal ecológico)	0.00	4.00
Proyecciones de los Aumentos		
- 10%	102.4	91.96
1. Déficit	9.16	8.36
2. Caudal Ecológico Remanente (%)	7.22 (6.58%)	10.94 (10.72%)
- 30%	121	108.68
- Déficit	27.76	25.08
- Caudal Ecológico Remanente (%)	-11.38 (-10.37%)	-5.78 (-5.66%)



Consecuentemente, es observable que en época de estiaje, proyecciones de aumentos de asignación del 10% para las dos microcuencas, resultaría en la necesidad de disminuir el caudal ecológico del 15 al 6.58% en la microcuenca el Volcán y equivalente a 7.22 l/s en la Q. Monteadentro. Debido al excedente de 4 l/s que presenta la Q El Volcán, este valor puede ser acumulado al caudal ecológico registrado en la tabla 2, que para el caso, no sería del 15% si no del 18.92%. De esta forma, las proyecciones de aumentos de asignación del 10% para esta microcuenca resultaría en la necesidad de disminuir el caudal ecológico del 18.92 al 10,72%, es decir 10.94 l/s.

Por su parte incrementos mayores y específicamente del 30% no permitirían mantener caudales ecológicos en ambos sistemas.

En este aspecto, la pregunta obligada sería si el caudal del 15%, es suficiente para preservar los valores ecológicos de la cuenca alta del río Pamplonita, como los habitats naturales, la dilución de contaminantes como pesticidas, la amortiguación de extremos climatológicos e hidrológicos, además de la preservación del paisaje. Accesoriamente, es cuestionable, si los caudales asignados podrían mantener la

“Integridad Ecológica” de la Cuenca Alta, es decir si estos caudales permitirían mantener la capacidad de las quebradas Monteadentro y El Volcán, con fines de soportar y mantener su balance, integratividad y adaptabilidad biofísica al contemplar el rango completo de elementos y procesos esperados en el hábitat natural de la cuenca alta del río Pamplonita (Karr, 2002; Huang, et al., 2006).

La respuesta a esta pregunta, derivaría de manera directa en la necesidad de establecer los correspondientes indicadores biológicos de integridad ecológica para la cuenca alta del río Pamplonita, como *biocriterio integral* para la toma de decisiones y planeación. En este aspecto, se aclara que un biocriterio, se define como el umbral biológicamente basado en estándares de calidad del agua para evaluar la salud de los cuerpos de agua (Adler, 1995).

3.2. Proyección del Abastecimiento de Agua Potable para la Ciudad de Pamplona

Las tendencias obtenidas para la población de la ciudad de Pamplona en contraste con la demanda, así como el balance de consumo producto de modelación y simulación, se relacionan en la figura 6.

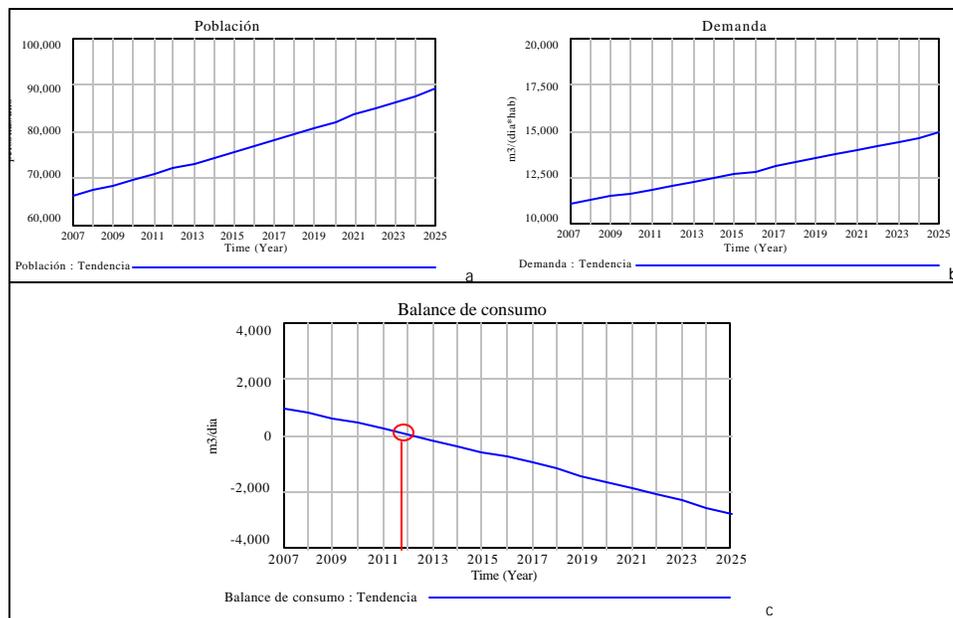


Figura 5 Tendencias Poblacionales (a), de demanda (b), balance del consumo (c) al año 2025.



A partir de las anteriores proyecciones se sugiere que el punto de equilibrio entre la oferta de las fuentes de agua actuales, se alcanzaría en el año 2012, a partir de allí se daría lugar a un déficit importante que se haría más severo en el año 2015, como se observa de manera detallada en la tabla 3.

Tabla 3 Proyecciones a Partir de la Modelación Dinámica

Año	Población (Hab)	Demanda (m ³ /día)	Balance (m ³ /día)
2007	66.439,0	11.095,3	1.000,69
2008	67.535,2	11.278,4	817,62
2009	68.649,6	11.464,5	631,52
2010	69.782,3	11.653,6	442,36
2011	70.933,7	11.845,9	250,07
2012	72.104,1	12.041,4	54,62
2013	73.293,8	12.240,1	-1.44,067
2014	74.503,2	12.442,0	-3.46,029
2015	75.732,5	12.647,3	-5.51,323
2016	76.982,1	12.856,0	-7.60,004
2017	78.252,3	13.068,1	-9.72,128
2018	79.543,4	13.283,8	-1.187,75
2019	80.855,9	13.502,9	-1.406,93
2020	82.190,0	13.725,7	-1.629,73
2021	83.546,2	13.952,2	-1.856,21
2022	84.924,7	14.182,4	-2.086,42
2023	86.325,9	14.416,4	-2.320,43
2024	87.750,3	14.654,3	-2.558,30
2025	89.198,2	14.896,1	-2.800,10

Lo anterior guarda relación con los datos calculados por el DANE, a partir de los cuales fue posible obtener dos modelos regresivos ($r^2 > 0.99$), el primero para la tendencia de la demanda y el segundo crecimiento poblacional (fig. 6), y de los cuales se extracta que para los próximos años la población en la ciudad de Pamplona, crecerá a una tasa de 1.387,2 personas por año, quienes demandarán a su vez 232,76 m³ adicionales por año.

De acuerdo con estos dos últimos modelos, el tope máximo de los 12.096 m³/día se alcanzarían en el año 2010 (Fig. 6b, cruce de líneas), un poco antes que lo establecido en el modelo dinámico. Sin embargo, por este medio también se confirma la delicada situación del recurso hídrico en la ciudad de Pamplona.

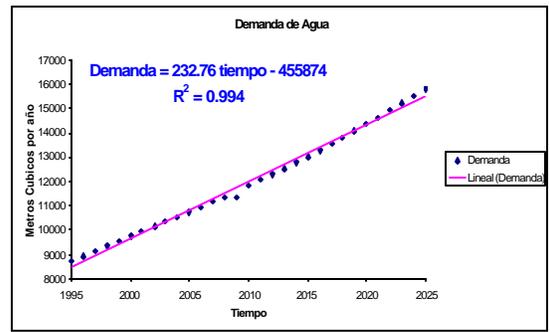
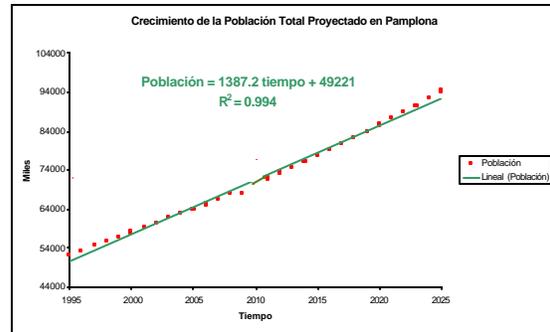


Figura 6 Modelos de Regresión para la Población y Demanda de Agua en Pamplona de acuerdo con los datos del DANE (2006).

3.3 Simulación del Abastecimiento en Diferentes Condiciones

Desde la situación anterior derivada de la modelación dinámica, surgen preguntas de cómo el recurso hídrico podría ser suficiente para la creciente población de Pamplona, hasta el año 2025. Entre las alternativas obvias estarían por separado, (1) El incremento de las captaciones de acuerdo con la oferta de las fuentes abastecedoras; (2) la disminución de la dotación o consumo per-capita; (3) la regulación de la población en cuanto a la tasa de natalidad; (4) buscar fuentes alternativas para aumentar la oferta; y (5) conjugar las anteriores medidas.

Como respuesta a los anteriores respectos, la simulación arrojó los siguientes resultados:

- (1) El incremento de cada una de las captaciones de poteritos y el mono debería estar en el orden de 32 l/s, lo



cual dejaría un pequeño excedente de 135 m³/día para el año **2025**. Sin embargo, este hecho no sería posible dado los caudales promedios, aproximadamente de 28 l/s para potreros y 23 l/s para el mono, así como del caudal ecológico que permitiría que tan solo se pudiesen tomar 23,8 l/s y 19,55 l/s respectivamente. Tal situación, deriva en que con esta *oferta máxima*, solo se podría sostener la demanda para la población creciente hasta el año **2018** (Fig. 7). Adicionalmente, se debería considerar que la demanda en las microcuencas El Volcán y Monteadentro se sostendrían en las condiciones especificadas por la reglamentación actual de CORPONOR, o en su defecto, que la compra de predios mantendría la posibilidad de extraer por lo menos el mismo caudal.

excedente de 114,49 a un déficit de 83,27 m³/día (Fig. 8). Tal consumo estaría de acuerdo con el RAS 2000 (CRA, 2005), para municipios como Pamplona, catalogados como de complejidad Media-Alta, en los que la dotación neta mínima por persona al día debe ser de 130 l/hab-día. Para reducir el nivel de consumo a este valor, se debería indudablemente implementar tecnologías adecuadas de consumo de agua, como sanitarios de menor capacidad, válvulas temporizadoras para lavado de manos, restricción de tiempos en duchas, recirculación del agua gris o jabonosa, el no lavado de carros o andenes con agua potable, el ahorro en los procesos industriales, entre otros. Se aclara, que para hacer posible todo esto debe lograrse en un contexto de cultura ciudadana, que de manera obligada debería comenzar desde este instante.

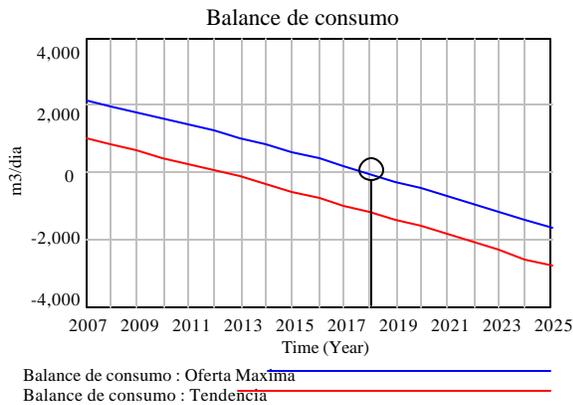


Figura 7 Simulación del incremento de captación en Q. Potreros y el Mono (En el círculo punto de equilibrio).

- (2) En cuanto al consumo per-capita, al partir del nivel para el año 2007 de 167 l/hab-día, se debería reducir a 130 l/hab-día, para el año 2025 se tendría un excedente de 500,23 m³/día y el límite se alcanzaría entre los años 2027 y 2028 en los que se pasaría de un

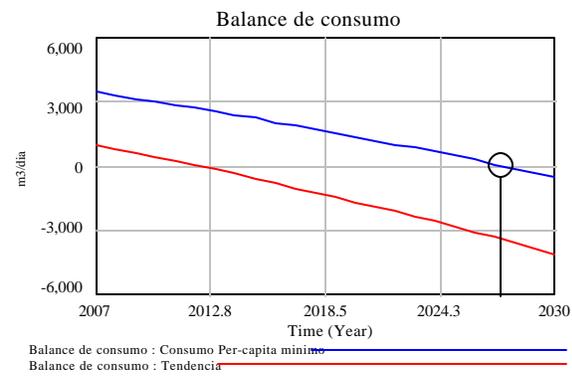


Figura 8 Simulación del Decremento del Consumo Per-capita

- (3) En la actualidad la población de presenta una tasa de natalidad del 2,9%, de manera que para efectos de sostener la compatibilidad entre oferta y demanda de agua, esta se debería reducir al 1,7%, (es decir 17 nacimientos por cada mil personas) para que en el año 2025 se contara con un excedente de 66,75 m³/día y entre el 2026 y 2027 se pasara de



12,62 a -41,75 m³/día (Fig 9). Para tal fin, se deberían implementar los consecuentes contingencias de educación sexual, planificación familiar y salud reproductiva, sobre todo entre el estudiantado.

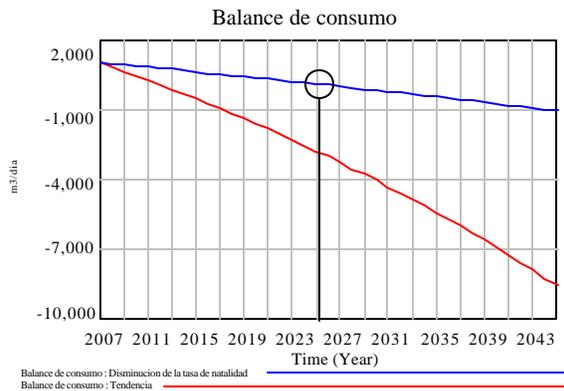


Figura 9 Simulación de la disminución de la tasa de natalidad

- (4) En relación a la búsqueda de fuentes alternativas de abastecimiento, se debería identificar fuentes con capacidad mínima de 20 l/s, con lo cual se alcanzaría el abastecimiento de los casi 90.000 habitantes que se esperan para el 2025 (fig. 10). Este evento tendría como supuesto que las otras captaciones estarían al máximo.

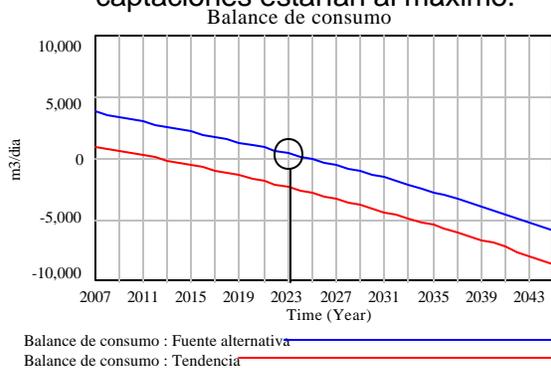


Figura 10 Simulación de una fuente alternativa de abastecimiento

- (5) Por otra parte al pensar en una opción que conjugara la mayoría de las

establecidas arriba en busca de la optimización del abastecimiento, se pudo conducir una simulación que tuvo en cuenta los siguientes criterios, (i) el aumento de la toma en Potreritos de 23 l/s y en el mono a 19 l/s; (ii) una reducción del consumo a 150 l/s; (iii) el descenso de la tasa de natalidad a 2%. De esta manera fue posible establecer que sería posible mantener el balance de oferta y consumo hasta el año 2043 (Fig 11).

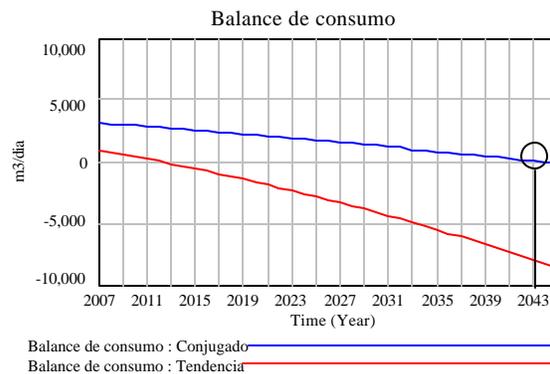


Figura 11 Simulación de la conjugación de diferentes medidas

4. CONCLUSIÓN Y CONSIDERACIÓN FINAL

Ante nuestra deficitaria realidad respecto de los recursos hídricos en la cuenca Alta del río Pamplonita, que muestra que a partir del año 2012 los tomadores de decisión estarán abocados a implementar los respectivos planes de contingencia, de haberlos, para enfrentar los posibles desabastecimientos, los resultados de las simulaciones muestran igualmente que en diferentes panoramas, esta situación puede ser anticipada a través de la toma de medidas que pueden darse en tiempo presente

Igualmente, es observable que intervenir en las microcuencas Monteadentro y El Volcán en cuanto al uso eficiente de los recursos hídricos, así como en la proyección del abastecimiento de agua potable en la ciudad de Pamplona, a través de técnicas de modelación y simulación



de dinámica de sistemas en busca de toma de decisiones adecuadas, se convierte en una alternativa de gran importancia dada la necesidad del aseguramiento del desarrollo económico y social en cuanto al aprovisionamiento de agua para los habitantes de la ciudad, así como para quienes dependen del agua que se deja escurrir hacia la cuenca media y baja del río pamplonita, especialmente la ciudad de Cúcuta.

Adicionalmente a los alcances de la implementación de la dinámica de sistemas a este caso de estudio, se debe sumar el poder comunicativo que pueden tener la realización de simulaciones interactivas, en talleres con los usuarios y tomadores de decisión, dada la retroalimentación que puede ocurrir con los actores. En estos momentos, existe la oportunidad de sensibilizar a los participantes acerca de la respuesta que el sistema puede tener a sus acciones, o a las acciones de otros grupos, al tiempo que se pueden obtener decisiones concertadas, que al ser apropiadas de mejor manera generen en las personas un mayor compromiso de actuación.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al Ingeniero Adolfo Ochoa, director regional de CORPONOR; al Ingeniero Alexander Araque de EMPOPAMPLONA S.A.E.S.P., quienes proporcionaron los datos bases requeridos para el estudio. Igualmente al Ingeniero de Sistemas Edwin Gauta por su apoyo en aspectos de programación.

LITERATURA CITADA

Abbot, M. 1991. Hydroinformatics. Information technology and the aquatic environment. ABEVURY Technical. Aldershot.

Adler, R.W., 1995. Filling the gaps in water quality standards: legal perspectives on biocriteria. In: Davis, S., Simon, P. (Eds.), Biological Assessment and Criteria: Tools for Water Resource Planning and Decision Making. Lewis Publishers, Boca Raton, FL (Chapter 22).

CORPONOR. 2004. Resolución 0683 de Diciembre 27 de 2004.

DANE. 2006. Proyecciones de población por área según municipioa Junio 30 de 1995-2005. En: www.dane.gov.co

Fan, Y., Yang, R-Y., Wei, Y-M., 2007. A system dynamics based model for coal investment. Energy 32: 898-905.

Forrester, J.W. 1961. Industrial dynamics. Pegasus Communications.

Guo, H., Liu, L., Huang, H., Fuller, G., Zou, R., Yin, Y. 2001. A system dynamics approach for regional environmental planning and management: A study for the Lake Erhai Basin. Journal of Environmental Management 61: 93-111.

Huang, B., Ouyang, Z., Zheng, H., Wang, X., Miao, H. 2006. Connotation of ecological integrity and its assessment methods: a review. Ying Yong Sheng Tai Xue Bao (Ed). 2006 Nov;17(11):2196-202

Karr, J.R., Dudley, D.R., 1981. Ecological perspective on water quality goals. Environ. Manage. 5 (1), 55-68.

MINISTERIO DE DESARROLLO ECONOMICO. RESOLUCIÓN NO. 1096 de 17 de Noviembre de 2000. En: <http://www.cra.gov.co/portal/www/resources/tituloa.pdf>

Randers, J. 1996. Guidelines for model conceptualization. In: Richardson, G.P. (Ed.), Modelling for Management, vol. II. Dartmouth, Brookfield, VT, pp. 283-305.

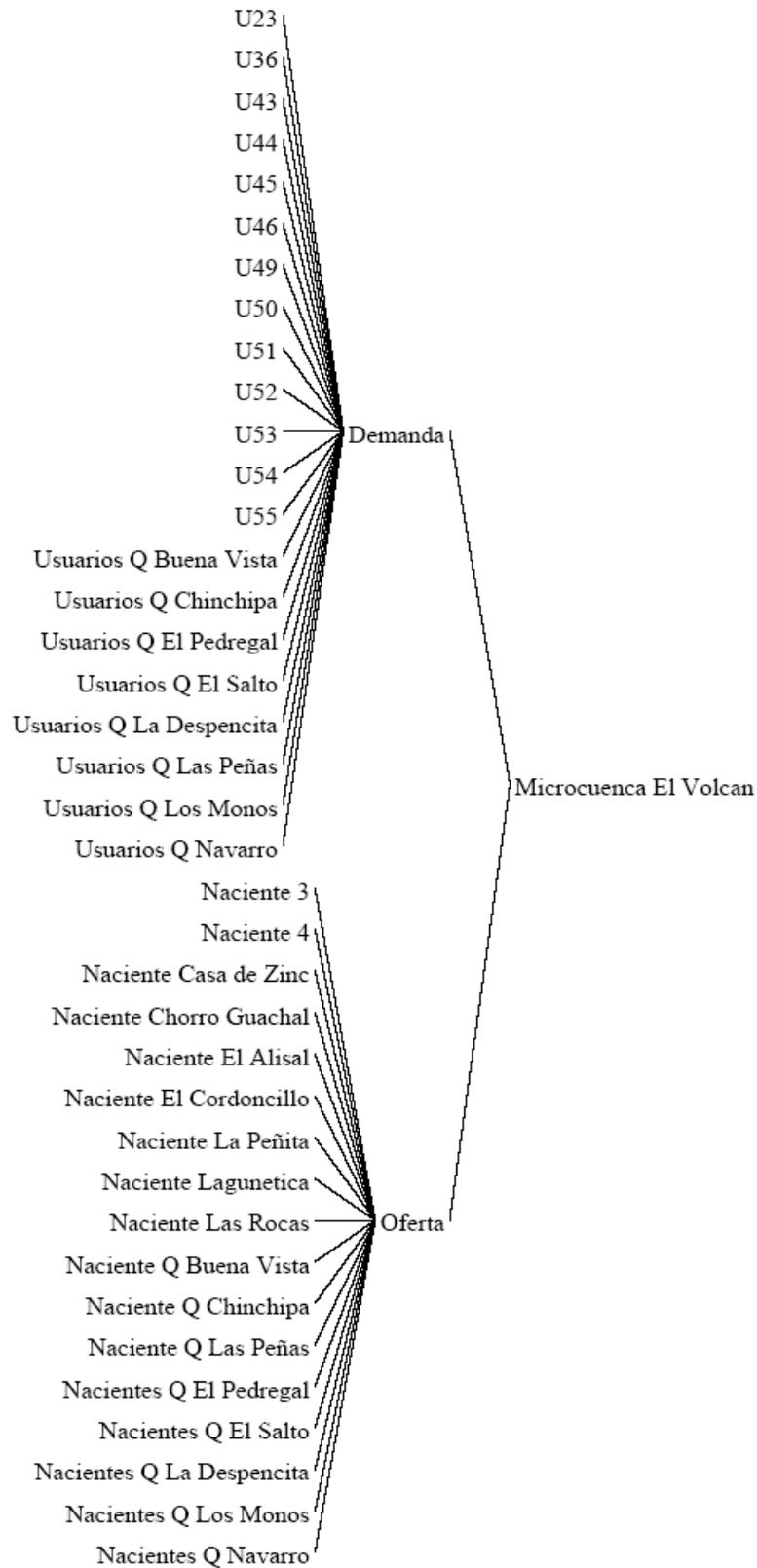
Wood, S., and Shelley, M. 1999. A dynamic model of bioavailability of metals in constructed wetland sediments. Ecological Engineering 12: 231-252.

Recibido 04 Junio 2007

Aceptado 31 Octubre 2007

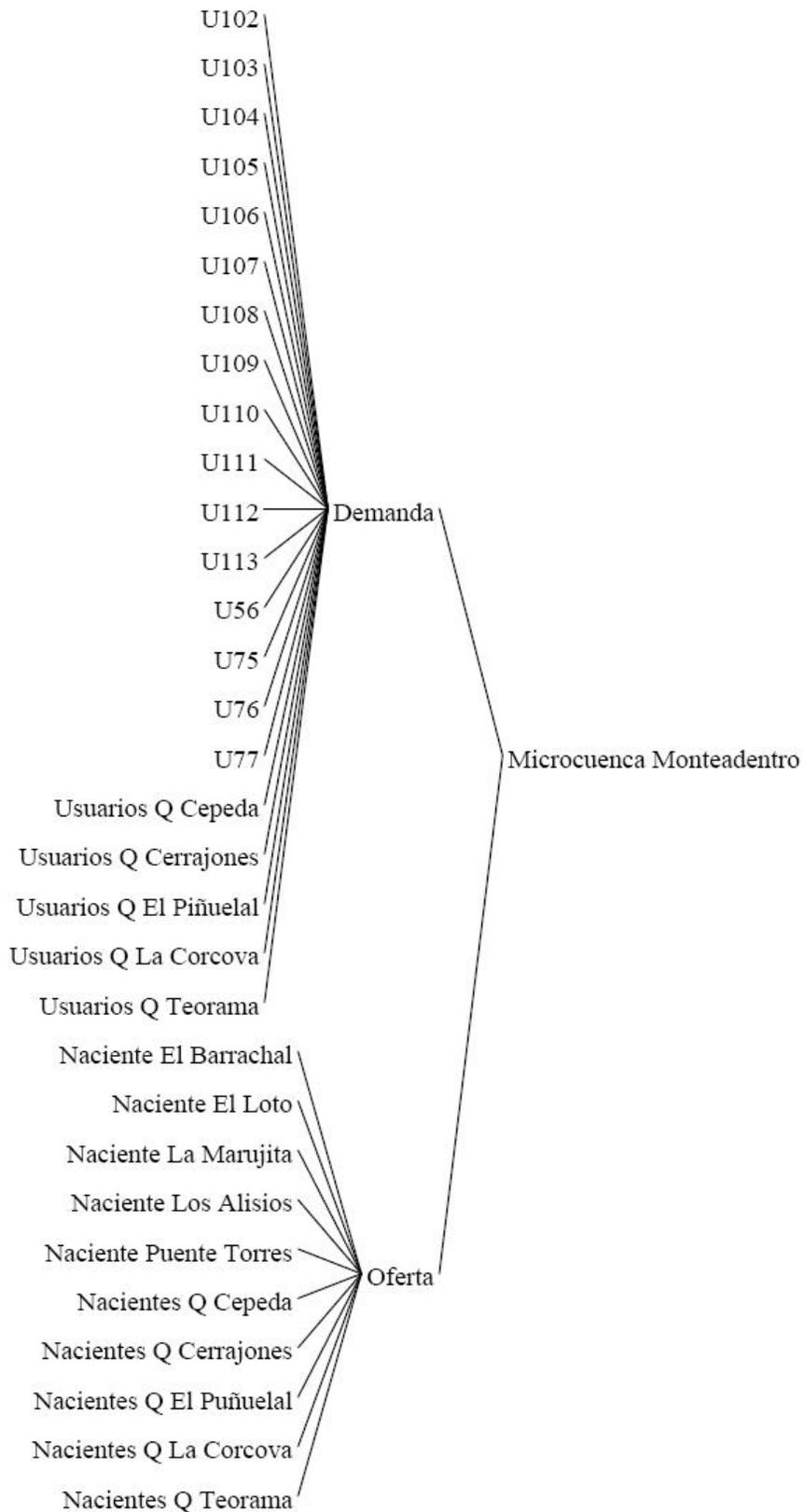


Anexo 1 Relaciones Oferta-Demanda Microcuenca El Volcán





Anexo 3 Relacion Oferta-Demanda Microcuenca Monteadentro





Anexo 2 Esquema de Modelo Microcuenca Monteadentro

