

Modelación integrada de conjuntos urbanos residenciales con alto desempeño hídrico

Integrated modeling of residential complexes with high hydric performance

■ Juan Camilo Isaza López
Universidad del Bío-Bío, Chile
jcisaza@gmail.com

■ Iván Cartes Siade
Universidad del Bío-Bío, Chile
icartes@ubiobio.cl

■ Rodrigo García Alvarado
Universidad del Bío-Bío, Chile
rgarcia@ubiobio.cl

Abstract

One of the most important natural resources for the urban sustainability is water. For this reason, the incorporation of appropriate strategies to manage water resources from buildings and urban planning is necessary. In this work a series of parametric criteria are defined, with which by using design software it proposed generating optimal forms in certain scenarios for high hydric performance in urban residential complexes. The examples developed demonstrates strong influences of dwelling density by the construction block and permeable outdoor surfaces, as well as local infrastructure for water recovering.

Keywords: Parametric Modeling, Hydric Performance, Water Use, Sustainable Neighborhoods

Introducción

El urbanismo y el Recurso Hídrico

El Desarrollo Sostenible (UN, 1987), como eje Macro-político (González, 2013), ha guiado durante los últimos años las políticas de desarrollo social, ambiental y económico de las naciones (UN, 1992). En este escenario, las ciudades por concentración de población (World Bank, 2014), tienen la tarea de ser ambientalmente sostenibles a partir de la gestión integral de los recursos naturales. Ante lo cual la Arquitectura y el Urbanismo como actores en la gestión del ambiente construido (UNESCO/UIA, 2005), deben integrar al diseño urbano y arquitectónico, los factores ambientales presentes en cada contexto. Con el objetivo de desarrollar e implementar estrategias conceptuales y tecnologías pertinentes e innovadoras, que permitan desarrollar los compromisos actuales en materia de sostenibilidad urbano ambiental.

El Agua, definida en su conjunto como Recurso Hídrico (RH) (Dourojeanni, 2009; Salomón, 2003), constituye uno de los principales recursos naturales para el sostenimiento de la vida, la estructura social y la productividad de una ciudad (Cartes 2007, 2001, 2000 ; Borregaard 2012; García et al. 2007; Gómez et al. 2009; MOP 2012). Por lo cual, la Gestión Integral de los Recursos Hídricos (GIRH) (Borregaard 2012; Loaiza et al. 2012; MOP 2012; Salomón 2003; Estévez 2014; Fernandez, et al 2003) en las actuales condiciones globales de crecimiento urbano y Cambio Climático (Revilla 2013; Padrón et al. 2009),

constituye uno de los principales retos para la sostenibilidad de las áreas urbanas en las próximas décadas (Howe et al, 2011; Giovana; Ulian, 2011; Giovana Ulian, 2014).

La necesidad de incorporar la GIRH en la construcción de ciudad, es evidente al analizar los indicadores de uso de agua en cada país. Sólo en Chile, las áreas urbanas son responsables del 6% del uso del agua a nivel nacional (MOP, 2012), lo que equivale a un consumo mensual aproximado de 80.000.000 de m³ de agua potable, con un incremento anual de 2.2%. De este volumen de consumo, el 99.4% es controlado por las 24 principales empresas prestadoras de servicios sanitarios (SISS, 2009, 2012), las cuales a diciembre de 2014 cuentan con 5.000.449 clientes (SISS, 2015) y un crecimiento anual en el número de conexiones de 2.45%, que varía en cada una de las ciudades según el crecimiento urbano y la oferta de nueva vivienda. De este total de clientes, el 94.16% de las conexiones corresponden al sector residencial, donde se estima un consumo promedio mensual por habitante, según la época del año, de 14 m³/mes en el período de invierno y de 26 m³/mes en el período estival, estableciendo un promedio de consumo diario por habitante de alrededor de 170 litros de agua (Borregaard, 2012; SISS, 2012). Estas cifras muestran que a nivel nacional se supera el nivel de consumo responsable recomendado por la Organización de las Naciones Unidas de 60 litros diarios por habitante (Thomas, 1998). Este escenario evidencia la necesidad de integrar elementos ambientales y urbanos al diseño de conjuntos residenciales, con el objetivo

de facilitar condiciones de sostenibilidad hídrica a las áreas urbanas existentes y futuras.

En los últimos años, a nivel internacional, se han presentado iniciativas urbanas y arquitectónicas orientadas a la conservación de los recursos naturales en cada contexto. Mediante la proyección y ejecución de algunos “Eco-Barrios” o “Barrios Sostenibles” (Hernández et al. 2009; Gaffron et al. 2008; Carrasco 2009), se busca integrar criterios ambientales a la conformación arquitectónica y urbana de conjuntos residenciales. Algunos de estos proyectos cuentan con componentes tecnológicos y espaciales en favor del ciclo hidrológico natural, como los usos de humedales, bio-depuradores, tanques de infiltración, y demás componentes de espacio público. Sin embargo, estas iniciativas aunque integran indicadores ambientales en materia energética, carecen de cuantificación e integración de indicadores ambientales en materia hídrica. Esto dificulta establecer relaciones entre el desempeño hídrico y la forma urbana arquitectónica de estos llamados “Eco-Barrios”.

Integración Urbana

La mayor parte de las iniciativas en materia de gestión del RH urbano, se han concentrado en la reducción del consumo de agua potable y la mitigación de la escorrentía superficial en eventos de lluvia torrencial. Esta visión ha limitado la interacción del RH y la ciudad a dos estrategias independientes. Por una parte, se fomenta la instalación de artefactos para el ahorro de agua potable en edificaciones, como grifería ahorradora o sanitarios eficientes, con el fin de reducir la demanda de este recurso a nivel doméstico, comercial e industrial en cada ciudad (García et al, 2003; MOP, 2012; Munizaga, 2012; SISS, 2015; SSW, 2010; UN, 2012). Por otra, se ha impulsado la incorporación de materiales con propiedades absorbentes a los diseños urbanos, principalmente de espacio público, con el fin de reducir la escorrentía superficial producto de las lluvias y la contaminación difusa asociada a este fenómeno (CAU, 2003; Daroch, M; Trebilcock, 2012; Fernandez et al., 2003; Fernández, 2004; Ulian, 2011), ignorando, de esta manera, que la forma urbana, la ocupación del suelo, la densidad habitacional y el tamaño de las viviendas, representan un conjunto de variables en relación directa con el RH y las condiciones ambientales de cada Cuenca Hídrica (CH).

La GIRH, tiene como unidad base de gestión territorial las CH (Dourojeanni, 2009), las cuales por su conformación geomorfológica y localización geográfica, cuentan con condiciones ambientales y climáticas particulares que condicionan la oferta ecosistémica de recursos naturales para las comunidades allí asentadas.

Las áreas urbanas al estar localizadas dentro de una CH, son por consecuencia, dependientes de la oferta ecosistémica de recursos naturales y de las dinámicas hidrológicas que dicha cuenca posea. Esto determina que las estrategias urbanas y arquitectónicas orientadas a la gestión sostenible del RH, deben responder a las condiciones ambientales de la

cuenca, las cuales incluso, pueden condicionar su densidad poblacional y expansión territorial, de acuerdo a la capacidad de carga ambiental de cara territorio (Padrón & Cantú, 2009). Esto significa que no es posible replicar estrategias urbanas sin antes analizar su pertinencia en cada contexto, debido a que cada CH es diferente.

Generación de indicadores

Para la identificación de estrategias urbanas pertinentes para el diseño de conjuntos residenciales urbanos hídricamente eficientes, es necesario contar con un indicador ambiental pertinente, que integre de forma adecuada diferentes variables asociadas a fenómenos ambientales producto de los procesos de urbanización. Para tal efecto, este trabajo propone la utilización del concepto de Huella Hídrica (HH) (Agoramoorthy, 2013; Hoekstra et al, 2011), el cual engloba en tres categorías de calidad (verde, Azul y Gris), diferentes indicadores ambientales, urbanos, territoriales, temporales; cualitativos y cuantitativos; que permiten en base a un indicador final (m^3), poder hacer comparaciones entre diferentes casos de estudio y analizarlos de acuerdo a su contexto.

Entendiendo la representatividad de las áreas residenciales en la ocupación urbana y en su demanda de RH, se consideran los conjuntos habitacionales como el objeto de estudio. Para esto, se abordan las viviendas en su fase de funcionamiento, en periodos de análisis mensual y anual. Permitiendo de esta forma, integrar resultados cuantitativos y diferentes variables relacionadas al recurso hídrico a la conformación urbana.

Desempeño hídrico

Dado que las condiciones de la CH determinan la disponibilidad del RH para una determinada área urbana, la HH estimada para cada conjunto residencial podría ser comparada y analizada entre diferentes casos, siempre y cuando, estén localizados en la misma CH, ya que el indicador resultante de Huella Hídrica ($m^3/año$), tendrá coherencia sólo si se compara dentro del mismo contexto territorial. Dicha estimación de HH para conjuntos residenciales, tiene un carácter espacial y temporal, que impide realizar una comparación directa del indicador resultante entre ciudades de CH diferentes.

Se propone diseñar un indicador de Desempeño Hídrico (DH) en base a la relación numérica, entre el máximo número de viviendas posibles en una determinada área y la menor huella hídrica per cápita resultante en cada contexto. Identificando de esta manera, un valor cuantitativo de desempeño, expresado en número de viviendas posibles en un área de terreno determinado. De esta manera, se posibilita con base en la estimación de la Huella Hídrica de cada caso de estudio, generar un indicador comparable entre diversos contextos. Este indicador final de desempeño estará expresado en un coeficiente correspondiente a la HH per cápita sobre el número de viviendas en un área determinada ($HHp/viviendas/m^2$).

Objetivo

El presente trabajo se plantea construir una matriz de cálculo a partir de parámetros ambientales y urbanos, que permita identificar cuál es la conformación formal de mejor desempeño hídrico en contextos urbanos determinados. Generando como resultado, una modelación integrada de conjuntos residenciales de alto desempeño hídrico, en base a información ambiental de cada lugar y a las necesidades espaciales y programáticas de un proyecto residencial.

La realización de este objetivo, da como resultado la validación conceptual de la matriz de análisis diseñada. Así mismo, se verifica la coherencia y pertinencia del concepto de desempeño hídrico resultante del análisis de HH de cada proyecto y número de viviendas proyectado en un área determinada.

Metodología

Para la investigación, se dividió el proceso metodológico en tres etapas interdependientes (Ilustración 1). Esto con el objetivo de desarrollar cada componente del trabajo de manera estructurada e independiente para poder, en futuras etapas, modificar, ampliar, refinar y perfeccionar cada una de las etapas a continuación descritas.



Ilustración 1: Estructura metodológica.

Correlación de variables

El presente trabajo emplea como indicador del Recurso Hídrico, la estructura conceptual presente en la Huella Hídrica (Hoekstra et al., 2011), en donde se cuantifica el volumen total de agua empleado para la generación de un producto o servicio. Dicho indicador se divide en tres tipos de Huella Hídrica: la Huella Azul, correspondiente al volumen de agua empleada tomada de un cuerpo de agua superficial o subterráneo; la Huella Verde, correspondiente al volumen de agua incorporada de origen atmosférico; y, por último, la Huella Gris que corresponde al volumen de agua necesario para disolver la carga contaminante de un vertimiento o de los residuos generados del uso de Agua Azul y Verde.

Para abordar con la estructura conceptual de HH, el objeto de estudio (los conjuntos residenciales en su etapa de ocupación en un periodo de análisis de 12 meses) es necesario adaptar los criterios y procedimientos de cálculo recomendados para la HH según Hoekstra et al. (2011). Para lo cual, se definieron las siguientes bases conceptuales:

Huella Azul: volumen de agua potable que es provisto por la empresa de servicios sanitarios de cada área urbana, a partir de procesos de captación, potabilización y distribución.

Huella Verde: volumen de agua lluvia que mantiene,

en alguna medida, un ciclo hídrico natural, infiltrándose al terreno por medio de las zonas verdes y que no se convierte en escorrentía superficial.

Huella Gris: volumen de agua contaminada, producto del uso y desecho, en los equipos sanitarios presentes en una vivienda, así como, el volumen de agua de escorrentía generado por las superficies impermeabilizadas de la vivienda en eventos climáticos.

Con base en esta definición conceptual de la HH para conjuntos residenciales, se agruparon las variables arquitectónicas y urbanas relacionadas a cada una de las categorías previamente descritas. Identificando de esta manera, cuáles de los elementos presentes en el diseño de un conjunto residencial, interactúan con el Recurso Hídrico de forma directa o indirecta en cada categoría.

Huella Azul	Huella Verde	Huella Gris
Número de ocupantes	Área de Cubierta	Número de ocupantes
Área de la vivienda	Material de la cubierta	Material de pisos
Equipos sanitarios	Condiciones climáticas	Condiciones climáticas
Condiciones climáticas	Áreas verdes	Áreas pavimentadas
Áreas de jardín	Área del lote	Área del lote
Años de construcción	Área libre	Área libre

Tabla 1: Clasificación de variables relacionadas a las categorías de Huella Hídrica conceptualizadas.

Como se puede ver en la (Tabla 1), las variables seleccionadas se vinculan a tres escalas de diseño y localización presentes en un conjunto. Se identificó que la Huella Azul tiene una relación directa con la morfología interna de la vivienda, de acuerdo al número de artefactos sanitarios y el número de ocupantes; que la Huella Verde tiene relación directa con la localización, la pluviometría, las áreas verdes y el área de ocupación de la vivienda; Y, por último, que la Huella Gris tiene relación con el volumen total de agua residual generado por la Huella Azul y el excedente generado por eventos climáticos en las áreas impermeabilizadas y ocupadas de los lotes.

La construcción conceptual de estos parámetros de evaluación, permitió establecer una estructura de análisis flexible que puede ser complejizada de acuerdo a la información primaria y secundaria disponible en cada uno de los contextos.

Matriz de análisis

En base a la definición de la HH y el inventario de variables urbano-arquitectónicas relacionadas a las categorías Azul, Verde y Gris de HH, se procedió a la construcción conceptual

de una matriz de análisis que interrelacione las variables para un resultado cuantitativo expresado en volumen de agua generado. Esto plantea la necesidad de una matriz de análisis para cada una de las clasificaciones de Huella Hídrica, así como la cuantificación de la Huella Hídrica total, Huella Hídrica per cápita y el indicador de Desempeño Hídrico.

Huella Azul: Se calculará de acuerdo a los datos disponibles de consumo de agua potable en períodos de tiempo mensual. Se estima por medio del promedio mensual de agua (m³) demandado por cada vivienda en su contexto. Este indicador por el número de viviendas proyectadas en un conjunto residencial, dará como resultado la huella hídrica azul total para un mes del año. Para identificar la HH anual será necesario sumar el promedio de consumo de cada uno de los meses del año, ya que los valores de consumo varían a lo largo del año de acuerdo a los períodos climáticos.

$$HH_{azul} = \left[\left(\frac{m^3}{mes} \right) \times (N^\circ \text{ de Viv}) \right] \times mes$$

Huella Verde: Se calculará con base en las condiciones climáticas del lugar, dadas en mm de precipitación mensuales, por el área libre del proyecto y por el % de absorción que pueda tener el terreno. De esta forma, se puede estimar el volumen de agua lluvia que se infiltra al terreno y que, por consiguiente, no se convierte en escorrentía superficial.

$$HH_{verde} = \left[\left(Lluvias \left(\frac{mm}{mes} \right) \times \text{área libre} (m^2) \right) \times (\%)_{absorción} \right] \times mes$$

Huella Gris: Se calculará a partir de la suma de los excedentes generados por el uso de agua potable en la Huella Azul y el volumen de aguas lluvias no infiltrado producto del área ocupada del lote. Este volumen resultante, se debe multiplicar por el porcentaje estimado de evaporación de acuerdo al clima y a los usos, por el coeficiente de disolución de la carga contaminante en un cuerpo de agua, el cual se puede estimar a partir de documentar la carga contaminante del caso de estudio particular y las regulaciones ambientales sobre vertimientos en cada contexto.

$$HH_{gris} = \left[\left[\left((HH_{verde}) \times (\%)_{absorción} \times Disolución \right) + \left[\left(Lluvias \left(\frac{mm}{mes} \right) \times \text{área ocupada} (m^2) \right) \times (\%)_{absorción} \right] \right] \times (\%)_{absorción} \times Disolución \right]$$

Huella Hídrica Total: Se calculará mediante la suma de las huellas hídricas Azul, Verde y Gris. El resultado debe ser el volumen de agua necesario para un período de uso de la vivienda, sea mensual o anual. Dependiendo del cálculo parcial realizado.

$$HH_{Total} = (HH_{Azul}) + (HH_{Verde}) + (HH_{Gris})$$

Huella Hídrica per cápita: Se calculará dividiendo la HH Azul, Verde y Gris, por el número de viviendas presentes en el conjunto residencial. De esta manera, se puede identificar el valor parcial de cada uno de los valores y su influencia unitaria sobre el total de la HH. Permitiendo así, la identificación de los factores arquitectónicos asociados a dicho fenómeno.

Los resultados de este procedimiento, sólo pueden ser comparados entre casos de estudio del mismo contexto, ya que las condiciones de precipitaciones y consumo de agua, varían según el lugar, el micro-clima, el nivel socio económico del conjunto, el área de intervención, el diseño urbano y demás elementos que integran la matriz.

$$HH_{per\ cápita} = \left(\frac{HH_{Azul}}{N^\circ \text{ Viviendas}} \right) + \left(\frac{HH_{Verde}}{N^\circ \text{ Viviendas}} \right) + \left(\frac{HH_{Gris}}{N^\circ \text{ Viviendas}} \right)$$

Indicador de Desempeño Hídrico (DH): Con el objetivo de generar un indicador comparable entre diferentes casos de estudio, se crea el concepto de Indicador de Desempeño Hídrico para conjuntos residenciales. Este indicador es el resultado promedio de la distribución de HH per cápita Azul, Verde y Gris, en el número de viviendas presentes en el conjunto.

$$DH = \frac{\left[\left(\frac{HH_{per-cápita\ Azul}}{N^\circ \text{ Viviendas}} \right) + \left(\frac{HH_{per-cápita\ Verde}}{N^\circ \text{ Viviendas}} \right) + \left(\frac{HH_{per-cápita\ Gris}}{N^\circ \text{ Viviendas}} \right) \right]}{3}$$

A partir del resultado (Tabla 2 - Interpretación del indicador de desempeño hídrico Tabla 2) de esta operación, se puede inferir cuál es la relación de desempeño hídrico de los conjuntos residenciales, versus el número de viviendas presentes.

Indicador	Interpretación
>1	< Huella Hídrica per cápita < N° de viviendas Tiende a la alta densidad habitacional
±1	> Huella Hídrica per cápita < N° de viviendas Óptimo desempeño hídrico
< 1	< Huella Hídrica per cápita > N° de viviendas Tiende a la Baja densidad habitacional

Tabla 2: Interpretación del indicador de desempeño hídrico.

Modelación integrada

Basados en la matriz de análisis desarrollada, se procedió a elaborar una estructura de datos (Ilustración 2), que agrupa de forma ordenada la entrada y salida de datos de la matriz.

Esta estructura de datos, al tener interrelacionadas las variables dentro de la matriz de análisis, permite a partir de la variación de los datos de entrada, generar diferentes combinaciones de resultados en los datos de salida. Ilustración



2: Estructura de datos para modelación.

Posibilitando de esta manera, la modelación paramétrica de diferentes escenarios, bajo las mismas condiciones de contexto, donde se busca identificar la combinación de variables con el mejor indicador de desempeño hídrico en los resultados.

Para la modelación integrada de los conjuntos residenciales de alto desempeño hídrico, se plantea como primer paso, un análisis numérico, mediante el Software Excel, a partir de tablas de cálculo. Se construye cada componente de la matriz de análisis en hojas de cálculo diferentes, donde se identifican los datos de entrada y salida, de acuerdo a la estructura de datos descrita previamente. A continuación, mediante el aplicativo de Excel, Solver, se realiza una programación lineal, donde se definen las condiciones de contexto, datos de referencia, área del lote y/o área de las viviendas, y, de igual forma, se establecen los límites de las variables, los cuales permiten además buscar escenarios parcializados según dichos límites. Luego, se realiza la definición de la función objetivo, que para el objetivo de este trabajo, es el mejor indicador de desempeño hídrico (± 1). Esta programación, genera como resultado una herramienta de modelación paramétrica que da como resultado diferentes combinaciones de variables óptimas para un contexto determinado.

A partir de la modelación en el aplicativo Solver, se obtienen los parámetros urbanos, que más adelante son base para la modelación volumétrica en software de representación. Estos parámetros son: alturas en número de pisos, área ideal de las viviendas, número de viviendas por hectárea (densidad), área de los lotes, porcentaje de ocupación, área total ocupada, área total libre, HH total, HH per cápita e indicador de desempeño hídrico.

Modelación de conjuntos

A partir de la matriz de análisis y la estructura de datos, se realizó la modelación integrada de conjuntos residenciales compuestos por viviendas de 40 m², 80 m² y 120 m², en lotes de 10000 m² (1 hectárea). A su vez, esta modelación se realizó con las condiciones de contexto de tres ciudades de Chile. Como resultado se generaron 9 modelos de conjunto residencial de alto desempeño hídrico. Estas configuraciones formales, presentan variaciones significativas entre el tipo de vivienda y el contexto de análisis, debido en gran medida a las condiciones climáticas de cada lugar (INE, 2014) y a la diferencia en las demandas de agua potable en cada una de las ciudades (SISS, 2015).

Cada una de las ciudades seleccionadas, cuenta con condiciones climáticas diferentes, tanto en temperaturas como en régimen anual de lluvias (Tabla 1

Tabla 3). Santiago cuenta con el nivel de precipitaciones de 216 mm anuales, el más bajo de las tres ciudades seleccionadas. Concepción, en siguiente orden, es una ciudad con régimen de precipitaciones moderado, que se incrementa en el período de otoño e invierno, contando con un total anual de 1108 mm de precipitaciones. Por otra parte, Valdivia es la ciudad con el régimen de lluvia anual más alto, con 2540 mm anuales, llegando a recibir en un mes lluvioso el doble de precipitaciones que Santiago en todo un año.

Ciudad	Mes del año												Total
	En	Fb	Ma	Ab	My	Jn	Jl	Ag	Sp	Oc	Nv	Dc	
Santiago	0	0	0	10	34	70	2	36	2	41	0	22	216
Concepción	21	15	25	56	176	218	222	153	88	65	41	28	1108
Valdivia	60	70	130	230	360	440	390	320	200	120	120	100	2540

Tabla 3: precipitaciones anuales (INE, 2014).

De acuerdo a SISS, (2015), el volumen de agua potable demandado en cada una de las ciudades seleccionadas varía significativamente (Tabla 4). Santiago es, de las tres ciudades, la que reporta la mayor demanda de agua potable tanto en m³ al mes por vivienda, como en litros diarios por habitante. Así mismo, Santiago es la más densamente poblada de las tres ciudades, con las menores precipitaciones anuales y la de mayor consumo de agua potable. Por su parte, Valdivia es la segunda ciudad en demanda de agua potable, además de ser de las tres ciudades la de menor población urbana. Concepción, es la ciudad que registra menor demanda de agua potable, tanto en las viviendas como en el uso diario por habitante, planteando así, un escenario urbano intermedio, para la modelación de los conjuntos.

Ciudad	Consumo de agua potable	
	m ³ /mes/vivienda	Litros día/hab
Santiago	20.9	142.1
Concepción	15.6	115.3
Valdivia	17.1	125.7

Tabla 4: Consumo de agua potable por ciudad (SISS, 2015).

A partir de la definición de información de contexto, se procedió a generar mediante el aplicativo Solver, la mejor combinación de variables para generación de conjuntos basados en tres tipos de tamaños de vivienda, esto en un lote con área fija (10000 m²).

Resultados

A partir de la modelación, se obtuvieron las configuraciones de mayor desempeño hídrico a partir de la generación de las variables que determinan la forma urbana del conjunto en cada ciudad. Dichos resultados se presentaron en primera medida como una tabla de información con nueve variables identificadas (Tabla 5), las cuales son la base para las configuraciones urbanas de cada uno de los 9 modelos. Posteriormente, a partir de estos datos, se generó mediante el Software Sketchup la modelación geométrica de las variables, dando como resultado la configuración volumétrica de los conjuntos residenciales (Ilustración 3).

Área de viviendas	Configuración urbana	Santiago	Concepción	Valdivia
40 m ²	% de ocupación	10%	11%	17%
	Área ocupada (m ²)	1000	1100	1700
	Área libre (m ²)	9000	8900	8300
	Nº viviendas (und)	70	128	172
	Densidad (viv/ht)	70	128	172
	Área de lotes (m ²)	144.9	78	58.06
	Nº de pisos (und)	2.76	4.66	4.05
	HH total (m ³ /año)	36774.93	59061.09	96090.17
	Indicador (und)	0.9997	1.0007	0.9982
80 m ²	% de ocupación	15%	19%	10%
	Área ocupada (m ²)	1500	1900	1000
	Área libre (m ²)	8500	8100	9000

80 m ²	Nº viviendas (und)	67	124	175
	Densidad (viv/ht)	67	124	175
	Área de lotes (m ²)	148.51	80.41	57.01
	Nº de pisos (und)	3.5	5.23	14.03
	HH total (m ³ /año)	35934.5	57638.7	97388.67
	Indicador (und)	1.0013	0.9991	0.9997
120 m ²	% de ocupación	12%	12%	17%
	Área ocupada (m ²)	1200	1200	1700
	Área libre (m ²)	8800	8800	8300
	Nº viviendas (und)	68	127	172
	Densidad (viv/ht)	68	127	172
	Área de lotes (m ²)	146.22	78.43	58.05
	Nº de pisos (und)	6.83	12.75	12.16
HH total (m ³ /año)	36462.69	58816.24	96098.96	
	Indicador (und)	1.0014	0.998	0.9984

Tabla 5: Resultados numéricos de la modelación de conjuntos residenciales, para cada uno de los casos de estudio.

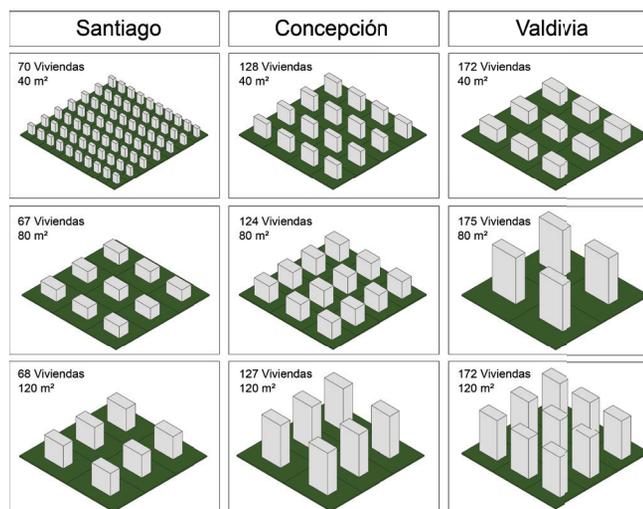


Ilustración 3: Resultados volumétricos de la modelación de conjuntos.

A partir de los resultados de vislumbra una relación directa entre las condiciones de contexto y la densidad habitacional de los conjuntos. Se identifica que Santiago, debido a sus condiciones de contexto, resulta con la menor

densidad habitacional para los tres tipos de viviendas, siendo esta configuración de baja densidad, una respuesta a las condiciones de baja precipitación anual y alta demanda de agua potable. Esta relación entre variables, se corrobora al observar que los conjuntos resultantes en Valdivia cuentan con la densidad habitacional más alta. Lo que establece una relación directa entre la densidad ideal en un contexto y sus condiciones de contexto.

Respecto a la ocupación y altura, se considera que el área de las viviendas va en relación directa al porcentaje de ocupación y a la altura recomendada, ya que, a mayor área de los conjuntos se recomienda distribuir esta área en altura, manteniendo un bajo porcentaje de ocupación de los terrenos.

La Huella Hídrica resultante en la modelación, para cada uno de los conjuntos, es similar en los tres tipos de vivienda analizada. Esto indica que la matriz de análisis junto la programación de la modelación integrada, tienden a generar un balance entre los porcentajes de ocupación, el número de viviendas y las condiciones del contexto. Esta relación también permite afirmar que la construcción conceptual del indicador de desempeño hídrico para los conjuntos, es coherente y pertinente, ya que permite identificar cuál de las configuraciones cuenta con las mejores condiciones en cada contexto. Así mismo, dicho indicador permite realizar la comparación de resultados entre los diferentes contextos, ya que en todos los modelos, aunque la huella hídrica es diferente, dicho indicador tiende en los nueve casos al valor óptimo de ± 1 .

Discusión y conclusiones

A partir de los resultados se plantea, en futuros trabajos, escalar la misma metodología al diseño arquitectónico de dichos conjuntos, integrando de igual forma los conceptos de huella hídrica y desempeño hídrico, para la distribución espacial, selección de materiales y diseño de instalaciones.

Se considera de interés para futuros desarrollos, interrelacionar variables energéticas y bioclimáticas, buscando generar modelaciones urbanas de mayor integralidad ambiental.

Abordar de esta forma un proyecto urbano residencial, posibilita que la arquitectura pueda ser un factor activo dentro de la gestión urbana de agua.

Esta modelación integrada revela fundamentalmente la relación de distintos factores arquitectónicos y urbanos para la eficiencia hídrica que amplían las perspectivas existentes sobre el uso de artefactos o pavimentos porosos. Brindando una vinculación relevante entre la condición geográfica y los hábitos de las personas con la forma residencial y organización residencial de las ciudades.

Al incrementar el área por unidad, en los tres centros urbanos, localizados en distintas cuencas hídricas y diferentes patrones de consumo, se produce una mayor concentración de la agrupación, y solamente en Santiago resulta conveniente viviendas unifamiliares dispersas,

solamente de tamaño pequeño.

Se evidencia con base en los resultados, que los contextos con mayor oferta de recursos hídricos, puede albergar una concentración poblacional mayor, lo que pone en cuestión el desarrollo urbano en territorios con poca oferta hídrica.

Este trabajo, pretende verificar el concepto de desempeño hídrico en procesos de diseño urbano y arquitectónico, del mismo modo en que se han incorporado en estos procesos los conceptos de eficiencia energética.

Es necesario continuar revisando la estructura conceptual de los indicadores ambientales en materia hídrica, en relación a la arquitectura y el urbanismo. Ya que las ciudades actualmente tienen clara dependencia de dichos recursos.

Con base en los resultados obtenidos de la modelación, se puede verificar que el objetivo planteado dentro del presente trabajo fue superado, al generar configuraciones urbanas residenciales de óptimo desempeño hídrico.

Existen relaciones entre las estrategias de ocupación de un lugar y sus dinámicas naturales, por lo cual se evidencia que los modelos de ocupación empleados en algunas ciudades, puede ir en contra de las condiciones naturales del lugar.

No es posible incorporar sostenibilidad ambiental a los nuevos desarrollos urbanos, si desde su conceptualización urbana espacial no integran variables propias de cada lugar.

Agradecimientos

Doctorado en Arquitectura y Urbanismo (DAU), Proyecto CIFE, Dirección General de Investigaciones (DGI), Dirección General de Postgrados, Universidad del Bío-Bío.

Referencias

- Agoramoorthy, G. (2013). The Water Footprint of Modern Consumer Society By Arjen Y. Hoekstra. *Water Resources Management*, 27(11), 3847-3848. doi:10.1007/s11269-013-0409-x
- Borregaard, N. et al. (2012). ¿Cuáles son los desafíos y oportunidades para una gestión más sostenible, justa y transparente del recurso hídrico? Retrieved from http://www.crdp.cl/biblioteca/hidrico/AGUA_Y_MEDIO_AMBIENTE_ANDESS-CIPMA_Informe_Enero_2012.pdf
- Carrasco, G. (2009). Proyecto Ecocity Manual Para El Diseño De Ecociudades En Europa. *Revista INVI*, 24(65), 197-200. doi:10.4067/S0718-83582009000100007
- Cartes, I. (2000). El agua como principio de sustentabilidad para el desarrollo urbano. *Urbano*, 3(3), 54-57. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=19830312>
- Cartes, I. (2001). EL REDISEÑO DE COMUNIDADES SUSTENTABLES A TRAVÉS DEL AGUA. *Arquitecturas Del Sur*, N°29(ISSN 0716-2677), 5-10. Retrieved from http://146.83.193.68/ASD/papel_digital/ASDPDF/AS29.pdf
- Cartes, I. (2007). AGUA, TERRITORIO Y CIUDADES SUSTENTABLES. (Spanish). *Arquitecturas Del Sur*, (33), 44-51. Retrieved from <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=31976995&lang=es&site=ehost-live>
- CAU, C. de A. U. (2003). ¿Quién Debe Pagar por las Aguas Lluvias?

- Santiago. Retrieved from <http://www.centroaguasurbanas.cl/main.htm>
- Daroch, M; Trebilcock, M. (2012). Recolección de aguas lluvias, factibilidad de desarrollo en viviendas de Chile. Universidad del Bío Bío.
- Dourojeanni, A. (2009). Los desafíos de la gestión integrada de cuencas y recursos hídricos en América Latina y el Caribe. *DELOS*, 3(8), 1-13. Retrieved from <http://www.eumed.net/rev/delos/08/acd.pdf>
- Estévez, C. (2014). Investigación en asuntos hídricos Una mirada desde la Dirección General de Aguas. Santiago de Chile: Ministerio de Obras Publicas. Retrieved from http://www.dga.cl/DGADocumentos/Investigacion_del_Recurso_Hidrico_una_mirada_desde_a_DGA.pdf
- Fernández, B. (2004). Drenaje de aguas lluvias urbanas en zonas semiáridas. *ARQ* (Santiago), (57). doi:10.4067/S0717-69962004005700017
- Fernandez, B., Montt, J., & Rivera, P. (2003). Nuevos Enfoques para el Drenaje Urbano de Aguas Lluvias. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Gaffron, P., Huisman, G., & Skala, F. (2008). La ecociudad: un lugar mejor para vivir (Libro 1) (2008th ed.). Universidad de Ciencias Económicas y Administración de Empresas de Viena. El.
- García Lirios, C., Carreón Guillén, J., Hernández Valdés, J., Montero López Lena, M., & Bustos Aguayo, J. M. (2013). Actitudes, consumo de agua y sistema de tarifas del servicio de abastecimiento de agua potable. (Spanish). *Polis*, 12(34), 363-401. Retrieved from 10.4000/polis.8933\n<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=91609465&lang=es&site=ehost-live>
- García, M. L., Carvajal, Y., & Jiménez, H. (2007). La gestión integrada de los recursos hídricos como estrategia de adaptación al cambio climático. *Ingeniería Y Competitividad*, 29(1), 19-30.
- Gómez, D., Castaño, A., & García, G. (2009). Captación, Almacenamiento y Uso de Aguas Lluvias a Través de Culatas de Edificios en Medellín, Colombia. *elecs2013.ufpr.br*, (1), 1-10. Retrieved from http://www.elecs2013.ufpr.br/wp-content/uploads/anais/2009/2009_artigo_057.PDF
- González, A. (2013). INTEGRACIÓN CURRICULAR DE LA SOSTENIBILIDAD EN LA FORMACIÓN DE ARQUITECTOS EN AMÉRICA LATINA. Universidad del Bío-Bío.
- Hernández, A., Velázquez, V., Verdaguer, C., & Cárdenas, V. (2009). Ecobarrios para ciudades mejores. *CIUDAD Y TERRITORIO Estudios Territoriales*, 543-558. Retrieved from http://oa.upm.es/5841/1/CyTET_161_162_543.pdf
- Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K., Aldaya, M. M., & Mekonnen, M. M. (2011). *The Water Footprint Assessment Manual*. (Earthscan Ltd, Ed.) (1st ed.). London; Washington, DC.
- Howe, C. a., Butterworth, J., Smout, I. K., Duffy, A. M., & Vairavamoorthy, K. (2011). Sustainable Water Management in the City of the Future. (C. a. Howe, K. Vairavamoorthy, & N. Van der Steen, Eds.). UNESCO-IHE. Retrieved from http://www.switchurbanwater.eu/outputs/pdfs/Switch_-_Final_Report.pdf
- INE. (2014). Informe anual de Medio Ambiente. Santiago. Retrieved from http://www.ine.cl/canales/chile_estadistico/estadisticas_medio_ambiente/2014/informe-medio-ambiente2014.pdf
- Jaramillo, L. (2003). Modelando la Demanda de Agua de Uso Residencial en México. México DF: Instituto Nacional de Ecología. Retrieved from http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgipea/demanda_residencial.pdf
- Loaiza, W., Reyes Trujillo, A., & Carvajal Escobar, Y. (2012). Aplicación del Índice de Sostenibilidad del Recurso Hídrico en la Agricultura (ISRHA) para definir estrategias tecnológicas sostenibles en la microcuenca Centella. *Ingeniería y Desarrollo*, 30(2), 160-181. Retrieved from http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612012000200003&lang=pt
- MOP. (2012). Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012 - 2025 (1st ed.). Santiago. Retrieved from http://www.mop.cl/Documents/ENRH_2013_OK.pdf
- Munizaga, R. (2012). AHORRO Y RECICLAJE DE AGUA. *SUSTENTABIT*, 13, JUNIO, 36-39. Retrieved from <http://www.sustentabit.cl/sustentabit/Uploads/13/261818023125943276236-39.pdf>
- Padrón, A., & Cantú, P. (2009). EL RECURSO AGUA EN EL ENTORNO DE LAS CIUDADES SUSTENTABLES. *Culcyt*, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, 31(6), 15-25.
- Revilla, V. (2013). La Ciudad Verde. Huella de carbono y Agua en el Municipio de la Paz. La Paz, Bolivia.
- Salomón, M. (2003). Indicadores de desempeño para la Gestion Integral en los Recursos Hidricos. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo. Retrieved from http://www.imd.uncu.edu.ar/upload/04-Presentacion_M.SALOMON_.pdf
- SISS. (2009). SISS da a conocer nivel de consumo de agua potable en el país. Retrieved from http://www.siss.gob.cl/577/articles-7663_recurso_5.pdf
- SISS. (2012). Informe de Gestión del Sector Sanitario 2012. Santiago.
- SISS. (2015). Informe de Gestión del Sector Sanitario 2014. Santiago de Chile. Retrieved from http://www.siss.gob.cl/577/articles-11831_recurso_1.pdf
- SSW. (2010). Water use in your home Tips to help save water Save water, save money and help the environment. Geern Lane: South Staffs Water. Retrieved from www.south-staffs-water.co.uk
- Thomas, T. (1998). Domestic water supply using rainwater harvesting. *Building Research & Information*, 26(2), 94-101. doi:10.1080/096132198370010
- Ulian, G. (2011). ESTRATÉGIAS DE EXTENSION URBANA SOSTENIBLE A PARTIR DE LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS. Universidad del Bío-Bío.
- Ulian, G. (2014). Metodología para la gestión urbana a través de indicadores de Hidricidad. Universidad del Bío-Bío.
- UN. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Asamblea General de las Naciones unidas.
- UN. (1992). Programa 21. Retrieved from <http://www.un.org/spanish/esa/sustdev/agenda21/>
- UN. (2012). World Water Development Report 4 (Vol. 1). UNESCO/UIA. (2005). CARTA UNESCO/UIA. Barcelona.
- World Bank. (2014). World Development Indicators. Retrieved from <http://databank.worldbank.org/data/views/reports/tableview.aspx>