

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**RECARGA DEL ACUÍFERO DE LIMA MEDIANTE EL USO DE
AGUAS RESIDUALES TRATADAS**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta el bachiller:

Eduardo Paolo Parodi Gonzales Prada

ASESOR: Dr. Ramzy Kahhat Abedrabbo

Lima, octubre de 2016

Resumen

En la actualidad en la ciudad de Lima, tiene un déficit hídrico de 3.3 m³/s, cerca de 800,000 limeños no cuentan con el servicio de red de agua potable. En esta situación actual de escasez hídrica, la ciudad de Lima vierte al océano Pacífico más de 20 m³/s de efluentes de tratamiento primario de la red aguas residuales de la ciudad para su dispersión en el mar, volumen de agua, que tratado y reusado contribuiría de forma significativa a resolver los problemas de la ciudad.

La presente Tesis tiene por objetivo evaluar la viabilidad técnica y sostenibilidad de la recarga del acuífero de Lima mediante el uso de aguas residuales tratadas para su posterior extracción y uso potable, para ampliar las fuentes de agua dulce.

La metodología para el logro del objetivo señalado, corresponde al de una investigación mixta. El proceso de investigación comprendió el análisis de la situación hídrica de la ciudad de Lima y en la determinación de las variables técnicas que se deben evaluar para determinar la factibilidad técnica de la recarga del acuífero.

La idoneidad de la solución propuesta para ampliar las fuentes de agua de la ciudad, fue evaluada en función de criterios de sostenibilidad, evaluación que concluye con la postulación de la Teoría de los Estados Límites y la medición de los años de vida sostenibles como mecanismo de análisis.

El presente estudio comprendió la identificación de a las instituciones involucradas en la gestión hídrica de la ciudad de Lima, la revisión de fuentes bibliográficas, visita a diferentes instalaciones vinculadas al sistema de saneamiento de la ciudad de Lima y entrevistas a profesionales del sector privado y público vinculado al quehacer nacional del agua.

La conclusión, tratar a nivel potable el agua residual que hoy se vierte al mar para su reúso en la recarga del acuífero de la ciudad de Lima es lo más cerca de la sostenibilidad que podremos estar. La solución propuesta es la mejor alternativa, es una práctica en muchas ciudades del mundo que sufren de escasez de agua y es la solución adecuada para una mayor sostenibilidad hídrica de la ciudad.

EL plan de SEDAPAL de aumentar la oferta de agua mediante trasvases, derivaciones, mejora de redes y embalses es necesario, viable y costoso pero la oferta adicional de agua potable sería copada a lo sumo en 25 años. La recarga del acuífero es urgente y le brindará a la ciudad 22 años más de horizonte de abastecimiento hídrico, pero aun así, la posibilidad de alcanzar el valor límite de 100 l/d día per cápita entregado a cada usuario se alcanzará en aproximadamente 100 años.

La ciudad de Lima tiene fecha límite y está es de 100 años, por lo que el futuro sostenible se deberá buscar más allá de las fronteras de la ciudad y exigirá finalmente refundar la ciudad.

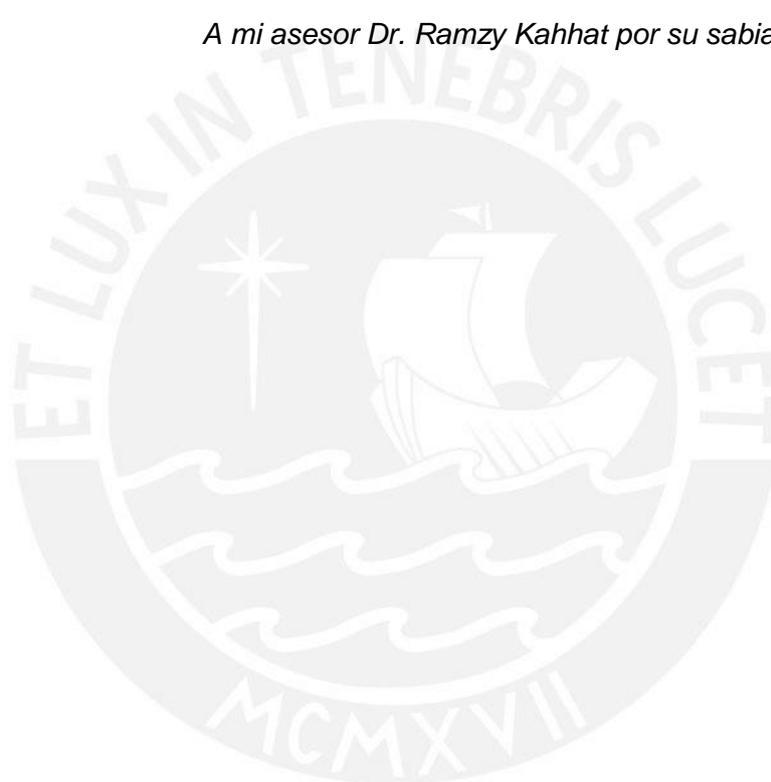
Agradecimientos

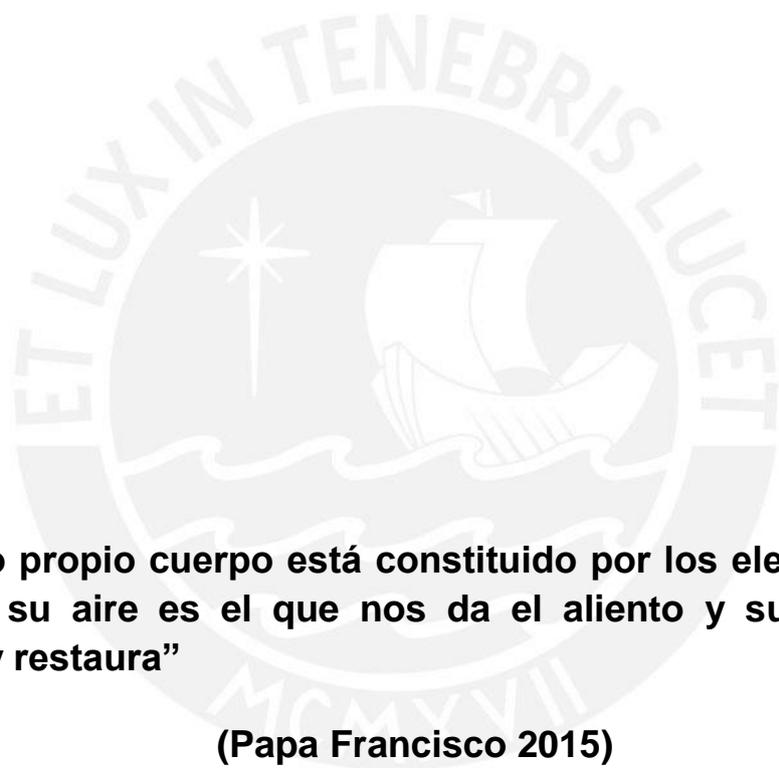
A mi esposa Sandra por su apoyo incondicional

A mi madre Mercedes que nunca dejo de creer

A mis hijos Franceso, Bianca y Franco por su solidaridad

A mi asesor Dr. Ramzy Kahhat por su sabia y paciente guía





“Nuestro propio cuerpo está constituido por los elementos del planeta, su aire es el que nos da el aliento y su agua nos vivifica y restaura”

(Papa Francisco 2015)

INDICE

1.	Introducción y Justificación.....	1
1.1	Introducción	1
1.2	Justificación	2
2.	Objetivos y Metodología.....	5
2.1	Objetivos.....	5
2.2	Metodología	5
2.2.1	Ayuda memoria de la investigación	5
2.2.2	Identificación de variables	8
2.2.3	Procedimiento de recolección de datos para la investigación	9
2.2.4	Bibliografía para el análisis de la brecha hídrica de la ciudad de Lima	11
2.2.5	Ubicación más aparente para Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARS).....	12
3.	Revisión de la Literatura.....	13
3.1	Situación Hídrica de Lima	13
3.2	Fuentes de Agua de la Ciudad de Lima	17
3.2.1	Pérdidas en el Suministro de Agua Potable en Lima	18
3.2.2	Nuevas Fuentes de Agua.....	19
3.3	El Acuífero de la Ciudad de Lima	20
3.3.1	Descripción del Acuífero.....	20
3.3.2	Situación Actual del Acuífero de Lima	21
3.3.3	Recarga del Acuífero de Lima	24
3.4	Recarga Artificial de Acuíferos	29
3.4.1	Recarga de Acuíferos Mediante el Uso de Agua Residual Tratada	31
3.4.2	Calidad del Agua para la Recarga de Acuíferos	33

3.4.3	Factores determinantes para la implementación de sistemas IPR.....	35
3.4.4	Ejemplos de sistemas de recuperación de acuíferos mediante el uso de agua residual tratada.....	35
3.4.5	Normas y Regulaciones	37
3.5	Cuenca del río Rímac.....	38
3.5.1	Descripción	38
3.5.2	Hidrografía	39
3.5.3	Hidrología.....	39
3.5.4	Balance Hídrico del Río Rímac.....	41
3.5.5	Calidad de las fuentes de Agua para Lima	41
3.6	Desarrollo Sostenible y Soluciones para la ciudad de Lima	42
3.6.1	Antecedentes del Desarrollo Sostenible	42
3.6.2	Desarrollo Sostenible ¿Paradoja o Paradigma?	44
3.6.3	Sostenibilidad y Sostenibilización	44
3.6.4	Evaluación la Sostenibilidad Hídrica.....	45
3.6.5	Indicadores de sostenibilidad hídrica.....	46
3.6.6	Postergar lo inevitable.....	49
3.6.7	Gestión Hídrica Sostenible	50
3.6.8	Integración en la Gestión del Agua.....	51
3.7	Escasez de Agua y Estrés Hídrico	51
3.8	Requerimiento Hídrico por persona.....	52
3.9	Situación Hídrica Global.....	53
4	Resultados	56
4.1	Caracterización Lima Metropolitana y Callao	56
4.1.1	Localización y Ámbito Geográfico.....	56

4.2	Oferta y Demanda hídrica de la ciudad de Lima.....	57
4.2.1	Oferta Hídrica para la ciudad de Lima	57
4.2.2	Demanda hídrica de la ciudad de Lima Metropolitana y Callao	58
4.2.3	Proyección del crecimiento poblacional y de la demanda.....	59
4.2.4	Crecimiento de la demanda.....	60
4.3	Balance de las fuentes de agua para Lima.....	60
4.4	Proyectos de inversión para ampliación de fuentes de agua.....	61
4.5	Sostenibilidad hídrica de la ciudad de Lima.....	62
4.5.1	Inversión Proyectada.....	63
4.5.2	Sostenibilidad del 2040 en adelante	64
4.5.3	Recarga del Acuífero de Lima como Solución Sostenible.....	65
4.6	Delimitación de Sector para la Evaluación de situación Hídrica de la ciudad de Lima.....	65
4.6.1	Delimitación de Sector.....	66
4.6.2	Demanda de Agua Potable	70
4.6.3	Áreas verdes públicas en los distritos del sector.	72
4.6.4	Resumen de las principales características de sector bajo análisis.	73
4.7	Ubicación de sistemas de recarga de acuíferos	73
4.7.1	Parámetros de Diseño Preliminar	74
4.7.2	Distancia para ubicación de zonas de inyección o infiltración en el acuífero de Lima:	75
4.7.3	Capacidad de Infiltración	76
4.7.4	Ubicación de PTARS y pozos de inyección	77
	Como resultado final se identificaron 6 zonas aparentes para la implementación ..	77
4.7.5	Características de las zonas seleccionadas	77

4.8	Resumen de Resultados	79
5	Discusión de Resultados	80
5.1	Viabilidad Técnica	81
5.2	Teoría de los Estados Límites	83
5.2.1	Discusión académica.....	83
5.2.2	Límite de la Sostenibilidad.....	85
5.2.3	La Sostenibilidad al Límite de la Teoría del Caos	86
5.2.4	Teoría de los Estados Límites	87
5.2.5	Tiempo de vida sostenible y Estado Límite.....	87
5.2.6	Medir para mejorar	88
5.2.7	Medir para para elegir	88
5.2.8	Condiciones de Estado Límite	88
5.3	Caso de aplicación de la Teoría de los Estados Límites.....	89
5.3.1	Análisis de sostenibilidad Hídrica de la ciudad de Lima.....	89
6	Conclusiones.....	92
7	Referencias	94
8	ANEXOS, en versión digital	

Índice de tablas

Tabla 2.1: Evolución de las hipótesis durante el proceso de investigación	6
Tabla 2.2: Variables relevantes para la evaluación de la viabilidad técnica de la recarga del acuífero de Lima con aguas residuales tratadas.	8
Tabla 2.3: Principales actores en la gestión hídrica de la ciudad de Lima.	9
Tabla 2.4: Entrevistas realizadas.....	10
Tabla 2.5: Inspecciones oculares en campo.....	11
Tabla 3.1: Disponibilidad de agua en algunas ciudades de Latinoamérica.	14
Tabla 3.2: Experiencias Globales en MAR.....	29
Tabla 3.3: Tipos de Recarga Artificial de Acuíferos.	30
Tabla 3.4: Ejemplo de ciudades que recargan su acuífero con aguas residuales tratadas para su posterior reúso potable.....	37
Tabla 3.5: Persistencia de las descargas medias mensuales (m^3/s) – Estación Chosica	40
Tabla 3.6: Indicadores de Sostenibilidad Hídrica.	48
Tabla 3.7: Indicador de Estrés Hídrico.....	52
Tabla 3.8: Recursos Hídricos Totales de algunos países	55
Tabla 4.1: Características generales de la ciudad de Lima.....	56
Tabla 4.2: Oferta Hídrica Anual del Río Rímac.	57
Tabla 4.3: Proyección de población de Lima Metropolitana	59
Tabla 4.4: Tasa de crecimiento promedio anual de Lima de la población censada 1940, 1961, 1972, 1981, 1993, 2007.....	59
Tabla 4.5: Tasas de crecimiento geométrico medio anual según departamentos 1995-2015	59
Tabla 4.6: Balance Hídrico durante periodo de estiaje (m^3/s)	61
Tabla 4.7: Proyectos de Inversión en Infraestructura para ampliación de fuentes de agua para Lima.	62

Tabla 4.8: Costos proyectados de inversión en infraestructura para nuevas fuentes de agua para Lima.	64
Tabla 4.9: Proyección de incremento de costo de dotar a Lima de 1 m ³ /s por cada mes de cobertura.	65
Tabla 4.10: Distribución de áreas y población de sector bajo análisis en comparación con los totales distritales.....	66
Tabla 4.11: Resumen de requerimiento de agua diarios en los distritos de Lima dentro del sector en estudio.	70
Tabla 4.12: Áreas en el distrito. Fuentes: Atlas de Lima, Sedapal 2014.....	71
Tabla 4.13: Población en el Distrito y en el Sector.....	72
Tabla 4.14: Áreas verdes distritales.....	72
Tabla 4.15: Principales características de sector bajo análisis en comparación con Lima Metropolitana.	73
Tabla 4.16: Parámetros para recarga de Acuíferos según norma mexicana.....	75
Tabla 4.17: Calidad del Agua de Recarga.....	75
Tabla 4.18: Distancia mínima para ubicación de puntos de recarga de acuífero de Lima con aguas residuales tratadas.....	76
Tabla 4.19: Capacidad de Infiltración en diversos tipos de suelo.....	76
Tabla 4.20: Relación de zonas aparentes para la implementación de pozos de recarga del acuífero en el sector.	77
Tabla 4.21: Cálculo de disponibilidad de aguas residuales en el Sector:	79
Tabla 4.22: Potencial de captación de aguas residuales con la finalidad de potabilización para recarga artificial del acuífero de Lima.	79
Tabla 5.1: Situación de Estado Límite a Evaluar.....	89
Tabla 5.2: Matriz de Ingreso de parámetros para el cálculo de tiempo de vida sostenible, escenario conservador.	90
Tabla 5.3: Resultados de tiempos de vida de sostenibilidad hídrica para Lima.....	91

Índice de Figuras

Figura 2.1: Evaluación de la viabilidad de la recarga del acuífero de Lima con aguas residuales tratadas	7
Figura 2.2: Procesos del sistema complejo para implementación de nuevas fuentes de agua.	7
Figura 2.4: Proceso de identificación de lugares aparentes para la implementación de sistemas de recarga del acuífero de Lima en el sector de análisis.	12
Figura 3.1 Proyección de brecha hídrica (%) para la ciudad de Lima en época de estiaje.....	15
Figura 3.2: Cuenca Alta del Río Rímac.....	17
Figura 3.3: Represa Marca III (Huascacocha), al 100% de agua.....	19
Figura 3.4: Vista Oeste-Este de Los Pantanos de Villa.....	21
Figura 3.5: Foto de la Costa Verde en los años 20.....	23
Figura 3.6: Variación de los niveles piezométricos de los pozos explotados por SEDAPAL.....	24
Figura 3.7: Caudales de recarga del acuífero de Lima (m ³ /s).....	25
Figura 3.8: Pantallas transversales al río Rímac para favorecer la recarga del acuífero.....	26
Figura 3.9: Vista Norte Sur de Pantallas pantallas transversales río Rímac.....	26
Figura 3.10: Atenuación de patógenos fecales por la infiltración de aguas residuales en la zona no saturada.	34
Figura 3.11: Persistencia de las descargas medias mensuales (m ³ /s).....	40
Figura 3.12: Balance Hídrico	41
Figura 3.13: Crecimiento población Mundial	53
Figura 4.1: Foto de diario El Comercio, Mayo del 2015: Falta de servicios de agua potable en Carabayllo y El Agustino Lima.....	58
Figura 4.2: Perú: consumo de agua por habitante-Servicio de Agua Potable y alcantarillado de Lima S.A., 1996-2013.	60

Figura 4.3: Ubicación de sector de análisis para evaluación de la viabilidad de las soluciones de reúso de aguas residuales.....	67
Figura 4.4: Ubicación distrital del Sector.....	68
Figura 4.5: Red de alcantarillado primario en los sectores tributarios de la red de alcantarillado del colector Surco.	69
Figura 4.6: Ubicación tentativa de plantas de tratamiento de agua residual.	78
Figura 5.1: Gráfico de estados límites y curvas de oferta - demanda.....	90

Relación de Tablas y Figuras en Anexo, en versión digital:

Tabla 8.1: Consideraciones de diseño EPA para sistemas de IPR (Indirect Potable Reuse). Anexos en versión digital	
Tabla 8.2: Parámetros de referencia para IPR. Anexos en versión digital.	
Figura 8.1: Morfología del Acuífero de Lima en 1997.	
Figura 8.2: Profundidad de la napa freática del acuífero de Lima en 1997.	
Figura 8.3: Descenso del nivel de la napa freática a acumulada a 1997.	
Figura 8.4: Explotación de las aguas subterráneas con pozos de SEDAPAL y variación de la Napa Freática en pozo representativo (p-156 Zarate 3).	
Figura 8.5: Ficha Técnica PTAR 1.	
Figura 8.6: Ficha Técnica PTARS 2,3,4.	
Figura 8.7: Ficha Técnica PTAR 5 A9.	
Figura 8.8: Ficha Técnica PTAR 6 A10.	
Figura 8.9: Plano de ubicación Sector.	
Figura 8.10: Plano de ubicación del sector en relación a la cuenca del río Rímac.	
Figura 8.11: Plano de ubicación de El Sector con distritos.	

1. Introducción y Justificación

1.1 Introducción

Los días de la humanidad tal como la conocemos estarían con el tiempo contado. El prominente científico australiano Frank Fenner predijo en el 2010 que el *homo sapiens* no será capaz de sobrevivir a la explosión demográfica, al consumo desenfrenado y al cambio climático. Estimó en cien años el tiempo para la extinción de la humanidad. Esta visión apocalíptica denota la misma preocupación por la naturaleza finita de los recursos naturales, resaltada en 1972 por la publicación "The Limits to Growth" (Meadows, Randers, Behrens).

La incidencia de la explosión demográfica sobre la capacidad de sustento de la biosfera es particularmente crítica en el caso del agua dulce, ya que a pesar de ser un recurso renovable es escaso e insuficiente en muchas zonas del orbe. Entender los factores relevantes que originan la limitación de su disponibilidad es indispensable para gestionar soluciones a su escasez.

Como individuos y sociedad, requerimos aplicar el mejor juicio experto que nos sea posible para resolver los problemas relacionados con la disponibilidad del agua. La práctica usual de evaluación económica independiente de valoraciones ambientales y sociales ya no es adecuada.

La reciente publicación de la primera encíclica del Papa Francisco, titulada "Laudato Si" (El cuidado de la casa común), alerta sobre los problemas ambientales que aquejan al mundo y reflexiona sobre el acceso limitado al agua: *"La provisión de agua permaneció relativamente constante durante mucho tiempo, pero ahora en muchos lugares la demanda supera a la oferta sostenible, con graves consecuencias a corto y largo término"* (2015, p.25).

El uso sostenible del agua es una meta común, sin embargo, la realidad es que tarde o temprano la demanda desbordará la oferta, salvo se logre la hipotética tasa de crecimiento poblacional cero, el agua dulce en el planeta será insuficiente.

La dramática situación descrita, ya ocurre en la actualidad en la ciudad de Lima, donde el déficit hídrico actual no permite atender los requerimientos de agua potable de cerca de 800,000 limeños, a pesar de las cuantiosas inversiones orientadas a resolver el problema y que comprenden obras de regulación y trasvases de cuencas vecinas (Mantaro, Chillón y Lurín), nuevas plantas de tratamiento para agua potable (Huachipa), la implementación de emisarios submarinos (Taboada y La Chira) entre otros. (SEDAPAL 2014). Obras que como se mostrará en la presente tesis han sido insuficientes para resolver el déficit hídrico de la ciudad.

En la situación actual de escasez hídrica, la ciudad de Lima vierte al Océano Pacífico más de 20 m³/s de efluentes de tratamiento primario de la red aguas residuales de la ciudad para su dispersión en el mar, volumen de agua suficiente como para irrigar 20 mil has de terrenos agrícolas y que tratado y reusado contribuiría de forma significativa a resolver los problemas de la ciudad a largo plazo.

Por lo expuesto, la presente Tesis pone en duda la idoneidad y suficiencia de las soluciones de ingeniería implementadas para resolver la problemática hídrica de la ciudad de Lima y tiene por objetivo evaluar la viabilidad técnica de la recarga del acuífero de Lima mediante el uso de aguas residuales tratadas para ampliar las fuentes de agua dulce con que cuenta actualmente la ciudad

Se abordará también el problema subyacente: La calidad de los criterios utilizados para elegir soluciones más adecuadas, por lo que entender los límites que tiene la sostenibilidad hídrica de Lima permitirá mejorar los mecanismos y criterios de selección de futuros proyectos de inversión.

1.2 Justificación

El agua dulce es un recurso natural que a pesar de ser renovable es limitado, solo el 0.7% del total de agua en el planeta es disponible para consumo por su accesibilidad superficial o subterránea, del cual el 70% se destina al uso agrícola (PNUMA 2002). La ONU (Organización de Naciones Unidas) estima que para el 2025 cerca de 1800 millones de seres humanos vivirán en regiones de absoluta escasez de agua (2013).

La escasez de agua limita el desarrollo económico y social del ser humano, por ser esencial para sostener la demanda alimentaria y la producción de bienes y servicios destinados para atender la demanda concentrada en las zonas urbanas (ONU, 2015)

La demanda de agua depende principalmente de la tasa de crecimiento poblacional y de la eficiencia del uso de la misma. En las grandes ciudades el crecimiento poblacional no está solamente determinado por las tasas de reproducción sino, generalmente por la migración del campo a la ciudad. Se estima que en la actualidad a nivel global cerca de 200,000 personas migran diariamente del campo a las ciudades, unas 11,000 personas lo hacen diariamente en Latinoamérica (UNFPA, 2007). Los estimados de población mundial urbana para el 2014 fueron de 54% del total, es decir 3,900 millones de personas (UN, 2014).

El cálculo de la brecha entre la oferta y la demanda de agua a nivel global será de 40% para el 2030 (The Water Resource Group, 2012) y será en las ciudades donde la escasez de agua resultará más crítica.

La ciudad de Lima no es ajena a esta problemática, es considerada entre las 20 ciudades con mayor estrés hídrico del mundo (The Nature Conservancy, 2014). Lima está próxima a contar con 10 millones de habitantes (9'780,752 según proyecciones de INEI a Enero del 2015), que representan el 32% de la población total nacional.

La ciudad de Lima es después de El Cairo la segunda ciudad más grande del mundo ubicada en un desierto, con más de 12 millones de habitantes. A diferencia de El Cairo que está asentada al pie del Nilo que la provee con más de 2,800 m³/s, la ciudad de Lima sólo cuenta mayoritariamente con las aguas del río Rímac de caudal medio anual de 31 m³/s (ANA 2010).

El abastecimiento hídrico de Lima tiene actualmente un déficit de 3.3 m³/s, caudal que no considera a los cerca de 800,000 limeños que no cuentan con acceso a la red de agua potable (Sedapal 2014), por lo que el déficit real es sustantivamente mayor y se aumentará por los efectos del cambio climático.

El Centro Tyndall de Inglaterra para la Investigación del Cambio Climático considera que el Perú se encuentra en el tercer lugar de las zonas más vulnerables a los impactos del cambio climático, después de Bangladesh y Honduras, en lo relacionado a precipitaciones y disponibilidad de agua (Agnew, Eriksen M. 2004). Los efectos del cambio supondrían reducciones de hasta 10% de las precipitaciones sobre las cuencas del Río Rímac y del Río Chillón que abastecen de agua a la Ciudad de Lima (SENAMHI 2010), impacto que se sumaría a la crítica situación de desglaciación de los nevados tropicales de los Andes Peruanos (Secretaría General de la Comunidad Andina et al, 2007).

Resulta irónico que siendo el Perú uno de los países con mayores recursos hídricos a nivel global (2'046,587 millones de m³/año), ocupe el puesto 59 de los países con estrés hídrico (Reig, Maddocks, & Gassert, 2013), ello se debe a la distribución desigual del agua: el 98% está en la sierra y selva, mientras que en la vertiente del Pacífico, donde vive el 70% de la población sólo se cuenta con el 1.8% de los recursos hídricos (37,363 millones de m³/año) (ANA 2010).

En general, hay consenso que el principal recurso a gestionar para garantizar el desarrollo sostenible en el Perú y el Mundo es "El Agua" y la ciudad de Lima presenta una de las situaciones más críticas a nivel global.

El Perú requiere del agua para afianzar el desarrollo económico mediante la agricultura, la minería y el desarrollo urbano. Las zonas costeras del Perú son

las que sufren de escasez de agua, y es donde la población concentra sus actividades en torno a ciudades altamente demandantes de agua (2030 Water Resource Group, 2015).

La situación descrita obliga a reformular la cultura existente del agua y a adoptar un enfoque integral de los criterios de gestión de los recursos hídricos a través de ciclos de mejora continua y de manejo adaptativo.

En la actualidad, las unidades naturales de evaluación y gestión adecuada de los recursos hídricos son las cuencas hidrográficas, las cuales deben ser estudiadas y gestionadas a efectos de identificar las causas de las limitaciones de disponibilidad, para anticipar la futura escasez o condiciones de estrés hídrico. Mitigar los impactos de la escasez o eventualmente evitarlos exigirá integrar al análisis de la cuenca, las aguas residuales generadas y tratadas en ella ya que son una fuente adicional de agua dulce, sólo así la gestión del recurso hídrico será sostenible.

Entendemos la definición clásica de desarrollo sostenible a la contenida en el Informe Brundtland de 1987: “*satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin afectar las capacidades de las generaciones futuras*” (World Commission on Environment and Development, 1987) de forma tal que la interacción del hombre con su entorno sea ecológica, económica, social y políticamente armónico a lo largo del tiempo y territorio.

Los recursos hídricos son insumos directos para la subsistencia del ser humano, la producción alimentaria, e insumos indirectos para una amplia gama de bienes y servicios que las sociedades modernas consumen (hoy denominada agua virtual). Su rol en los modelos de desarrollo sostenible y en la gestión del saneamiento ambiental resulta determinante para el desarrollo económico y la reducción de la pobreza.

El suministro de agua potable y la gestión de las aguas residuales son componentes del saneamiento ambiental que definen la gestión de sostenibilidad del recurso hídrico y deben evaluarse de forma integral, con miras a resolver la problemática de escasez hídrica de las urbes de hoy.

2. Objetivos y Metodología

2.1 Objetivos

El presente trabajo de investigación aborda el reto de evaluar la sostenibilidad y viabilidad técnica de la recarga del acuífero de la ciudad de Lima mediante el uso de aguas residuales tratadas, para su posterior recuperación y reúso como fuente de agua potable.

El logro del objetivo propuesto exige comprender con amplitud la situación hídrica actual de la ciudad y su proyección a futuro. Tiene por finalidad contribuir al cierre de la brecha hídrica de la ciudad de Lima a través de la evaluación de la posibilidad de implementación de soluciones tecnológicas aplicadas con éxito en otras ciudades del mundo, como son las de reúso indirecto para agua potable (Indirect Potable Reuse), conjunto de prácticas que comprenden la recarga de los acuíferos.

2.2 Metodología

El objetivo de la investigación requirió de la aplicación de una metodología no convencional, que se adaptará a la evolución de las hipótesis durante el proceso de investigación.

El proceso de investigación seguido, permitió la adecuación del objetivo inicial que fue la búsqueda de soluciones sostenibles para la situación de déficit hídrico de la ciudad de Lima al objetivo señalado en el ítem 2.1.

La metodología seguida para la obtención del resultado exhibido corresponde formalmente a la de una investigación mixta, es decir se utilizó la metodología cuantitativa de forma intercalada con la metodología cualitativa, el cual facilitó la reformulación de las hipótesis iniciales, para alcanzar el objetivo de plantear soluciones sostenibles para el futuro hídrico de la Ciudad. El proceso de evolución de las hipótesis y objetivos se muestra en la tabla 2.1.

2.2.1 Ayuda memoria de la investigación

El objetivo fue identificado inicialmente como la búsqueda de soluciones sostenibles para la situación hídrica de la ciudad de Lima como opción al vertimiento marino de las aguas residuales de la ciudad. En el principio del proceso de investigación no se tenía identificado con claridad la grave situación de escasez hídrica de la ciudad.

Durante el proceso de investigación, que comprendió el análisis de la situación de la ciudad de Lima y la investigación de soluciones adoptadas por otras ciudades para lidiar con la escasez de agua, se optó por la recarga del acuífero

de Lima como solución ideal a la crisis hídrica de la ciudad de Lima, proceso que exigió la redefinición del objetivo y la adecuación de los criterios más adecuados para evaluar la viabilidad técnica y de sostenibilidad de la solución propuesta.

Tabla 2.1: Evolución de las hipótesis durante el proceso de investigación

	HIPOTESIS	OBJETIVOS	AVANCES DE RESULTADOS
I	La ciudad de Lima puede darle mejor usos a las aguas residuales que actualmente vierte al mar con poco o ningún tratamiento y sin ningún reúso previo.	Alternativas al vertimiento al mar de la ciudad de Lima de agua residuales	Se identifica el principal problema de aguas de la ciudad: El déficit Hídrico. Se identifica la solución de recargar aguas del acuífero de Lima aplicada en otras ciudades del mundo con solución con potencial.
II	Reúso de aguas residuales tratadas como medio para la sostenibilidad de los recursos hídricos de la ciudad de Lima.	La gestión sostenible del agua en la ciudad de Lima	Se identifican y analizan los principales criterios a emplear para la evaluación de la opción elegida: Sostenibilidad, gestión Integrada y manejo adaptativo.
III	La recarga del acuífero de Lima mediante el uso de aguas residuales tratadas	La viabilidad técnica y de sostenibilidad de la solución propuesta.	Se acepta y comprueba la viabilidad de la solución
IV	La recarga del acuífero de Lima con aguas residuales tratadas reduciría la brecha hídrica a futuro.	Evaluar el horizonte temporal de la solución elegida.	Se definen conceptos de “Tiempo de vida Sostenible” y “Estados Límites”

El proceso de investigación de la viabilidad técnica de la recarga del acuífero de Lima, que se muestra en la figura 2.1, se focalizó en analizar los alcances de la tecnología propuesta en función de las experiencias en otras ciudades del mundo que atraviesan por situaciones similares y que ya han implementado este tipo de soluciones y en la determinación de las variables técnicas que se deben evaluar para determinar la factibilidad de la propuesta.

La idoneidad de la solución propuesta fue desarrollada en función de los criterios de sostenibilidad, gestión integral y manejo adaptativo. La evaluación concluye con la postulación de la “Teoría de los Estados Límites” como mecanismo para analizar la validez de la propuesta y determinar lo que en el

presente estudio se denomina “Tiempo de vida sostenible” que para el caso de análisis es el periodo de tiempo de suficiencia hídrica que la solución propuesta brindará a la ciudad de Lima.

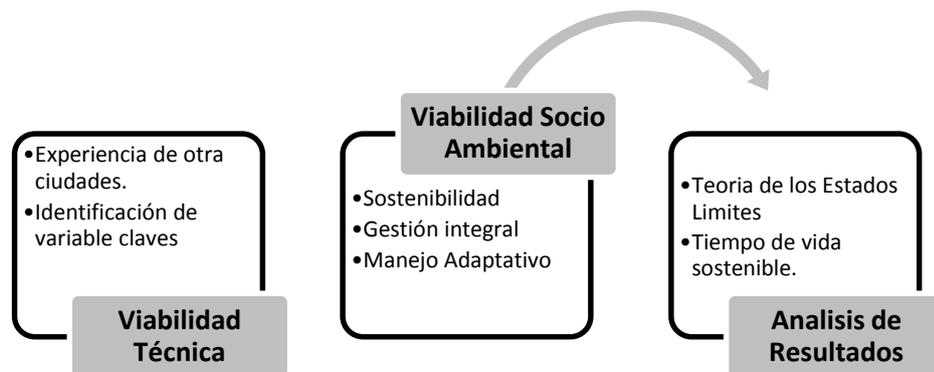


Figura 2.1: Evaluación de la viabilidad de la recarga del acuífero de Lima con aguas residuales tratadas

Finalmente, luego de determinada la viabilidad de la propuesta planteada, se seleccionó un sector de la ciudad de Lima como “volumen control” al que definimos como: El área de la ciudad tributaria del colector de aguas servidas denominado colector “Surco” que desagua en la playa La Chira, para los efectos de evaluar la posibilidad de implementar la solución.

La justificación del procedimiento seguido para poder plantear la propuesta de la recarga del acuífero de Lima mediante el uso de aguas residuales tratadas, está en la naturaleza compleja del sistema de abastecimiento de agua a la ciudad de Lima (Teoría del Caos), la dependencia de múltiples variables interrelacionadas y de complejos procesos técnicos, económicos, políticos, sociales y ambientales como resume la figura 2.2, obligaron al desarrollo de nuevos criterios de evaluación durante el proceso de investigación.



Figura 2.2: Procesos del sistema complejo para implementación de nuevas fuentes de agua.

2.2.2 Identificación de variables

Se han identificado las variables definidas como relevantes para la investigación, en función de las principales utilizadas en los balances hídricos tradicionales y en los análisis de tratamiento y reúso de aguas de diversas ciudades a los que se ha tenido acceso durante el proceso de revisión de la literatura y que se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Variables relevantes para la evaluación de la viabilidad técnica de la recarga del acuífero de Lima con aguas residuales tratadas.

Variable	Identificación	Utilidad
Oferta hídrica	Variable típica en balances hídricos.	Determinación de la brecha hídrica.
Demanda hídrica		
Áreas verdes Municipales	Variable típica para determinación de demanda de agua en riego de parques y jardines.	Permitirá evaluar la posibilidad de sustituir las fuentes de agua actualmente usadas por aguas residuales tratadas.
Tratamiento y reúso de agua residual	Variables típicas de análisis de eficiencia en la gestión de agua de las ciudades.	Permitirá conocer y proyectar la oferta y calidad de aguas residuales.
Capacidad del acuífero de Lima	Esta variable se ha identificado en función de su relevancia en los diversos estudios del acuífero de Lima	Permitirá conocer la capacidad de recarga del acuífero de Lima.
Densidad y tasa de crecimiento poblacional	Se entiende que el crecimiento de la demanda hídrica depende de la rapidez con que crece la ciudad.	Permitirán proyectar el nivel de la brecha hídrica a futuro.
Área territorial	Variable útil para comparar ratios de consumo de diferentes zonas urbanas.	Relevante para proyectar valores de demanda hídrica por metro cuadrado de suelo urbano.

2.2.3 Procedimiento de recolección de datos para la investigación

La recolección de datos se inició con la identificación de los principales actores de la gestión hídrica, se realizó entrevistas y el reconocimiento físico de algunas instalaciones y se complementó con revisión de fuentes bibliográficas.

Identificación de los actores en la gestión hídrica: Se han identificado a las instituciones involucradas en la gestión Hídrica de la ciudad de Lima, entre las que se identificó como principales, las que se detallan en la tabla 2.3:

Tabla 2.3: Principales actores en la gestión hídrica de la ciudad de Lima.

INSTITUCIÓN	SIGLAS	FUNCION
Autoridad Nacional del Agua	ANA	Establece la política y estrategia nacional en recursos Hídricos.
Servicio de Agua potable y Alcantarillado de Lima	SEDAPAL	Responsable del suministro de agua potable y servicios de alcantarillado a la ciudad de Lima.
Municipalidad Metropolitana de Lima	MML	Responsable de la gestión de áreas verdes de la ciudad de Lima
Gobiernos Locales de la ciudad de Lima		Lo comprenden los distritos y son finalmente los que tienen la posibilidad de interactuar con los vecinos.
Dirección general de salud Ambiental	DIGESA	Responsable de la evaluación de la aprobación de Estudios de Impacto Ambiental.
Gobierno Regional de Lima	GRL	Funciones asumidas por la Municipalidad de Lima para el caso de Lima Metropolitana.
Servicio de parques de Lima	SERPAR	Dependencia de la MML encargada de las áreas verdes.

Revisión de Fuentes bibliográficas: Se revisaron diversas fuentes bibliográficas, las mismas que se pueden agrupar según su origen en: publicaciones científicas, información oficial de instituciones relacionadas a la gestión hídrica, estudios realizados por diversas entidades nacionales e internacionales y organizaciones internacionales gubernamentales tales como la ONU, el Banco Mundial, la UNESCO e instituciones no gubernamentales como Proyecto Lima Water (LIWA), la WWF, intergubernamentales como la Global Water Partnership (GWP) así como informes técnicos de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL),

Otros tipos de fuentes consultadas fueron revistas científicas e informes de diversas instituciones nacionales que son referidos a temas como: censo de PTARS (Plantas de tratamiento de aguas residuales), censo de áreas verdes y evaluación de proyectos de aguas residuales en marcha. Asimismo, se consultó diversa bibliografía que contiene la descripción teórica de conceptos útiles para el análisis de la problemática como son los conceptos de territorialidad, gobernanza, sistema de gestión ambiental local, marco jurídico local, e instrumentos de gestión local.

Entrevistas y visitas de campo: El proceso de investigación comprendió la visita realizada a diferentes instalaciones vinculadas al sistema de saneamiento de la ciudad de Lima y la entrevista a profesionales del sector privado y público vinculado al quehacer nacional del agua, visitas y reuniones sostenidas tanto durante el periodo de elaboración de la presente tesis como en fechas anteriores a la misma.

Las principales reuniones y visitas a instalaciones se muestran detalladas en las tablas 2.4 y 2.5.

Tabla 2.4: Entrevistas realizadas

AGENTE	INSTITUCION
Autoridades de gobiernos locales	Municipalidades de Santiago de Surco, La Molina y otros.
Funcionarios de instituciones gubernamentales	ANA, ALA, AAA, SEDAPAL
Sector Privado	Empresas de suministro de equipos de tratamiento, usuarios directos de los servicios de saneamiento de la ciudad.

Tabla 2.5: Inspecciones oculares en campo

PLANTA / PROYECTO	DESCRIPCION
Planta La Atarjea	Potabilización de aguas
Planta Taboada	Tratamiento primario de aguas residuales y vertimiento al mar mediante emisario submarino.
Proyecto Inmisario Submarino La Chira	Tratamiento primario de aguas residuales y vertimiento al mar mediante emisario submarino.
PTAR privada de los colegios San Pedro y Villa Cáritas	Planta de tratamiento por fangos activados
PTAR del Golf La Planicie	Laguna de oxidación extendida reforzada con aireadores superficiales
Planta de Tratamiento primario del distrito de Santiago de Surco.	Planta de tratamiento primario (Filtrado), con posibilidad de tratamiento secundario mediante la adición de peróxido de hidrógeno.
Canal Río Surco	Canal de derivación del río Rímac para irrigación de áreas verdes en algunos distritos de la ciudad.

2.2.4 Bibliografía para el análisis de la brecha hídrica de la ciudad de Lima

De la revisión de publicaciones oficiales de diversas instituciones nacionales vinculadas a la gestión de recursos hídricos (ANA, SEDAPAL, SERPAR), se obtuvieron los conceptos y valores para los diferentes parámetros que intervienen en los balances hídricos, los mismos que fueron interpolados para determinar la situación hídrica del volumen control: El área de influencia del colector Surco.

Con respecto a las proyecciones de los balances hídricos a futuro (análisis de la brecha futura), se utilizó la información de Instituto Nacional de Estadística (INEI) para proyección de crecimiento poblacional de la ciudad y del Servicio Nacional de meteorología e Hidrología (SENAMHI) para la obtención de datos relacionados con las precipitaciones y la temperatura y la evapotranspiración requerida para el cálculo de los requerimientos hídricos de las áreas verdes de la ciudad.

El modelamiento de la demanda de recursos hídricos del sector bajo análisis, requirió de la información de las diferentes proyecciones de documentos oficiales de SEDAPAL como: Plan Maestro 2014, Estudios Tarifarios del 2010 y del 2015 y Memorias anuales de los Años: 2005, 2010 y 2012.

El análisis de la situación hídrica de la ciudad de Lima, muestra la información “Recursos Hídricos en La Cuenca del Río Rímac” publicados por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en el 2010 y en 2015.

2.2.5 Ubicación más aparente para Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARS).

Para efectos de evaluar la viabilidad técnica de la recarga del acuífero de Lima en la zona del volumen control, se delimitó y representó en un sistema geo referenciado, las características del mismo, determinadas por el acuífero subyacente, los mapas geográficos, geológicos, hidrogeológicos, redes aguas potable, redes de alcantarillado, ubicación de pozos de extracción de agua y plantas de tratamiento de aguas residuales.

Para ubicar los lugares más aparentes para el tratamiento y posterior inyección de aguas residuales para recargar el acuífero de Lima, se procedió a superponer de forma geo referenciada, la información que se muestra en la figura 2.4, donde las áreas sombreadas en amarillo y rojo indican zonas de exclusión para inyección de aguas residuales tratadas en los entornos de los pozos de extracción según criterios de la norma mexicana.

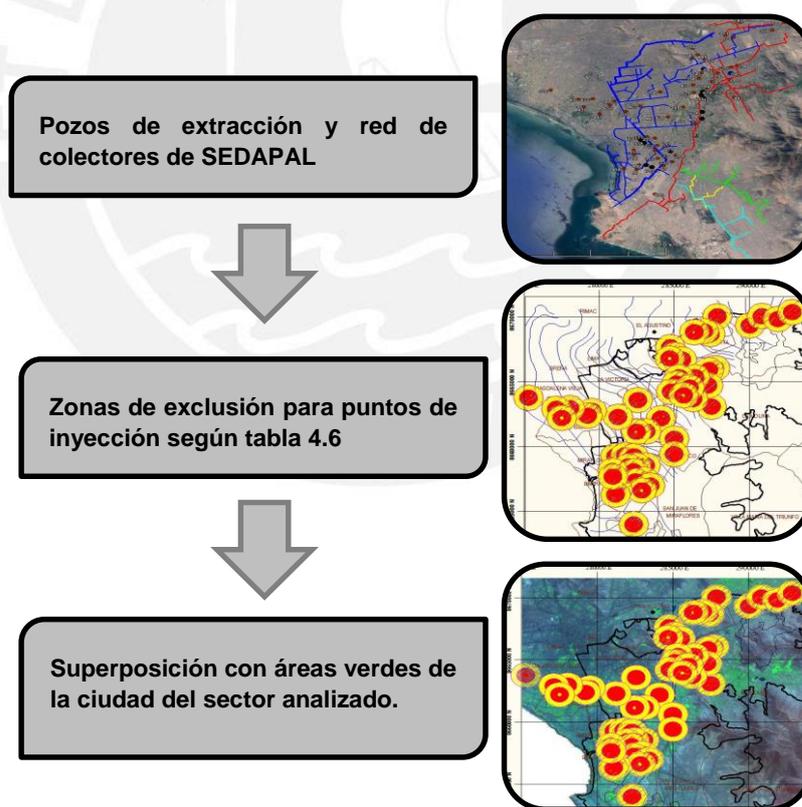


Figura 2.3: Proceso de identificación de lugares aparentes para la implementación de sistemas de recarga del acuífero de Lima en el sector de análisis.

3. Revisión de la Literatura

3.1 Situación Hídrica de Lima

El déficit hídrico actual de la ciudad Lima Metropolitana y Callao es de 3.3 m³/s para los periodos de estiaje, cálculo que no considera que cerca de 800,000 limeños, los de menos recursos, no cuentan con suministro de la red de agua potable y se ven obligados a pagar sobreprecio (SEDAPAL 2014).

Además, el sistema de suministro de agua de la ciudad pierde un estimado de 5.0 m³/s, la cifra de pérdidas por fugas es estimada como el 70% del agua no facturada que es de 30% de 23.63 m³/s para el 2015 (SEDAPAL 2014), la mayor parte por filtraciones de la antigua red de conducción de agua potable. En esta coyuntura, la ciudad de Lima vierte al litoral Pacífico más de 20 m³/s de aguas residuales con poco o ningún tratamiento. Esta es agua suficiente como para irrigar más de 20,000 has de cultivos agrícolas (60% del área de proyecto de irrigación CHAVIMOCHIC).

El equilibrio entre la oferta y la creciente demanda de agua para la ciudad de Lima se da a costa del sacrificio de las condiciones ambientales de la ciudad y de los ciudadanos sin acceso a la red de agua potable. Es así que los déficits actuales tendrán necesariamente que ser cubiertos por la sobreexplotación del acuífero de Lima, por la extracción parcial o total del caudal ecológico de 2 m³/s del río Rímac y por el limitado suministro de 30 l/día por cada limeño sin acceso a la red. Salvo que se opte por reducir las pérdidas en el suministro de agua para la ciudad o viabilizar el acceso a nuevas fuentes de agua (como el reúso de las aguas residuales), la brecha hídrica futura de la ciudad de Lima tendrá que ser previsiblemente cubierta por nuevos y costosos trasvases de la cuenca del río Mantaro alterando el equilibrio hídrico de la cuenca vecina. (SEDAPAL 2014).

Es previsible que la situación hídrica de Lima se agrave por efecto del cambio climático (BID 2014). El SENAMHI ha pronosticado en función de las estadísticas que maneja, incrementos de la temperatura máxima promedio hasta en 1.6° para el 2030, según un informe publicado en el 2010, que supondrían reducciones de hasta 10% de precipitaciones sobre las cuencas altas de los Ríos Rímac y Chillón. La ciudad de Lima cifra su expectativa de suministro hídrico en los patrones de precipitación sobre los sectores alto andinos y en el deshielo de los glaciales que conforman sus principales fuentes de agua durante los periodos de estiaje (ANA 2010).

La creciente población de Lima depende principalmente del río Rímac con un caudal promedio anual de 31 m³/s para su suministro de agua (SEDAPAL 2014) y enfrenta crecientes retos para satisfacer las necesidades de agua

potable y energía de los sectores doméstico e industrial. La brecha de suministro hídrico para la ciudad de Lima proyectada por SEDAPAL para las épocas de estiaje será de 11.69 m³/s para el 2030 y de 13.48 m³/s para el 2040 (Sedapal, 2014, TII p.26).

Para atender la demanda futura de la ciudad se requiere, mejorar la eficiencia en el uso del agua y aumentar la disponibilidad de agua que llega hasta las plantas de tratamiento. (Riveros JC, Germaná C y Alvarez C. 2014). Visión que debe contemplar en adicional el acceso a nuevas fuentes de agua como las aguas residuales tratadas y susceptibles de ser reusadas.

La ciudad de Lima presenta los problemas más serios en Latinoamérica respecto a la disponibilidad de fuentes de agua para abastecer a su población como lo muestra la tabla 3.:

Tabla 3.1: Disponibilidad de agua en algunas ciudades de Latinoamérica. Fuente: LIWA 2014

Ciudad	Población (Mill. Hab.)	Capacidad producción (m ³ /s)	Reservas (Mill. m ³)	Reservas por habitante (m ³ /hab.)	Precipitación (mm/año)	Agua no facturada (%)
Rio de Janeiro	9	52	(sin datos)	0	1170	57
Sao Paulo	25	90	2073	83	1500	37
Santiago de Chile	5.9	24	900	153	384	29
Bogotá	6.5	25	800	123	800	35
Lima	8.6	20	282	33	9	35

SEDAPAL informa que 8% de la población de la ciudad de Lima no tienen acceso al agua potable (2014). Esta población, sin acceso al agua potable, se ve obligada a pagar hasta 10 veces más del valor del agua que recibe, muchas veces en condiciones insalubres.

La Autoridad Nacional del Agua (ANA), alerta que la escasez de agua en Lima es severa (2014). El crecimiento urbano aunado al uso ineficiente del agua agravará la situación, por lo que el gran reto de Lima es satisfacer las necesidades hídricas y energéticas de su creciente población, de su industria y de su cada vez más reducido entorno agrícola. Es previsible que la demanda hídrica se incremente producto de la explosión demográfica y del crecimiento económico. La Figura 3.1 muestra proyección del incremento de la brecha hídrica para el abastecimiento de agua a la ciudad de Lima Metropolitana y Callao de no incrementarse la oferta de fuentes de agua para la ciudad:

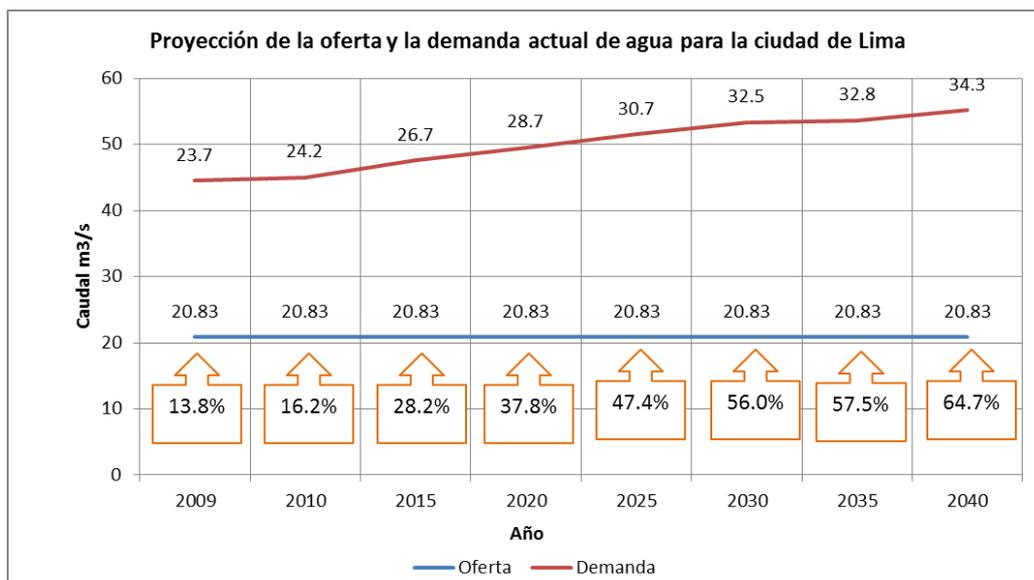


Figura 3.1 Proyección de brecha hídrica (%) para la ciudad de Lima en época de estiaje. Fuente: Adaptación de Antonio Tarazona.

La escasa precipitación media anual de 9 mm obliga a la ciudad de Lima a depender de los recursos hídricos de sus tres ríos: Rímac, Chillón y Lurín, que nacen en la Cordillera de Los Andes, para satisfacer su creciente demanda tanto de agua como de electricidad. El agua y los recursos energéticos son muy dependientes uno del otro, además la red de suministro de agua potable depende de la energía para impulsar las bombas de agua, los sistemas de tratamiento de aguas residuales requieren de energía para los procesos de depuración (bombas, aireadores y otros) asimismo, el suministro energético de la Ciudad de Lima es parcialmente dependiente de las lluvias estacionales para garantizar los caudales de operación a lo largo del año de centrales hidroeléctricas, el déficit se cubre con generadores a gas.

En adicional a la crítica situación antes mencionada, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático - IPCC, prevé una mayor intensidad y frecuencia del fenómeno de El Niño / Oscilación del Sur que impactará en mayor medida a las grandes zonas de aglomeración urbana por su sensibilidad a los déficits hídricos (2007). Esta vulnerabilidad del país ante los efectos del cambio Climático, se reflejaría de forma dramática en la ciudad de Lima, que cifra sus expectativas de suministro hídrico en los patrones de precipitación sobre los sectores alto andinos de las cuencas de los ríos Rímac, Chillón y Lurín y en el deshielo de los glaciales que coinciden con las épocas de estiaje y el trasvase de aguas de la Cuenca del Mantaro.

Los proyectos de trasvase de aguas de la cuenca del Mantaro al Rímac se iniciaron en 1961 con la construcción de un túnel-dren denominado Gratón, obra cuyo objetivo inicial era desaguar un acuífero kárstico para permitir la

explotación minera de Casapalca (SEDAPAL 2014). Si bien el túnel Gratón se ubica físicamente dentro de la cuenca del río Rímac, su cercanía al lindero de la cuenca del Mantaro indica que las filtraciones captadas provienen en parte de la cuenca vecina. Desde su inauguración, el túnel Gratón ha producido en promedio 5 m³/s de agua que es vertida al cauce del Río Blanco, afluente del Rímac. En 1965 el trasvase de aguas de lagunas de la subcuenca alta del río Santa Eulalia recibió el aporte de lagunas más al Noreste (Antacoto, Marcapomacocha, Marcacocha etc.), ubicadas en la cuenca del Mantaro, conocidas como el sistema Marca (Marca I y Marca III), que en conjunto tienen una capacidad de almacenamiento de 157 MMC (SUNASS 2010).

La regulación de la laguna Huascacocha, fue la última obra de trasvase de las aguas de la cuenca del Mantaro, se incorporó el sistema Marca IV en el 2013 y aporta 2.6 m³/s de aguas a la cuenca del Rímac. En la figura 3.2, se muestra la parte alta de la cuenca del río Rímac y la ubicación relativa de la laguna de Huascacocha con respecto a la cuenca del Rímac (cerca de 40 kms.).



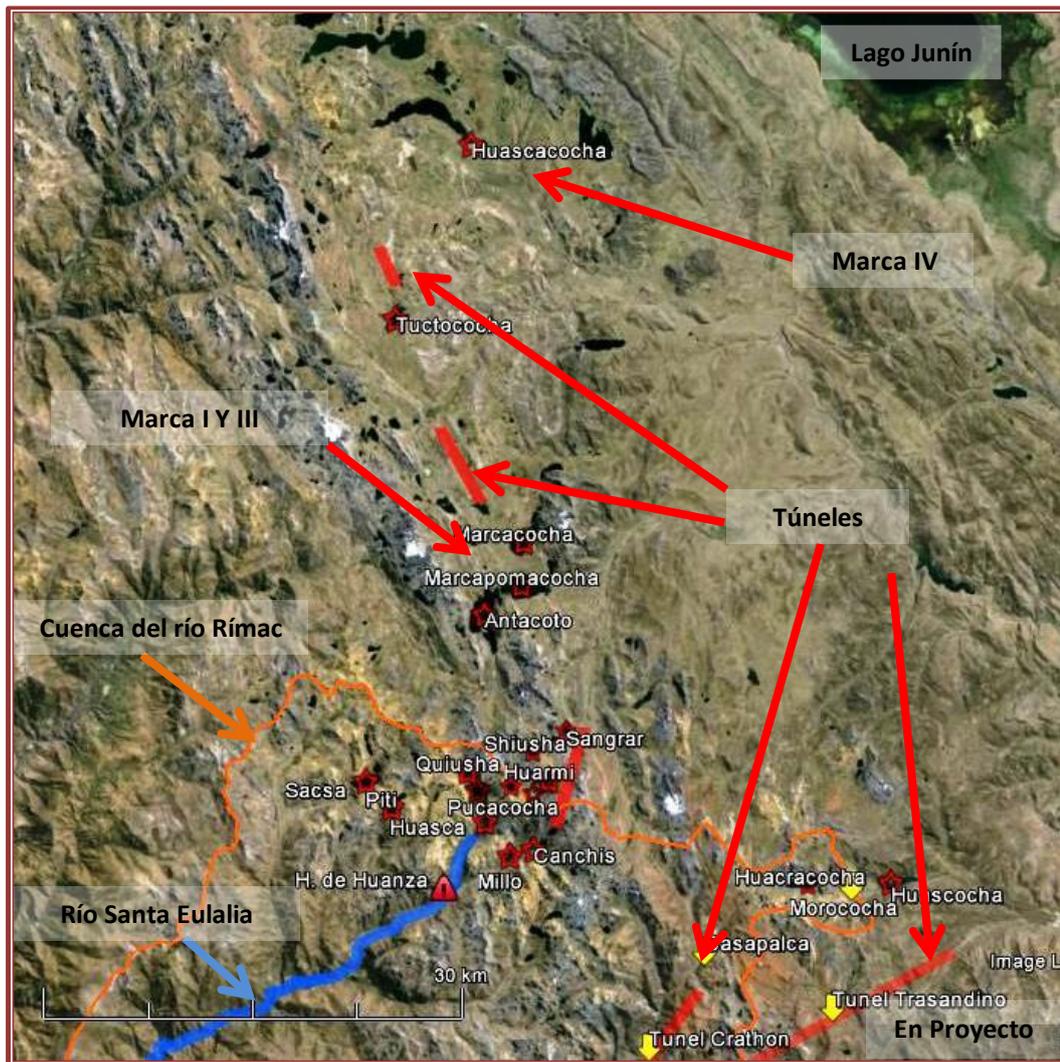


Figura 3.2: Cuenca Alta del Río Rímac. Elaboración propia en base a fuentes: ANA, SEDAPAL y Google Earth.

Las nuevas fuentes de agua que requiere la ciudad de Lima para su subsistencia están cada vez más lejos y resulta evidente que requerirán obras más costosas que comprometerán de forma importante la sostenibilidad de la ciudad de Lima y de las cuencas vecinas.

3.2 Fuentes de Agua de la Ciudad de Lima

Los recursos hídricos, que abastecen a la ciudad de Lima, provienen en un 80% de la cuenca del río Rímac que incluye las fuentes provenientes de las lagunas reguladas en la cuenca alta del río y de las obras de trasvase de aguas de la cuenca del Mantaro (40% de las aguas que discurren por el río Rímac durante el estiaje provienen de trasvases del Mantaro, denominado sistema Marca) y el 20% restante procede de las cuencas de los ríos Chillón y Lurín, incluyendo sus respectivos acuíferos. Los ríos que abastecen de agua a la

ciudad de Lima son de régimen irregular y sus dotaciones anuales no son suficientes para satisfacer la demanda capitalina de 700 millones de m³ anuales (SEDAPAL, 2014).

El agua del río Rímac es empleada para satisfacer requerimientos agrícolas, energéticos, industriales, mineros y humanos de la ciudad de Lima. El ANA los clasifica de acuerdo a su procedencia en cinco tipos (2010): 1) Agua superficial de escurrimiento natural, proveniente de la cuenca del río Rímac, 2) Agua superficial de régimen regulado, proveniente de las lagunas embalsadas en la cuenca del río Rímac. 3) Agua superficial de escurrimiento natural, derivado de la cuenca del río Mantaro, 4) Agua superficial de régimen regulado, proveniente de las lagunas embalsadas en la cuenca del río Mantaro, 5) Agua subterránea, extraída mediante bombeo de los pozos ubicados en el valle del Rímac. Los porcentajes que representa cada fuente de agua son variables a lo largo del año, los caudales del río Rímac pueden abastecer cerca del 85% en épocas de lluvias y el 25% en época de estiaje.

El agua superficial abastece anualmente el 81% del agua potable entregada por SEDAPAL, mientras el otro 19% se abastece con aguas subterráneas provenientes del acuífero de Lima. De hecho, el déficit hídrico de la ciudad de Lima Metropolitana es calculado en 28% más del agua potable que la disponible (Figura 3.1) y se proyecta que hacia el 2040 ascenderá hasta un 65%, de acuerdo con proyecciones de SEDAPAL presentadas en su Plan Maestro del 2014, de no ampliarse las fuentes de aguas.

El importante déficit hídrico de la ciudad de Lima había sido anticipado por los estudios realizados por el proyecto LIWA (Lima Water) en el 2010, al indicar que con una tasa de fugas sin cambios en el resultado en los próximos 5 años generaría escasez de agua. (Seifert, 2009).

3.2.1 Pérdidas en el Suministro de Agua Potable en Lima

El estimado de SEDAPAL para las pérdidas diarias en el 2010 fue de aproximadamente 43% (774,000 m³/día). El objetivo señalado en el Plan Maestro 2014 es de reducción de pérdidas al 29% para el 2015, lo que implica que para el 2015 (después del tratamiento de potabilización) se perderían 197.10 MMC que es el equivalente a 2.5 veces la capacidad de almacenamiento de la laguna regulada de Huascacocha, estimada en 78 MMC.

El crecimiento urbano de las zonas bajas de las cuencas de los ríos Rímac, Chillón y Lurín, y diversas actividades extractivas e industriales amenaza el funcionamiento natural de los ecosistemas y comprometen el suministro hídrico de la ciudad debido a la escasa disponibilidad de agua. Las autoridades competentes han centrado sus esfuerzos en la implementación de proyectos de trasvase de agua de la vertiente del Atlántico a la del Pacífico, tal es el caso de

la laguna de Huascacocha (Figura 3.3) en operación desde el 2013, que pertenece a la cuenca del Mantaro. Transvase que en la actualidad es insuficiente, lo que pone en evidencia que la solución será siempre temporal y requiere ser complementada con la gestión del agua a nivel de los usuarios finales agrupados bajo la tutela jurisdiccional de los Gobiernos Locales (Distritos).

Información aportada por el grupo Lima Water (2014), indica que la reparación de estas fugas estimada por Sedapal es USD \$100 millones, traería consigo el beneficio de una reducción de las tarifas de agua potable según SUNASS de S/. 1.57 a 0.97 /m³. Inversión final similar a la que demandó la inversión en el proyecto de Huascacocha USD 94.72 millones que hubiera traído el beneficio adicional de la reducción tarifaria.

La reflexión es simple: Las medidas oportunas con una visión integral de la problemática, son más baratas que las medidas tardías para gestionar los recursos hídricos requeridos por la ciudad de Lima, por lo tanto se debería priorizar la inversión en reducción de pérdidas.

3.2.2 Nuevas Fuentes de Agua

La exploración de nuevos recursos hídricos de cuenca de captación del río Mantaro y su derivación hacia la cuenca del Rímac para abastecer los requerimientos de la ciudad de Lima no es nueva, y ya en la actualidad, la ciudad abastece sus necesidades anuales en un 28% de aguas superficiales provenientes de la Cuenca del Mantaro (Marca I, II y IV)¹, este porcentaje puede llegar al 46% durante los meses los 7 meses de estiaje.



Figura 3.3: Represa Marca III (Huascacocha), al 100% de agua. Fuente SEDAPAL, extraída de Diario Gestión 13 de mayo del 2014

¹ El proyecto Marca III no fue ejecutado por aspectos técnicos no resueltos.

Siempre será posible contar con suministro adicional de agua provenientes de las subcuencas del lado del Atlántico para ser incorporado al sistema de abastecimiento de agua para Lima, pero a costos cada vez más altos, tanto en términos económicos como sociales. Se estaría transportando agua cada vez de mayor distancia y reduciendo la oferta hídrica de los pueblos que requieren del Mantaro para su sostenimiento.

En la actualidad, SEDAPAL ha emprendido la construcción de grandes proyectos de ingeniería, y tiene otros en cartera como por ejemplo: represas, túneles transandinos, regulación de lagunas y cientos de kilómetros de canales, para continuar la explotación de recursos hídricos de la cuenca del Mantaro, proyectos que tienen como único fin de garantizar la demanda de la ciudad de Lima.

En resumen, el escenario de la eficiencia hídrica de la ciudad de Lima es desfavorable por el crecimiento demográfico y económico que impulsan la demanda. La previsible disminución de los caudales de las fuentes de agua actualmente en uso por efectos del cambio climático, agravará el déficit hídrico.

El crecimiento urbano marca la pauta de la gestión hídrica y obliga a la continua inversión en infraestructura para aumentar el suministro de agua requerido, agua que en el caso de la ciudad de Lima está cada vez más lejos por la naturaleza del crecimiento periurbano de la ciudad.

3.3 El Acuífero de la Ciudad de Lima

3.3.1 Descripción del Acuífero

El acuífero de Lima está constituido por depósitos aluviales del cuaternario reciente de los valles del Rímac y Chillón. (Quintana y Tovar, 2002) Los materiales constituyentes del abanico deyectivo del río Rímac son clásticos heterométricos inconsolidados en estructuras mayormente lenticulares, típicas de depósitos fluvio-deltáicos (Chacón N. Pajuelo D. 1993). Estos depósitos están mayormente constituidos por cantos rodados, gravas, arenas y capas esporádicas de arcillas, los que se encuentran intercalados en estratos y/o mezclados entre sí (Atlas Ambiental de Lima, 2005, p.20).

Evaluaciones geofísicas contratadas por SEDAPAL, indican que el acuífero tiene un ancho variable, cuyos sectores más estrechos corresponden a las partes de los valles, aguas arriba de Vitarte en el Rímac y de Punchauca en el Chillón. En estas ubicaciones, los depósitos aluviales tienen anchuras aproximadamente de 1.5 km. El sector más amplio se encuentra en la parte baja, donde se unen los depósitos del Rímac con los del Chillón y llegan a tener 27 km en la sección de salida del flujo subterráneo al mar (SEDAPAL

2014). En zonas costeras se aprecian algunos afloramientos, el más notorio es el de los pantanos de Villa mostrados en la figura 3.5 en el distrito costero de Chorrillos.

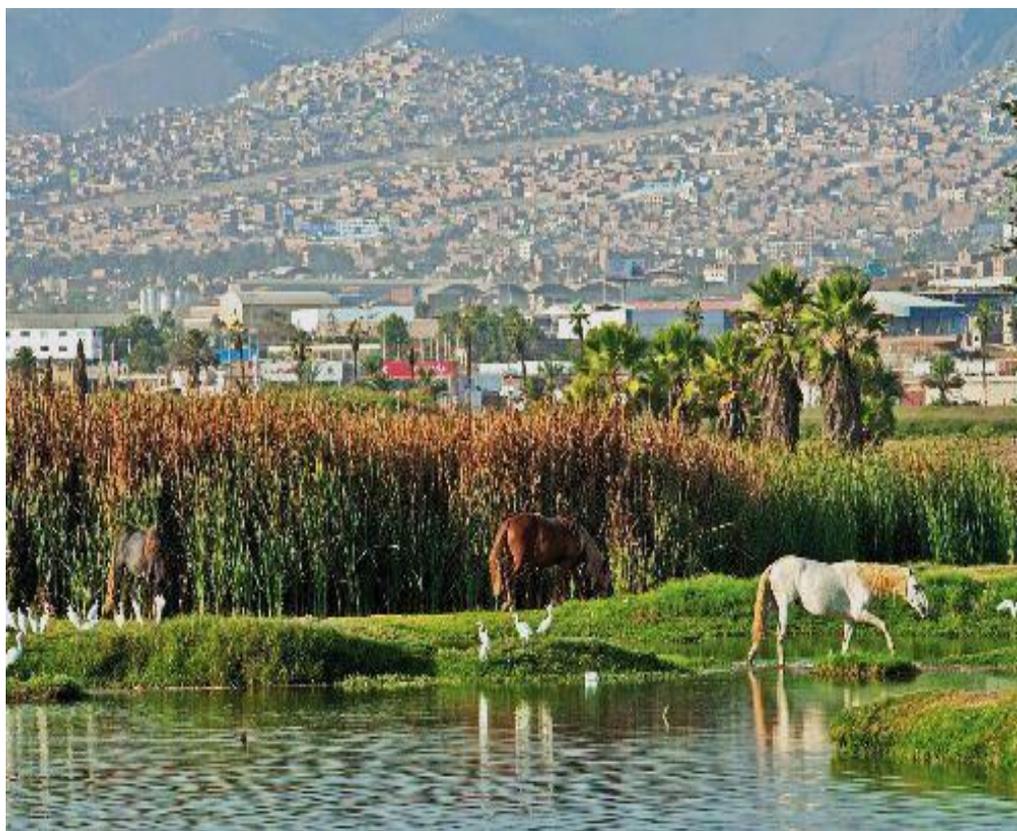


Figura 3.4: Vista Oeste-Este de Los Pantanos de Villa. Fuente: El Peruano 25 de Agosto del 2015.

El reservorio acuífero de Lima tiene una extensión aproximada de 390 km². El espesor del acuífero en la mayor parte del área está entre 100 y 300 m, y alcanza potencias máximas de 400m a 500m en la zona del distrito de La Perla. Sin embargo, no todo el espesor saturado es aprovechado por la poca permeabilidad por debajo de los 200 m de profundidad. (Seifert, 2009).

Manifestaciones visibles del acuífero de Lima las podemos encontrar en los pantanos de Villa en el límite Sur Oeste del acuífero y en algunos afloramientos de agua en la Costa Verde desde donde se abastecen de agua camiones Municipales para riego. En la figura 3.4 se muestra uno de los últimos vestigios de los afloramientos de la napa freática de Lima: Los Pantanos de Villa, al fondo (Este) se evidencia el crecimiento urbano.

3.3.2 Situación Actual del Acuífero de Lima

Una parte importante del suministro hídrico de la ciudad de Lima proviene del acuífero que subyace sobre la misma. Esta fuente de agua “El acuífero de Lima” constituye un gran reservorio para Lima Metropolitana y Callao. Es un

recurso indispensable para abastecer a la población, industria y agricultura. Este acuífero tienen su principal origen en los valles de los ríos Chillón y Rímac y en menor medida del río Lurín, es decir de los mismos ríos que son fuente principal de aguas superficiales para la ciudad.

El estrés hídrico del acuífero se agrava por la reducción de las infiltraciones que lo recargan, producto de la desaparición de las tierras de agrícola que se han transformado en urbanas como parte del proceso de crecimiento de la ciudad estos fenómenos generan el desequilibrio del nivel freático (ANA 2010, Tovar 2002).

La evolución histórica de la explotación del acuífero de Lima fue reseñada por Quintana, J. y Tovar, J. que señalaron que en 1955 se extraían del acuífero de Lima menos de 1 m³/s, caudal de extracción que se incrementó a 12,38 m³/s en 1997 (9 m³/s correspondieron a los 378 pozos administrados SEDAPAL y el resto, 3.38 m³/s a los 800 pozos de propiedad de empresas industriales y de particulares). En el distrito de Ate, la extracción de agua subterránea fue más crítica y sobrepasó los 10.000 m³/día/Km², caudal máximo permisible del acuífero. Luego en el 2001, se redujo a 9 m³/s, acercándose al máximo caudal explotable del acuífero de Lima que es de 8 m³/s y el rendimiento seguro de 6 m³/s, determinados mediante modelos de simulación matemática. Ello permitió recuperaciones importantes del nivel del acuífero entre 1 y 15 m en algunos sectores y en otro una desaceleración del ritmo de descenso de la napa freática (2002).

El rendimiento medio seguro del acuífero de Lima es de 6 m³/s según estudios geofísicos contratados por SEDAPAL, caudal equivalente a las pérdidas entre la Atarjea y un sector 34 km aguas arriba en el río Rímac (entre 9.1 m³/s y 3.5 m³/s de diferencia durante el periodo de evaluación). Estas pérdidas de caudal corresponderían mayormente a extracciones con fines agrícolas (una media de 4 m³/s) y pérdidas por infiltración que serían de 2m³/s (Nipon Koei Co. LTD, 2001).

Es fácil concluir que parte importante de las pérdidas evaluadas por SEDAPAL van a recargar el acuífero de Lima. Esta recarga sería complementada por las infiltraciones de riego de áreas verdes en la ciudad, las fugas en los sistemas de agua y la recarga directa de la parte alta de la cuenca del río Rímac como indican los estudios isotópicos, sugieren que las afloramientos de la napa freática en la Costa Verde provienen de filtraciones de precipitaciones ocurridas en una zona de 3600 msnm (Rojas et, al, 2013).

El inicio de la sobreexplotación del acuífero de Lima tuvo como muestra visible, la desaparición de gran parte de los manantiales que afloraban en la Costa Verde que se apreciaban a inicios la década del 70. La notable disminución de los niveles de la napa freática en los últimos 50 años determinó la desaparición de los “chorrillos” en los acantilados del Circuito de Playas del distrito de Chorrillos y en la playa de Agua Dulce (Chacón, Pajuelo 1993).



Figura 3.5: Foto de la Costa Verde en los años 20. Fuente: Foros Perú, extraída de <http://composicionurbana.blogspot.pe/2015/02/la-costa-verde-barrera-urbana-o-espacio.html>, 29/10/2015.

La foto 3.5 muestra la Costa Verde cuando el acuífero de Lima aún afloraba mediante brotes de manantiales en la parte baja del acantilado que daban vida a la vegetación.

Una de las manifestaciones observables de los actuales niveles de explotación del acuífero de Lima son los pozos fuera de servicio de SEDAPAL, muchos de ellos producto del descenso de la napa freática (Sintomáticamente, mucho de ellos se encuentran en las zonas donde se ha detectado mayor disminución del nivel de la napa freática).

Los niveles freáticos en el valle del Rímac mostraron que en 1997 varió desde menos de 5m en la zona de Villa a unos 100 m en La Victoria. Hacia el Norte la profundidad varió entre 50 y 90 m. Las zonas más deprimidas se encuentran en el distrito de La Victoria 100 m. y en Mayorazgo en Ate 90 m. (SEDAPAL 2014, Quintana y Tovar 2002).

Otra de las consecuencias del descenso de la napa freática es la intrusión marina que es seria en los sectores Oeste del acuífero producto de la disminución del gradiente hidráulico (SEDAPAL 2014).



Figura 3.6: Variación de los niveles piezométricos de los pozos explotados por SEDAPAL. Fuente: Quintana y Tovar, 2002.

En la figura 3.6 se puede apreciar la coincidencia del incremento de explotación del acuífero con la desaparición de las áreas verdes en los acantilados de la Costa Verde.

La depresión del acuífero de Lima no fue homogénea como señalaron Quintana y Tovar. En el valle del Rímac la depresión varió de 10 a 50 m, es decir, a razón de 1 a 5 m/año, las zonas más deprimidas se ubicaron aguas arriba del cerro El Agustino, sobre la margen izquierda hasta las proximidades de la urbanización Mayorazgo, y otra entre Surquillo y La Victoria” (2002).

La sobreexplotación del acuífero de Lima ya había sido diagnosticada en 1994 por la firma Binnie & Partner que efectuó la calibración en régimen estacionario del acuífero, y cuyo modelo matemático consideró los aportes y las extracciones medias del acuífero ocurridas en un periodo de 23 años desde 1969 a 1991. Este balance se efectuó sobre una extensión aproximada de 400 km² que corresponde a la extensión del acuífero y se obtuvo un déficit de 0.82 m³/s con los siguientes resultados: Afluentes totales 13.77 m³/s y efluentes totales 12.95 m³/s.

3.3.3 Recarga del Acuífero de Lima

En años recientes, la radical disminución de las áreas de cultivo del valle del Rímac para albergar a la creciente ciudad de Lima, ha contribuido a disminuir la recarga habitual del acuífero, que históricamente se recargaba por aguas infiltradas de actividades agrícolas desarrollada en su valle, por infiltraciones del cauce de los ríos Chillón, Rímac y Lurín y por aguas infiltradas por las lluvias en la cuenca alta del Rímac. Es así que parte importante del agua de

recarga del acuífero de Lima ha desaparecido y ha sido parcialmente reemplazada por infiltraciones de las redes de agua potable y servicio de alcantarillado (SEDAPAL 2014).

La disminución de los niveles de la napa freática que mostraron valores extremos en 1997 (Quintana y Tovar, 2002), agravada por la disminución de la recarga natural del acuífero de Lima permitió la intrusión marina y el deterioro de la calidad de aguas subterráneas, principalmente en los sectores costeros del acuífero. Estudios encargados por el proyecto JICA establecieron que en el 2001 el acuífero de Lima tenía las siguientes fuentes de recarga, mostrada en la figura 3.7:

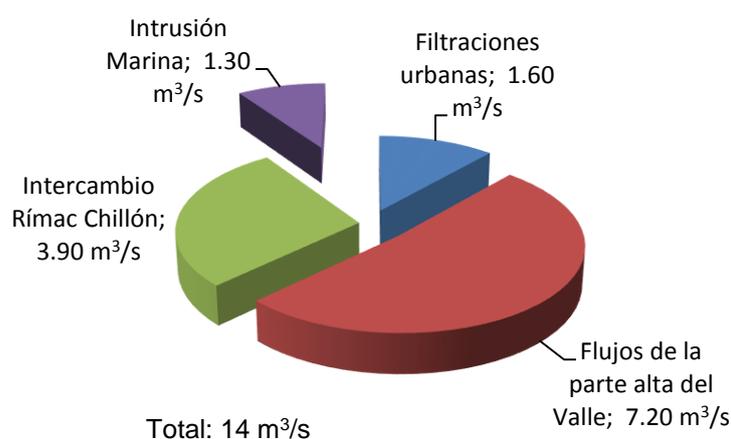


Figura 3.7: Caudales de recarga del acuífero de Lima (m³/s). Fuente: Nippon Koei Co. LTD, 2001.

El total de la recarga media estimada el 2001 fue de 14 m³/s, parte de este caudal 1.30 m³/s correspondió al caudal de intrusión marina (Nippon Koei Co. LTD, 2001). Esta situación explicaría el deterioro de la calidad del acuífero cuya conductividad eléctrica máxima paso de 3 mmhos por cm. en 1971 a 6 mmhos por cm en 1994, según muestran mapas hidrogeológicos de acuífero de Lima (Nippon Koei Co. LTD, 2001).

Existe por lo tanto una relación directa entre la sobreexplotación del acuífero de Lima y el deterioro de sus aguas como consecuencia de la intrusión marina.

El periodo de mayor sobreexplotación del acuífero de Lima se inició a principios de la década del 1970 y tuvo su momento pico en 1997 donde se registró una tendencia de descenso del nivel de la napa freática de 1.5m anuales (Quintana y Tovar, 2002). Para contrarrestar esta problemática, SEDAPAL implementó un proceso de recarga del acuífero mediante la habilitación de pozos de extracción y recarga en las márgenes del río en adicional a zonas de infiltración durante los periodos de avenida. Se implementaron también pantallas transversales en el río Rímac para favorecer

la infiltración producto del incremento del tiempo de retención hidráulica (Figuras 3.8 y 3.9).



Figura 3.8: Pantallas transversales al río Rímac para favorecer la recarga del acuífero. Fuente: Google Earth, 2015



Figura 3.9: Vista Norte Sur de Pantallas pantallas transversales río Rímac. Fuente: Montenegro J. Recarga artificial de acuíferos, Lima 2013, <http://civilgeeks.com/2011/09/18/recarga-artificial-de-acuíferos/>

Las acciones tomadas por SEDAPAL desde 1997 para contrarrestar la sobreexplotación del acuífero de Lima comprendieron (2014):

- Instalación de 700.000 medidores domiciliarios de agua, para reducir la presión sobre la demanda.
- Reducción de usos de aguas subterráneas en épocas de avenida (Enero a Marzo).
- Recarga artificial inducida mediante acondicionamiento de zonas de infiltración. (SEDAPAL estima haber logrado recargar 10.835 MMC de agua en total al acuífero, provenientes de los excedentes anuales de 400 millones de metros cúbicos (MMC) en épocas de avenida).

El proyecto piloto de recarga de acuífero se implementó a orillas del río Rímac mediante inyección de 1.5 m³/s con la utilización de 30 pozos de inyección de agua durante las épocas de avenida (50 l/s c/u), experiencia positiva que permitió proyectar una ampliación a 5 m³/s para recarga del acuífero, sin embargo la ampliación no se realizó como estaba prevista (Nippon Koei Co. LTD, 2001). Estas medidas fueron tomadas complementariamente a la reducción de extracción de aguas del subsuelo para favorecer su recuperación medidas que favorecieron la reversión de la tendencia decreciente. (Quintana, J. y Tovar, J. 2002).

El proceso de recarga fue suspendido en el año 2008, por la rápida colmatación de los lechos de infiltración y por problemas de escasez de zonas adecuadas para implementar el proceso y por la densidad urbana en las riberas del río Rímac según reporto Seifert (2009).

Las reservas potencialmente explotables del acuífero del río Rímac son del orden de 126.14 MMC por año, es decir 4 m³/s según balance hídrico mostrado en el cálculo de reservas de aguas subterráneas en los valles costeros del Perú (ANA 2009), inferior a los 6 m³/s señalados por SEDAPAL como caudal seguro (SEDAPAL 2014).

La tendencia de disminución de los niveles de la napa freática se habría revertido en el 2013 como consecuencia de la reducción de la explotación total de las aguas subterráneas del acuífero Rímac – Chillón, que disminuyó de 12.4 m³/s en 1997 a 3.75 m³/s en promedio durante ese año (SEDAPAL, 2014).

Durante el período 1997-2002, SEDAPAL realizó el seguimiento de los niveles de la napa freática y determinó que el acuífero Rímac-Chillón había incrementado la cantidad almacenada en 419.72 MMC, a razón de 83.94 MMC/año, equivalente a un caudal de recarga de 2.7 m³/s. considerando que el volumen del acuífero era de 4,038.3 MMC comprendido entre los niveles de la napa observados entre 1997 y el 2002 y un coeficiente de almacenamiento de 15%.

A la fecha, sin embargo, el acuífero de Lima sigue estando sobreexplotado, a pesar que la tendencia de abatimiento de la curva de explotación del acuífero se había revertido, por lo que su recuperación total es poco probable, en particular si se tiene en cuenta que existen cerca de 2,000 pozos de explotación del acuífero en las cuencas de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, de los cuales un alto porcentaje son informales (ANA 2009).

SEDAPAL reportó en el Plan Maestro del 2014 que en el año 2003 se revirtió la tendencia decreciente de los niveles de la napa, y los niveles de agua subterránea comenzaron a ascender, año desde el cual, las líneas de tendencia fueron ascendentes producto de la reducción de la extracción total a 7.05 m³/s (4.05 m/s por SEDAPAL y 3 m³/s por privados). Sin embargo, al mes de febrero del 2014, la extracción de las aguas subterráneas fue de 6.25 m³/s (3.25 m³/s por SEDAPAL y 3 m³/s por privados) superior al denominado caudal seguro.

El Plan Maestro 2014 elaborado por SEDAPAL permite inferir que la extracción informal de agua del subsuelo no está controlada y que la misma empresa cubrió el déficit hídrico del 2013 con sobreexplotación del acuífero, lo que estaría ocurriendo hasta la fecha como consecuencia de la persistencia del déficit hídrico actual de la ciudad.

A la fecha, SEDAPAL cuenta con 463 pozos de producción (incluido los 28 pozos administrados por el Consorcio Agua Azul), de los cuales 378 están disponibles y 85 no disponibles por encontrarse en reparación, carecer de equipamiento o paralizados por deterioro de la calidad del agua o descenso del nivel de la napa freática, algo contradictorio si se tiene en cuenta que la napa supuestamente estaba recuperada (SUNASS 2010).

El modelamiento matemático realizado por SEDAPAL, para poder predecir el comportamiento de las condiciones futuras del acuífero, actualmente sometido a una mayor explotación por el incremento de la perforación de pozos, ha mostrado que para cualquier extracción mayor de 6.25 m³/s ocasionará un constante descenso del nivel freático y estima que para un caudal de extracción estimado de 8 m³/s el acuífero se podría agotar, por lo que finalmente la recomendación técnica para equilibrar la explotación de los acuíferos (Rímac-Chillón), fue no superar la extracción de 6 m³/s como caudal seguro (Antea/AMSA, 1999).

En conclusión, si bien es cierto SEDAPAL controló la sobreexplotación del acuífero, con obras de ampliación de fuentes de agua superficiales, que mitigaron la presión sobre el mismo, aún no se recuperan los niveles de la napa en algunos sectores de la ciudad, y la recuperación de la calidad del acuífero producto intrusión marina luego del periodo de sobreexplotación, es de pronóstico reservado.

Si bien resulta evidente que es necesario continuar con los proyectos de recarga del acuífero, tales como la construcción de pantallas a lo largo de los ríos Rímac, Chillón y Lurín, estas acciones serán insuficientes para contrarrestar la sobreexplotación del acuífero de Lima producto del déficit hídrico de la ciudad.

3.4 Recarga Artificial de Acuíferos

La recarga artificial de acuíferos en adelante AR o MAR acrónimos en inglés de aquifer recharge y managed aquifer recharge respectivamente, comprende al conjunto de técnicas orientadas a permitir la explotación de los acuíferos aumentando sus recursos y reservas, mediante una intervención en el ciclo natural del agua (Custodio, Llamas, 1983) y es considerado de gran efectividad en comparación con grandes obras hidráulicas (DINA-MAR, 2010).

La escasez de agua es un fenómeno mundial y ancestral en algunas zonas del planeta. Las culturas de nuestro país, practicaban sistemas de recarga en superficie, con la finalidad de captar las aguas del río y extenderlos fuera del cauce en una superficie permeable. Un buen ejemplo de ello son los denominados “amunas”, realizado con éxito por los preincas en los entornos andinos del valle del Rímac y valles vecinos, práctica que hasta ahora mantienen los pobladores de Tupicocha en Huarochiri, Lima (GSAAC 2006)

El manejo integrado de los recursos hídricos obliga a maximizar la eficiencia del uso del agua mediante una visión en conjunto de las potenciales fuentes de agua. La recarga de acuíferos es un tema primario en los entornos de las ciudades, como se muestra en la tabla 3.2, una práctica que se ha extendido en muchas zonas del mundo.

Tabla 3.2: Experiencias Globales en MAR. Fuente TRAGSA 2014.

Continente	Experiencias
Europa	Al menos 50 dispositivos y experiencias en 18 países. Dusseldorf depende en un 100% de las aguas de MAR, así como Budapest. Berlín en un 75%, etc.
Norte América	56 instalaciones de ASR/MAR en USA. Unas 100 en fase de construcción. (ASR: Aquifer Storage and Recover)
África	Las experiencias más extendidas han sido llevadas a cabo en la República Sudafricana de Namibia
Asia	Algunas de las experiencias más destacables son las desarrolladas en Tailandia, Taiwán, Kuwait y la Unión India donde hay catalogadas unas 1000 experiencias.
Oceanía	En la actualidad existen al menos cinco programas en desarrollo comandados por CSIRO y CGS, con más de 7 dispositivos operativos en Australia

La recarga de acuíferos en las zonas áridas del planeta constituye una opción ideal para el manejo integrado del agua. Permite almacenar agua en los periodos de superávit para su posterior reuso en periodos de déficit por la disminución de otras fuentes de agua como las superficiales. Esta técnica permite almacenar grandes volúmenes que de otra manera requerirían costosas infraestructuras superficiales, con la ventaja de que el agua almacenada en el subsuelo no estará expuesta a generación de algas promovidas por la radiación solar que degradan la calidad de los cuerpos de agua superficiales.

Bajo determinadas condiciones, el agua almacenada en el acuífero puede mejorar su calidad por la capacidad química y microbiología activa de los estratos que atraviesa el agua infiltrada en su tránsito en el subsuelo, hasta situarse en los estratos saturados (Foster, Gale I & Espanhol 1994).

Las técnicas de recarga de acuíferos son variadas y comprenden desde procesos de infiltración desde la superficie a bajas tasas, hasta la inyección directa a altas tasas en el acuífero como se muestra en la tabla 3.3. Por ejemplo, el proyecto piloto realizado por SEDAPAL, en el que aplicó tasas de inyección de 35 l/s por pozo (Quintana y Tovar, 2002). En tiempos modernos, esta alternativa ha cobrado gran difusión y es de amplia aplicación en países europeos y en otras zonas del orbe como Israel y Estados Unidos entre otros (Fernández, García & Villarroja, 2005).

Tabla 3.3: Tipos de Recarga Artificial de Acuíferos. Fuente: Gale I. 2005.

N°	SISTEMA	TIPO DE DISPOSITIVO
1	DISPERSION	Balsas de infiltración
2		Canales de Infiltración
3		Técnicas de tratamiento suelo/acuífero
4		Campos de infiltración
5		Recarga accidental por retornos de riego
6	MODIFICACIÓN DE CANAL	Diques de retención y represas
7		Diques permeables
8		Serpenteos
9		Escarificación de lecho
10		Diques subsuperficiales/subterráneos
11		Diques perforados
12	Pozos	Qanats (galerías subterráneas)
13		Pozos abiertos de infiltración
14		Pozos profundos y minisondeos
15		Sondeos
16		Dolinas, colapsos
17		ASR
18		ASTR
19	FILTRACIÓN	Bancos filtrantes en lechos de río (RBF)
20		Filtración interdunar
21		Riego subterráneo
22	LLUVIA	Captación de agua de lluvia en improductivo
23	SUDS	Recarga accidental en conducciones de alcantarillado
24		Sistemas urbanos de drenaje sostenible (SUDS)

3.4.1 Recarga de Acuíferos Mediante el Uso de Agua Residual Tratada

La necesidad de una gestión integrada del agua en tiempos de escasez, ha vuelto la mirada al reúso de aguas residuales como un componente fundamental en la gestión sostenible e integrada de los recursos hídricos.

El agua residual tratada (o regenerada), es un medio usual para la irrigación de campos agrícolas del entorno urbano, áreas verdes urbanas, y más recientemente como un medio valioso para ser utilizado en la recarga de acuíferos como ocurre en diversas ciudades en EEUU y China, entre otras ciudades en el mundo (Gale I. 2005)

La recarga artificial de los acuíferos con agua residual previo tratamiento adecuado, es una de las soluciones más prometedoras para reponer el volumen y calidad del agua en de los acuíferos (CONAGUA, 2011).

La técnica de recarga de acuíferos mediante el uso de aguas residuales tratadas, es considerada por la agencia de protección medioambiental norteamericana EPA (Environmental Protection Agency) dentro de los sistemas de reúso indirecto para agua potable: IPR (Indirect Potable Reuse), definida como el aumento de las fuentes de agua potable (superficiales o subterráneas) con aguas residuales tratadas, seguido de un amortiguador ambiental previo al proceso de potabilización (EPA 2012). La agencia norteamericana considera que *“El agua residual tratada es una fuente segura y fiable de suministro para la reposición de cuencas de agua subterránea”* (EPA 2012, p.2-14).

El reúso indirecto de aguas residuales para consumo humano, no es un tema novedoso, lo cierto es que desde hace varias décadas, dicho reúso ocurre de forma no planificada o accidental como consecuencias de vertimientos de aguas residuales, tratadas o sin tratar a cuerpos o corrientes de agua (EPA 2012) como es el caso del río Rímac que recibe descargas de aguas residuales sin mayor o ningún tratamiento previo proveniente de las poblaciones asentadas a lo largo de su curso, o del acuífero de Lima que recibe aguas residuales infiltradas de los sistemas de alcantarillado defectuosos o lagunas de tratamiento sin estanqueidad adecuada.

La técnica de recarga de acuíferos con aguas residuales tratadas es una de las últimas fronteras de la ingeniería y abarca diversas disciplinas como Ingeniería Sanitaria, Ambiental, e Hidráulica, así como Hidrogeología, Biología entre otras disciplinas.

Estas técnicas se han venido aplicando desde la década de los 50 en diferentes ciudades del mundo, como es el caso del condado de Orange, cerca de los Ángeles, que recarga el acuífero del río Santa Ana durante los meses secos mediante la utilización de aguas de alcantarillado tratadas (GWRS, 2011), desde el año 1954. Otro ejemplo es el caso de Montebello Forebay, también cerca de Los Ángeles que por intermedio de pozos de inyección de

aguas residuales tratadas y pozos alejados, se recuperan las mismas para consumo humano desde 1962 (Gale I, 2005).

Un caso emblemático es la ciudad de Berlín que desde 1870 infiltra de forma no planificada aguas tratadas de lagunas que sobreyacen al acuífero aguas abajo de la ciudad. (Gale I, 2005).

La recarga de acuíferos con aguas residuales tratadas, permite bajo las condiciones ideales, que la calidad del agua infiltrada mejore, gracias a la capacidad del suelo y subsuelo no saturados de purificar el agua residual, siendo lo ideal una recarga lenta intermitente a través de suelos de grano fino. Los suelos más permeables aceptarán más cantidad de agua infiltrada pero tendrán menos capacidad de biodepuración. (Foster, Gale & Espanhol 1994).

Resulta evidente que la infiltración en suelos más permeables deberá realizar a mayor desnivel con respecto a la napa freática y a mayor distancia de los puntos de extracción de agua para garantizar que el tiempo de retención hidráulica sea lo suficientemente largo para que la calidad de agua que entra en contacto con el acuífero no genere riesgos de contaminación como sugieren todos los autores que han tratado sobre este tema.

Los acuíferos sirven como recipientes de almacenamiento en épocas de abundancia para su uso en épocas de carestía, su recarga es un eficiente medio para combatir la intrusión marina en zonas donde la depresión de la napa freática compromete la calidad del agua por el ingreso de sales facilitado por la disminución del gradiente hidráulico, se puede inyectar en una zona y extraer a kilómetros de distancia, es un eficiente medio depurador de la calidad del agua (CONAGUA 2011).

Las ventajas y los mecanismos para recargar acuíferos con aguas tratadas, son las mismos que usualmente se aplican cuando la fuente de agua de recarga son los excedentes de avenidas ribereñas o de agua de lluvias, pero en el caso de uso de aguas tratadas, se deben extremar cuidados para evitar la contaminación de los acuíferos (Salgot 2001).

Los procedimientos más usuales de recarga con aguas residuales tratadas son la Infiltración Superficial (Percolación), que se realiza de forma extendida a bajas tasas de infiltración mediante la implementación de embalses en zonas permeables y la Recarga por Inyección Directa en el acuífero que requiere de altos estándares de calidad del agua tratada y usualmente se prefiere utilizar este método a acuíferos bien confinados. Es usual que las aguas residuales sean tratadas a nivel terciario con calidad potable, que pueden incluir procesos de micro y ultrafiltración (EPA 2012).

La aplicación de inyección directa se recomienda cuando el agua subterránea está profunda, cuando la topografía o el uso del suelo no permiten la dispersión

superficial por ser impráctica o costosa o cuando la inyección directa puede constituir una barrera contra la intrusión marina.

De la revisión bibliográfica y el estudio de la aplicación de la metodología de recarga de acuíferos en otras ciudades, se concluye que se debe buscar que los pozos de extracción estén lo más alejados posibles de las zonas de infiltración y que exista un tránsito por estratos no saturados.

En general, es recomendable incrementar al máximo los tiempos de residencia del agua infiltrada o inyectada en su tránsito hasta el acuífero. La separación en tiempo y distancia contribuye a los procesos de activación biológica y química que ocurren en el subsuelo y que contribuyen a la depuración del agua de recarga. Pero lo más importante es que facilitan la aceptación de los usuarios finales (CONAGUA 2,011, Gale I 2005).

3.4.2 Calidad del Agua para la Recarga de Acuíferos

Es práctica usual que el tratamiento de aguas residuales para ser inyectadas en el acuífero, reciba tratamientos que comprenden: microfiltración, osmosis inversa y finalmente desinfección mediante rayos ultravioleta u ozonización pero el diseño del tratamiento adecuado dependerá finalmente del sistema de recarga a emplear.

Cuando las aguas son infiltradas desde la superficie, se aprovecha la capacidad de depuración del suelo conocida como SAT (soil acuífer treatment en inglés), técnica ampliamente estudiada y aplicada. (Jhonson T. 2001), es decir, en algunas circunstancias el tránsito del agua residual por la zona vadosa podría ser suficiente tratamiento depurador del agua residual destinada a la recarga de un acuífero

El sistema suelo acuífero elimina eficientemente un alto porcentaje de los contaminantes de un agua residual, como sólidos suspendidos, materia orgánica, nutrientes y microorganismos como se muestra en la figura 3.10, gracias a procesos naturales que ocurren en el sistema como filtración, biodegradación, adsorción, intercambio iónico y precipitación que ocurren son efectivos para la depuración del agua a infiltrar (Bitton & Harvey, 1992), sin embargo, el proceso de infiltración de aguas residuales en acuíferos por sí solo no puede lograr niveles de calidad de agua potable. (Foster, Garduño, Tuinhof, Kemper & Nanni 1998).

La figura 3.10, muestra datos del perfil profundo de arena eólica altamente permeable en Lima, Perú, para el que se encuentran niveles de atenuación aceptables a los 5 m. de profundidad. Esta distancia varía en función del tipo de suelo y la mayor vulnerabilidad ocurre donde el manto freático se encuentra a menos de 3 m. y/o el suelo esta fracturado (Foster et al. 1994).

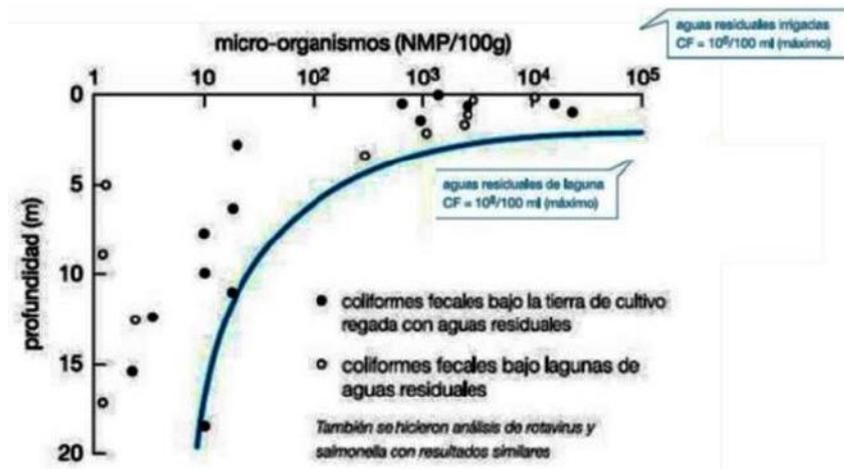


Figura 3.10: Atenuación de patógenos fecales por la infiltración de aguas residuales en la zona no saturada. Fuente: Foster et al., 1994

El estudio de Ecotoxicidad de recarga artificial de acuífero con Agua Residual Tratada realizado por Xue Zhang, Xuan Zhao en el 2012, concluyó que la ozonización de aguas residuales tratadas terciariamente, combinada con 3 días de tratamiento en zona vadosa (VST, vadose soil treatment) y 20 días de residencia hidráulica en el acuífero (SAT, soil aquifer treatment) puede mejorar la calidad de los efluentes municipales de las PTARS para fines de recarga de acuíferos.

Por lo expuesto, es práctica usual que el agua destinada a la recarga de acuíferos deba tener un tratamiento terciario a nivel de agua potable, si es que se va a inyectar directamente al acuífero. Es decir que la calidad del agua de recarga debe ser tal que no comprometa la calidad de los acuíferos (Huertas, et al. 2002).

El tipo de tratamiento a emplear para garantizar la calidad de agua para recargar el acuífero dependerá finalmente de cada zona específica donde se desee aplicarse este método, debiéndose tener presente los siguientes aspectos para el diseño final del proceso (Adaptado de Foster et al.1998):

1. La vulnerabilidad del Acuífero.
2. La calidad de agua se altera durante su tránsito por el subsuelo y ello dependerá de las características físico químicas de los estratos atravesados durante los procesos de infiltración-percolación.
3. Capacidad de biodepuración de los suelos depende de múltiples parámetros que difieren de un lugar a otro.
4. La calidad de aguas residuales difiere grandemente de un sector urbano a otro, en particular por la existencia de industrias.
5. La permeabilidad del suelo.
6. La distancia de las zonas de infiltración a las zonas de extracción.
7. La profundidad del acuífero.
8. La calidad original del agua del acuífero.

Por lo expuesto, el planeamiento de uso de aguas residuales tratadas deberá seguir un minucioso programa de evaluaciones, eventualmente ensayos en campo y rigurosos procedimientos de diseños de ingeniería, planeamiento y control para su éxito.

Un factor relevante que se deberá tener presente es la aceptación pública del modelo propuesto para garantizar el éxito de cualquier emprendimiento de esta naturaleza.

3.4.3 Factores determinantes para la implementación de sistemas IPR

La aceptación pública de los sistemas IPR es uno de los factores más relevantes para la implementación de estos sistemas, por lo que cada proyecto deberá basarse en lo particular de cada uno y de la comunidad en donde se implementará. (EPA 2012).

Entre los factores determinantes de la viabilidad de proyectos IPR mediante la utilización de un acuífero como amortiguador ambiental, se encuentran las características del mismo, la calidad del agua regenerada para la recarga, los requerimientos del tratamiento del agua residual, consideraciones reglamentarias, costos de los sistemas a utilizar por lo que el acuífero debe ser evaluado para conocer los posibles impactos sobre la calidad del agua a largo plazo (CONAGUA, 2011)

3.4.4 Ejemplos de sistemas de recuperación de acuíferos mediante el uso de agua residual tratada

En los días corrientes se cuenta con valiosa evidencia de la viabilidad de la recarga de acuíferos mediante la utilización de agua residual tratada, tal es el caso de la recarga de acuíferos en California, donde es una práctica usual desde hace más de 50 años, ha probado ser un medio seguro y efectivo (Jhonson T. 2001). Las normas de calidad les exigen recargar el acuífero con aguas tratadas a nivel terciario con calidad de agua potable, en este caso la recarga se realiza a suficiente distancia para garantizar tiempos de retención hidráulica de 6 meses, en otros, se aprecian pozos de extracción a 150 metros de distancia de las zonas de descarga (CONAGUA 2011).

El caso Australiano es otro ejemplo del cual se pueden extraer valiosas conclusiones. La gestión de recarga de acuíferos conocidas como MAR por sus siglas en inglés, es una práctica de amplia aceptación desde hace más de 40 años y forma parte de la gestión integrada de recursos hídricos y es particularmente contemplada en las áreas urbanas por los beneficios económicos, sociales y ambientales que la solución puede proveer.

La condición de escasez de agua de ese país los obliga a ser líderes en las técnicas de reúso de aguas residuales. Los efluentes de alcantarillado son sometidos a extensos tratamientos antes de ser ubicados en embalses o en acuíferos previo a su reúso, la utilización de acuíferos para almacenar el agua tratada, tiene la ventaja de continuar la depuración a lo largo de la residencia

hidráulica y previa a su recuperación para agua potable. (Dillon, Jimenez 2008). Las evaluaciones de los casos de las ciudades australianas donde se aplica esta técnica indican 95% de aceptación para recarga de acuíferos con aguas de tormentas y 67% de aceptación de recarga con aguas residuales como promedio, en algunas ciudades como Perth la aceptación evaluada en el 2006 fue del 78% (Leviston et al 2006). En otras zonas del orbe, el agua potable producto del tratamiento natural en el subsuelo (SAT) es bien aceptada por los usuarios norteamericanos (Asano, 2005, p1249)

Otra experiencia valiosa es la evaluación realizada entre el 2005 y el 2008 por la Comisión Europea para la investigación y desarrollo (CORDIS), que luego de una extensa evaluación, que comprendió el estudio y desarrollo de diversas tecnología de recuperación de agua así como su nivel de contaminantes y el análisis de casos de recarga de acuíferos.

Los resultados no fueron concluyentes en cuanto a la recomendación de algún tipo de calidad específica de tratamiento previo del agua residual antes de ser usada para la recarga de algún acuífero, producto de la gran diversidad de situaciones y tiempos de permanencia hidráulica de cada caso. Sin embargo desde los estadios iniciales de la evaluación, los métodos de SAT mostraron menores costos, sin flujos residuales en comparación con los sistemas de membranas. La conclusión de este estudio, es que sea cual fuere la técnica de recarga del acuífero con aguas tratadas, este es una efectiva barrera biológica y reduce de forma significativa los riesgos a la salud de diferentes contaminantes.(CORDIS 2014) por lo que se puede afirmar que las aguas residuales pueden ser infiltradas en el suelo mediante la infiltración controlada en el sistema suelo – acuífero (Soil Acuífer Treatment, SAT) aprovechando la capacidad de depuración del suelo mediante procesos físicos, químicos y biológicos (Castillo G. et al. 2000).

Varias ciudades en el mundo han implementado sistemas para la recarga de sus acuíferos con aguas provenientes de efluentes previo tratamiento, como se muestra en la tabla 3.4

Tabla 3.4: Ejemplo de ciudades que recargan su acuífero con aguas residuales tratadas para su posterior reúso potable. Fuente: CONAGUA 2011.

Lugar	Fuente de inyección	Tratamiento Avanzado	Método de recarga	Post tratamiento	Reúso del agua
Nardo, Italia	Efluente secundario (lodos activados y tratamiento biológico)	Cloración	Inyección vía sumidero	Ninguno	Barrera para la intrusión salina y agua potable
Wulpen, Bélgica	Efluentes terciarios (desnitrificación, lodos activados y remoción simultánea de P)	Ultrafiltración, cloración y osmosis inversa	Filtración en Duna para la producción de agua potable	Cloración y UV	Recarga subterránea y abastecimiento de agua potable
Condado de Orange California, EEUU	Efluentes terciarios, lodos activados,	Microfiltración (MF) y osmosis inversa	Infiltración superficial	UV y Peróxido de hidrogeno	Recarga subterránea y abastecimiento de agua potable
Planta Fred Hervey, El Paso, Texas, EEUU	Efluente secundario (lodos activados y tratamiento biológico)	Recarbonatación, filtración de arena, ozonación,	Pozos de inyección	Filtración en carbón activado granular y cloración	Recarga subterránea y abastecimiento de agua potable e industrial

3.4.5 Normas y Regulaciones

En el Perú no está regulada directamente el uso de aguas residuales tratadas para la recarga de acuíferos, sin embargo existen regulaciones para el vertimiento de aguas residuales, las que son aplicables al tema en estudio.

Emprendimientos de recarga de acuíferos con aguas residuales tratadas ya han sido implementados con éxito en algunos lugares como California, donde las agua a infiltrar son sometidas a tratamiento extensivos que comprenden micro filtración, osmosis inversa y desinfección con rayos ultravioleta. (U.S. National Research Council, 1994).

Los sistemas planificados de Reúso Indirecto Potable (IPR) tienen como única finalidad aumentar la producción de la fuente de agua, es decir, los sistemas IPR implican el uso de agua regenerada para aumentar las fuentes de agua, ya sea mediante la recarga de acuíferos o aumento de niveles en embalses de agua (EPA 2012), que pasará por un tratamiento de potabilización previo al suministro urbano.

Si bien el reúso indirecto de aguas residuales para agua potable es una práctica usual, esta no necesariamente requiere regulaciones específicas como es el caso del estado de Arizona, que no tiene normativas de IPR, sin embargo como es el caso de muchas ciudades en el mundo, las instalaciones de tratamiento y la calidad de las aguas de reúso, si esta normada. En el caso del estado de Arizona, la ADEQ (Arizona Department of Environmental Quality) regula las instalaciones de recarga donde el agua subterránea que puede ser luego recuperada por un pozo de agua potable a través de su programa de Permiso de Protección de Acuíferos. (EPA 2012).

Algunos estados americanos cuentan con normatividad que regula el reúso de aguas residuales como: Arizona, California, Florida, Hawaii, Massachusetts, Pennsylvania, Utah, Virginia y Washington, sin embargo son pocos los que cuentan o tienen en proyecto normatividad específica para IPR, siendo los más relevantes California, Florida y Washington que establecen parámetros de referencia como los que se muestran en la tabla 8.2 del anexo 8.4.

3.5 Cuenca del río Rímac

3.5.1 Descripción

La cuenca del río Rímac se ubica en la región central y occidental del territorio Peruano en la vertiente del océano Pacífico en el departamento de Lima y es la principal fuente de abastecimiento de la ciudad de Lima Metropolitana y Callao, las que se asientan en el valle de la cuenca, sobre el cono de deyección del río. El área de la cuenca es de 3,503 km², con un perímetro de 419.5 km. (ANA 2010, Huapaya C. 2009), limita por el Norte con la cuenca del río Chillón, por el Sur con la cuenca del río Lurín y por el Este con la cuenca del río Mantaro.

El agua es usada en la cuenca alta principalmente para actividades mineras y en la cuenca media y baja para actividades agrícolas (entre 15 y 22%), industriales y principalmente en la dotación de agua para la ciudad de Lima en donde se calcula que cerca de 1 millón (más de 700,000 según otras fuentes consultadas) de habitantes carecen del servicio de agua potable directo que brinda SEDAPAL. Se estima que las aguas del río Rímac y de sus trasvases de la cuenca del Mantaro contribuyen con más del 75% de la demanda de agua de la ciudad en complemento con aguas del acuífero de Lima y de los estacionales ríos de las cuencas vecinas: Chillón y Lurín (AQUAFONDO 2013).

La demanda hídrica total para el 2010 en la Cuenca del río Rímac fue de 635 MMC, de las cuales el uso poblacional demandó 501.44 MMC, la agricultura 105.15 MMC la minería 27.46 y la industria 0.95 MMC por lo que resulta evidente que los recursos hídricos de estas cuencas son los más exigidos del país (ANA 2010).

3.5.2 Hidrografía

El río Rímac nace en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes a una cota aproximada de 5,500 msnm en el nevado de Paca en la provincia de Huarochiri, atraviesa de Noreste a Suroeste la provincia de Lima y desemboca en el océano pacífico en la provincia de Callao. La parte alta de la cuenca que representa el 62% del total de la cuenca y está situada sobre los 2500 msnm, es denominada cuenca húmeda por ser la que contribuye con su escurrimiento superficial a los caudales del río.

Sus principales ríos tributarios que conforman las subcuencas del mismo nombre son Santa Eulalia (1,097.7 km²) y Río Blanco (193.7 km²), tienen en total 191 lagunas, de las cuales el mayor número se ubican en la subcuenca del río santa Eulalia. En su recorrido de 145 kms operan cinco centrales hidroeléctricas (Ministerio de Energía y Minas 2007).

3.5.3 Hidrología

El Rímac es un río de descarga irregular a pesar de las obras de regulación y trasvase de aguas de la Cuenca del Mantaro. La descarga máxima registrada en 1925 fue de 500 m³/s y la mínima en el año 1930 y fue de 5.63 m³/s. La descarga media anual presentada por el río Rímac entre 1921 y 1972 fue de 28.76 m³/s que representa un volumen medio anual de 907.01 MMC. (INRENA 1994).

Cálculos realizados por el ANA en el 2010 estimaron la disponibilidad hídrica de la cuenca del río Rímac en 781.92 MMC al 75% de persistencia. Es decir 24.8 m³/s como promedio anual. El cálculo se efectuó para los periodos comprendidos entre 1912 y 2009. La disponibilidad hídrica para la cuenca del Rímac incluyo 139.45 MMC provenientes del túnel trasandino Cratón (aprox. 4.5 m³/s promedio anual).

Las cifras mostradas no incluyen los caudales regulados de lagunas, derivación y trasvase y las cuencas del Mantaro como son: Proyecto “Marcapomacocha – Milloc” (Marca I) con 96.82 MMC, que comprendió la construcción de un túnel trasandino de 10 kms de largo que proporciona un caudal medio anual de 3.07 m³/s o mejor expresado un caudal promedio regulado durante los siete meses de estiaje de 5.25 m³/s (Eventualmente 6 m³/s). Tampoco incluyen las aguas de derivación de “Pomacocha –Río Blanco” (Marca II) mediante un túnel trasandino de 10 km. de longitud que aporta un caudal estimado entre 6.5 m³/s y 7 m³/s (AQUAFONDO 2013) ni la reciente incorporación de la laguna de Huascacocha en el 2013, (Marca IV) al sistema marca que con sus 67 MMC de capacidad de almacenamiento aporta 2.61 m³/s (otras fuentes indican 2.2 m³/s). (SEDAPAL 2014).

Tabla 3.5: Persistencia de las descargas medias mensuales (m³/s) – Estación Chosica
Fuente: ANA 2010

MES	PERSISTENCIA DE CAUDALES				Promedio Anual
	P (50%)	P (75%)	P (90%)	P (95%)	
Enero	34.86	25.73	18.42	16.8	37.4
Febrero	48.99	39.85	27.14	22.22	56.05
Marzo	61.92	46.55	36.67	31.03	66.1
Abril	39.37	29.51	16.58	12.17	39.6
Mayo	20.09	16.58	13.23	12.21	20.99
Junio	13.39	12.17	9.92	8.14	14.66
Julio	12.31	10.38	8.85	7.52	12.95
Agosto	12.43	10.65	8.53	7.87	12.83
Setiembre	13.05	11.8	9.69	8.92	13.6
Octubre	16.58	12.42	10.66	9.99	14.31
Noviembre	15.18	13.18	12.01	9.88	16.72
Diciembre	21.32	17.06	13.12	11.97	22.86

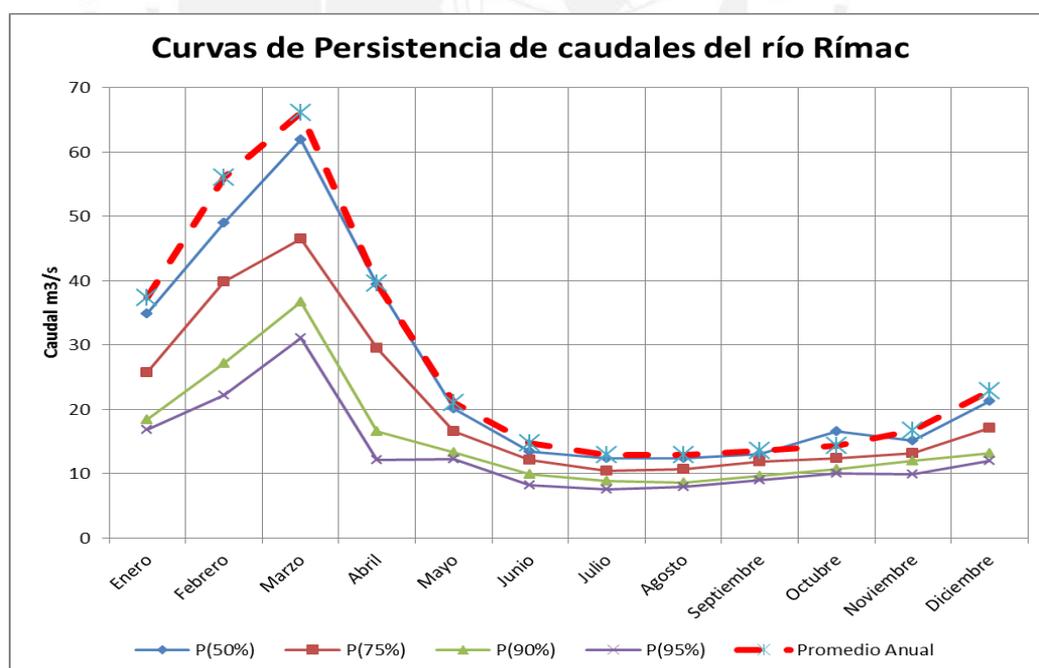


Figura 3.11: Persistencia de las descargas medias mensuales (m³/s). Fuente: ANA 2010

3.5.4 Balance Hídrico del Río Rímac

El balance hídrico para el 2010 de la cuenca del río Rímac, mostró un déficit en los meses de junio a noviembre y superávit en los meses de diciembre a mayo. El balance neto anual señala un superávit anual de 146.92 MMC.

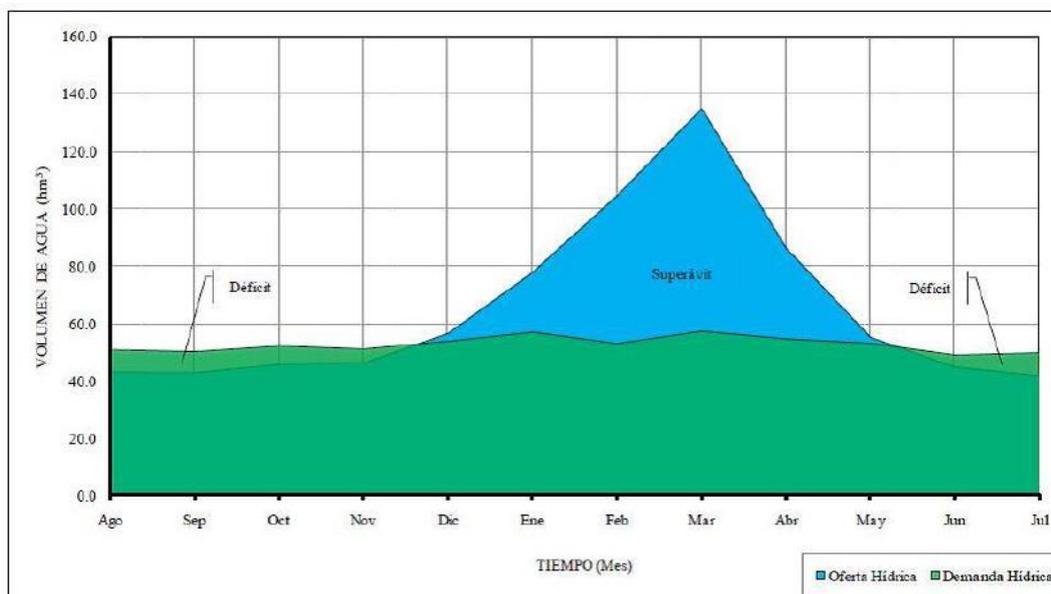


Figura 3.12: Balance Hídrico Anual del río Rímac. Fuente: ANA 2010

3.5.5 Calidad de las fuentes de Agua para Lima

Las aguas del río Rímac son escasas y contaminadas. (AQUAFONDO 2013) y están clasificadas como Clase II: Aguas para abastecimiento doméstico con tratamiento equivalente a procesos combinados de mezcla y coagulación, sedimentación, filtración y cloración. (DIGESA, 2009)

La calidad del agua en el río Rímac y sus tributarios principales, se caracteriza por concentraciones elevadas de sólidos en suspensión, un pH ligeramente ácido a ligeramente alcalino, calcio como el principal catión, sulfato y bicarbonato como los principales aniones, y al menos trazas de elementos químicos metálicos y no metálicos. Las trazas de elementos prominentes incluyen manganeso y cinc (DIGESA 1997).

El río Rímac actúa como un gran sistema de neutralización con los precipitados metálicos siendo acumulados como sedimento del río o transferidos corrientes abajo como sólidos en suspensión. Los elementos menos solubles incluyen aluminio, cadmio, cobre, hierro, plomo, níquel y cinc. El arsénico y el antimonio tenderían a formar compuestos relativamente insolubles. (DIGESA 1997).

La cuenca alta del Río Rímac es una importante zona de actividad minera, incluyendo la parte alta de la sub cuenca de Santa Eulalia. Ello representa una importante fuente de contaminación del río. El MINAN reportó 62 puntos de vertimientos de agua residuales, de los cuales 10 corresponden a explotaciones de mineral (0.77 m³/s), 25 de origen industrial (1.19 m³/s) y 27 domésticos (1.22 m³/s) que descargan directa o indirectamente al río Rímac con un caudal total de 3.2 m³/s que equivalen a 100.6 MMC/año (Huapaya C. 2009).

Las fuentes de contaminantes se han ampliado con el tiempo, el estudio de identificación de fuentes contaminantes en la cuenca del río Rímac realizado por el ANA en el 2011, identificó a 82 fuentes de las cuales 10 eran de origen minero, 28 industriales, 40 domésticos y 4 vertimientos de aguas residuales de riego. En adicional se detectaron 91 botaderos de residuos sólidos. (Chung T. 2013).

En uno de los análisis más completos realizados sobre los efectos de la calidad de las aguas del río Rímac en la producción agrícola, realizado en el 2012 por el Ing. Henry Juarez MSc, concluyó que durante los años 2000 y 2002 se detectaron valores de Arsénico y Plomo que comprometieron la producción de hortalizas a mayor nivel que otros años, pero que al 2012 ninguna muestra sobrepaso los LMP sugeridos para hortalizas.

3.6 Desarrollo Sostenible y Soluciones para la ciudad de Lima

La presente tesis ha abordado el objetivo de buscar soluciones sostenibles para el futuro del suministro de agua para la ciudad de Lima, para ello se requiere evaluar el enfoque del concepto y las posibles formas de medirlo.

3.6.1 Antecedentes del Desarrollo Sostenible

El concepto de Desarrollo Sostenible comienza a forjarse a mediados de la década de los 70 y tiene un primer esbozo en la publicación en 1980 de la "Estrategia mundial para la conservación de la naturaleza y el medio ambiente", declaración promovida por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y los Recursos Naturales (UICN) con la colaboración del PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el medio Ambiente) y el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF por sus siglas en inglés).

La Estrategia resaltó que no puede existir desarrollo sin conservación y formuló tres objetivos principales: Mantener los procesos ecológicos esenciales y los sistemas vitales (que incluyo los suelos y la calidad del agua), preservar la diversidad genética y asegurar el aprovechamiento sostenido de las especies y los ecosistemas y dejó un mensaje claro: que la conservación no es opuesta al desarrollo, enfatizando que ésta incluye la protección y el uso racional de los recursos naturales. Esto exige que "*Los seres humanos, en su búsqueda del*

desarrollo económico y el disfrute de las riquezas de la naturaleza, deben llegar a un acuerdo con la realidad de la limitación de recursos, con la capacidad de carga de los ecosistemas, y deben tener en cuenta las necesidades de las generaciones futuras" (UCN, UNEP & WWF, 1980, p.1)

La preocupación ética por las necesidades de las generaciones futuras es el antecedente bajo el cual se deben entender las declaraciones contenidas en "Nuestro Futuro Común" (Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente. 1989), más conocido como el informe Brundland que definió "Desarrollo Sostenible", como: "aquel que garantiza las necesidades del presente sin comprometer las posibilidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (p.51) y dio un alcance social y económico al concepto de "Desarrollo Sostenible" al indicar que éste exige luchar contra la pobreza mediante la distribución de recursos de manera más equitativa.

En 1991, la IUCN, el PNUMA y el WWF publican "Cuidar la Tierra" Estrategia para el futuro de la vida. (Caring for the Earth. A Strategy for Sustainable Living). Estrategia basada en la convicción que las personas pueden alterar su conducta y pueden trabajar juntos para hacer las cosas de un mejor modo. Se definió el concepto de Sostenibilidad como el "desarrollo que mejora las calidades de vida de los seres humanos en armonía con la capacidad de carga que puede soportar el ecosistema" (p. 10).

"Cuidar la Tierra" propuso una serie de valores como construir una sociedad sustentable en función de las mejoras de calidad de vida de los seres humanos en armonía con la conservación de la biosfera y con el objetivo de hacer uso sostenible de los recursos naturales, minimizando la tasa de consumo de aquellos recursos no renovables para no sobrepasar la capacidad de carga finita del planeta aunque al final siempre los recursos no renovables se agotarán con el crecimiento poblacional dado que "Pocas personas que consumen mucho pueden causar tanto daño como muchas personas que consumen poco" (IUCN et al 1991, p.1)

Finalmente en 1992 se suscribió en Río de Janeiro, la Agenda 21 como parte central de la Conferencia de Las Naciones Unidas para el Desarrollo y El Medio Ambiente que contenía un plan de acción para el desarrollo sostenible y que integraba los conceptos de "Medio Ambiente" y "Desarrollo Sostenible" en los diferentes niveles de la propuesta del plan acción comprendido.

Las definiciones contenidas en estas pocas líneas son el marco conceptual y ético para un entendimiento del criterio de sostenibilidad, desde nuestras actitudes como individuos frente a la naturaleza hasta nuestras respuestas como sociedad frente a los retos del uso responsable de los recursos naturales.

Esta responsabilidad debe ser asumida desde una perspectiva que comprenda las múltiples dimensiones que del "Desarrollo Sostenible", como la económica, la política y la epistemológica, (Radcliffe, 1992). Hoy entendidas como

aspectos económicos, sociales y ambientales y son conocidos como la triple base para el análisis de sostenibilidad y que vuelven el concepto más complejo.

3.6.2 Desarrollo Sostenible ¿Paradoja o Paradigma?

Si entendemos que el desarrollo sostenible implica una menor demanda sobre los recursos naturales y que este conlleva necesariamente una mayor demanda de insumos para atender a una creciente población con más capacidad económica, estaremos claramente envueltos en una paradoja (Latouche 2003), pues la expresión de “Desarrollo Sostenible” es, como sostuvo Radcliffe un oxímoron, (1997) figura literaria al mismo nivel de incongruencia de expresiones como: hielo líquido o agua seca.

Es fácil abrigar los ideales de un mundo mejor (uno verde) y esperar que las leyes del mercado regulen la oferta con la demanda de recursos naturales limitados, sin embargo, debemos tener claro que la escasez no necesariamente se refleja en los precios y el mercado a veces falla en aliviarla (Mc Mahon G. y Mrozek J. 2012).

3.6.3 Sostenibilidad y Sostenibilización

Se ha descrito el marco conceptual sobre el que se basan la mayoría de las corrientes ecologistas actuales como “Economía Verde”, “Construcción Sostenible”, “Gestión Sostenible de Recursos” etc. Así como prolíficos, los principios del “Desarrollo Sostenible” han sido fuente de innumerables discusiones y se han prestado a mucha confusión. El debate sobre su significado continúa hasta nuestros días y en estas épocas de cambios, estamos obligados a tener presente que los recursos naturales no son infinitos por lo que la forma como los usamos y distribuimos nos concierne a todos, *“en nuestros días somos testigos de las primeras etapas de una nueva revolución social, comparable en importancia y escala con la revolución industrial, La Revolución Sostenible (Sostenibilización)”* (Burns 2012 p.1127)

Este nuevo orden planteado (el de la Sostenibilización), exige repensar el mundo para la adopción de nuevos paradigmas, ante el fracaso de la visión de los economistas para prever los efectos sobre el medio ambiente, para lo cual se debe contabilizar la forma en que se presenta la destrucción de la Biosfera (Grey 1990) y actuar de forma propositiva frente a la necesidad de gestionar los recursos naturales de forma racional, responsable y sin caer en ideologías. Se requiere de fijar una postura frente la cualidad sostenible de la gestión de los recursos naturales.

La naturaleza finita de los recursos naturales plantea grandes retos, entre ellos la necesidad de desarrollar tecnologías que permitan reemplazar unos por otros y exige cuantificar los mismos para garantizar su disponibilidad durante el mayor tiempo posible para la mayor cantidad de beneficiarios, solo de esta

manera se logran los espacios necesarios para las acciones en los planos sociales y económicos.

3.6.4 Evaluación de la Sostenibilidad Hídrica

Afrontar el desafío de ser sostenibles es un desafío ético que requiere de la adecuación de estrategias de desarrollo y de la adecuación de modelos económicos para que se puedan prever los efectos sobre el medio ambiente (Boulding 1966) de la actividad humana. Se requieren la implementación sistemas de gestión y gobernanza para orientar la selección de las tecnologías más adecuadas al objetivo del desarrollo sostenible.

A mayor número de beneficiarios de un recurso natural, más rápido éste se agotará, por lo que garantizar primero su disponibilidad durante el mayor tiempo posible es paso previo a discutir cómo se reparte. Explicado lo anterior, resulta evidente que nuestro criterio de “sostenibilizar” o gestionar de forma sostenible el agua, tiene dos componentes claramente distinguidos en independientes una de otra: 1) Maximizar el tiempo de duración de las existencias del recurso hídrico a administrar mediante la inversión en infraestructura y tecnología que permita alcanzar mayor expectativa de vida sostenible, 2) Racionalizar la adecuada distribución y niveles de consumo del recurso.

La triple base (económica, ambiental y social) para el análisis de sostenibilidad será aplicada con distintos criterios en cada etapa de nuestro proceso de análisis.

En la primera etapa en donde lo relevantes es garantizar un mayor tiempo de oferta de un determinado recurso, (compuesto evidentemente de 1 o más recursos naturales con algún nivel de proceso o valor agregado), donde intervendrán las consideraciones económicas, en particular en lo que respectan las leyes de la oferta y la demanda relegando cualquier contemplación social que estará fuera de las matemáticas en esta etapa.

Este principio planteado, resulta evidente en el caso del agua, en donde si el agua es insuficiente, serán siempre los sectores de menos recurso de la población los que carecerán de ella y los que tendrán que pagar más por cada litro.

El beneficio social indirecto en esta etapa del proceso de sostenibilización será la garantía de un menor precio de mercado del bien o recurso como consecuencia de la desaparición de la sombra de la escasez o el deterioro de la calidad de la oferta.

En la segunda etapa, estabilizado el panorama de la oferta del recurso se podrá gestionar la demanda mediante cualquiera de las múltiples técnicas

desarrolladas por diversos autores para racionalizar el consumo y garantizar la adecuada distribución del bien.

Adicional al marco conceptual de evaluación, lograr el objetivo de evaluación de la sostenibilidad, nos exige contar con el uso de indicadores como herramientas de evaluación.

3.6.5 Indicadores de sostenibilidad hídrica

El criterio de medición de la sostenibilidad, resulta indispensable para poder monitorear nuestra evolución como sociedad, no podremos construir un futuro sostenible si no somos capaces de definir donde estamos en términos de sostenibilidad, a donde vamos y cuánto tiempo tardaremos en llegar.

Medir el “Desarrollo Sostenible”, es un reto mayor, que hasta la fecha no ha sido resuelto de manera satisfactoria para muchos, dificultad surgida por la aparente contradicción entre Desarrollo y Sostenibilidad.

Entonces ¿cómo tomar decisiones idóneas y bien informadas si no somos capaces de medir la mayor o menor sostenibilidad de una opción con respecto a otra para decidir sobre la afectación de un recurso? o más grave aún si desconocemos la situación de sostenibilidad del recurso que pretendemos racionalizar.

Abordar la búsqueda de un indicador para evaluar la sostenibilidad es una tarea urgente que no estará exenta de detractores que tildarán a la misma como inviable “medir lo inconmensurable”. (Gray 1990). ¿Es realmente inconmensurable la sostenibilidad?, creemos que no, que para poder medir la sostenibilidad se debe determinar la principal variable a evaluar y la respuesta es “El tiempo”. El tiempo es la principal característica a la sostenibilidad y su medición es un problema práctico por confusión conceptual en su definición contradictoria (Amjad, Ojomo , Downs , Cronk & Bartram, 2015).

La evaluación de la sostenibilidad es cualquier proceso que tenga por objetivo, el de integrar aspectos sostenibles en la toma de decisiones, mediante la identificación y evaluación de los impactos en la sostenibilidad (Bellagio Principles. 1996). Empezar la evaluación de la sostenibilidad, es decir el de cuantificar la sostenibilidad de un modelo de desarrollo es por decir lo menos valerosa, sino poco sostenible en sí misma y quién sabe si ilusa.

A pesar de la complejidad que representa la evaluación de la sostenibilidad, algunos investigadores no han rehuído al reto, tal es el caso de Warhurt (2002) que considero que la medición del desarrollo sostenible requiere de una aproximación de dos etapas, la primera de ellas era la evaluación del desempeño sostenible en campos independientes y luego la sostenibilidad analizada sería la resultante de combinar los niveles de sostenibilidad evaluados para cada campo, combinándolos de acuerdo a sus interrelaciones.

Inteligente iniciativa la de Warhut, resolver el problema por partes, de lo contrario no hubiera podido evaluar campos diferentes que se confunden entre sí, había que separarlos, sin embargo la problemática viene el segundo paso de su propuesta, consistente en combinar de una forma específica los valores de sostenibilidad para diferentes campos, nada mal como concepto, pero resulta que hay infinitas posibilidades para lograr esto, tanto por la diversidad de los campos a seleccionar como producto de las diferentes apreciaciones que tenga cada investigador sobre los pesos de los diferentes campos y materias de aplicación de los resultados, sería interminable.

La problemática de desarrollar indicadores de sostenibilidad se vuelve más compleja si se tiene en cuenta que cada indicador deberá obedecer a una realidad económica, social y ambiental diferente para cada lugar, es pues la búsqueda de indicadores de sostenibilidad un emprendimiento loable pero quijotesco, necesario pero hasta hoy con poca claridad de resultados.

Algunos esfuerzos populares, si se pueden llamar exitosos se han realizado hasta la fecha para desarrollar indicadores de situación, que midan algún aspecto en particular de la sostenibilidad, como son: La Huella Ecológica (Wackernagel y Reese 1992) orientada a medir el nivel de uso de naturaleza que hace el ser humano y se estandarizó en el 2006, logró como resultado la valiosa llamada a la toma de consciencia de la sobreexplotación que estamos haciendo del planeta, la Huella Hídrica (Hoekstra y Chapagain 2002) como indicador alternativo del uso de agua, su uso fue normado en el 2014 por la norma ISO 14046 (luego de 5 años de discusión), entre otros numerosos ejemplos de indicadores (Huella de carbono, Índice verde etc.)

En la tabla 3.6, se muestran otros ejemplos de indicadores de sostenibilidad hídrica, en ella se puede apreciar la naturaleza cualitativa de cada indicador.

Tabla 3.6: Indicadores de Sostenibilidad Hídrica.

INDICADOR	COMPONENTE	INDICADOR	DESCRIPCION		
Canadian Water Sustainability Index	Recurso	Disponibilidad	Cantidad de agua dulce renovable por persona		
		Suministro	La vulnerabilidad del suministro causado por variaciones estacionales		
		Demanda	El nivel de la demanda de uso de agua basado en las licencias otorgadas		
	Salud del Ecosistema	Estrés	La Cantidad de agua extraída del Ecosistema		
		Calidad	El puntaje de "The water Quality Index" para la protección de la vida acuática		
		Pesca	Tendencia poblacional hacia las especies de peces significativas a nivel cultural y económicas		
	Infraestructura	Demanda	Cuanto se tardará en exceder la capacidad de los servicios de agua y desague producto del crecimiento poblacional.		
		Condición	Condición física de las matrices de agua y alcantarillado reflejado por las pérdidas del sistema.		
		Tratamiento	Nivel de tratamiento de aguas Residuales		
	Salud Humana	Acceso	La cantidad de agua potable accesible por persona		
		confiabilidad	La cantidad de días interrupción por persona.		
		Impacto	Cantidad de enfermedades atribuibles al agua.		
Capacidad	Financiero	La capacidad financiera de la comunidad para gestionar los recursos hídricos y responder a los retos locales			
	Educación	La capacidad humana de la comunidad para gestionar los recursos hídricos y agendar aspectos locales del agua.			
	Entrenamiento	El nivel de entrenamientos que los operadores de agua y aguas residuales han recibido.			

INDICADOR	COMPONENTE	INDICADOR	PRESIÓN	ESTADO	RESPUESTA
Watershed Sustainability Index	Hidrología (H)	Cantidad	D1: variación per cápita de agua disponible en la cuenca durante el periodo de estudio. Relativo al promedio de largo plazo (m ³ /persona/año)	Disponibilidad per-capita en Cuenca (m ³ /persona/año) considerando aguas superficiales y subterráneas.	Mejoras de la eficiencia del uso de agua en la cuenca en el periodo de estudio
		Calidad	D2: Variación en la Cuenca de BOD5 durante el periodo de estudio, referida a el promedio en largo plazo.	Promedio en el largo plazo del DBO5 (mg/l)	Mejoras en sistemas de alcantarillado tratamiento y disposición final en la cuenca en el periodo de estudio.
	Medio Ambiente (E)	EPI de la Cuenca (rural y urbana) en el periodo de estudio	Porcentaje del area de la cuenca con vegetación natural (Av)	Evolución de las áreas de conservación en la cuenca (Áreas protegidas BMPs.)	
	Vida (L)	Variación per-cápita en la cuenca de Ingresos-HDI en el periodo de estudio en comparación con el periodo previo	HDI de Cuenca (ponderado por población)	Evolución en la cuenca del HDI, durante el periodo de Estudio.	
	Política (P)	Variación en la cuenca de la educación-HDI en el periodo de estudio en comparación con el periodo anterior	Capacidad institucional en la Cuenca, IWRM (legal y organizacional)	Evolución en los gastos IWRM de la cuenca durante el periodo de Estudio.	

3.6.6 Postergar lo inevitable

Abordar el “Desarrollo Sostenible” es gestionar un recurso de forma sostenible, esto implica responsabilidad con las generaciones futuras y exige hacer uso racional de los recursos naturales y preservar las condiciones de la biosfera para que en el futuro siga albergando a la humanidad.

Los recursos naturales se agotaran tarde o temprano producto de la explosión demográfica global y el frágil ecosistema que nos da sustento como especie sufrirá cambios irreversibles (al menos dentro del horizonte de vida de existencia de la especie humana), de modo que pensar en las generaciones futuras puede conllevar una gran frustración por lo aparentemente inevitable de las consecuencias que tendrán que sufrir.

La sostenibilidad real una utopía, la debemos abrigar como una convicción moral. Es claro lo poco que podemos hacer para evitar el desenlace final, por lo que nuestra mejor carta como humanidad es postergar el desenlace y ganar tiempo con la remota esperanza que el desarrollo tecnológico permita hacer frente a los problemas que hoy no encuentran solución, es en buena cuenta, postergar lo inevitable a riesgo de fracasar en el intento, como advirtió Carpenter en 1995 *“La sostenibilidad esperanzada en las mejoras tecnológica es un sostenibilidad débil”*

Las contradicciones ya han sido señaladas por otros autores en búsqueda de índices representativos de la sostenibilidad, tal es el caso de William Alley quien señaló en el 2004 que la gestión sostenible para el Agua Subterránea ha sido entendida con ambigüedad en la definición como el desarrollo y uso de recursos para mantenerse de forma indefinidamente sin causar consecuencias graves al ambiente, la economía o a la sociedad.

Es imposible la duración indefinida de cualquier recurso natural. Teniendo presente las otras dimensiones de línea base que son la económica y la social se debe redefinir el “Desarrollo Sostenible” como la acción de hacer uso de los Recursos Naturales en forma racional y socialmente contemplativa para satisfacer nuestras necesidades de hoy procurando la mayor duración posible de los mismos para que las futuras generaciones potencialmente perjudicables sean las más distantes posibles.

La relación entre los conceptos de la llamada triple línea base resultará clara, si entendemos que la distribución de los bienes debe buscar atender los derechos de todos por igual es decir buscaremos siempre uniformizar las sociedades y para ello los conceptos económicos son relevantes. Distribuir el acceso a los diversos recursos naturales nos es tema fácil y se requieren competencias de gestión y procesos de toma de decisiones muy bien informadas.

3.6.7 Gestión Hídrica Sostenible

Los recursos de agua dulce serán los recursos naturales más limitados en el futuro producto del incremento de la demanda, los cambios climáticos y la degradación de los ecosistemas acuáticos (Wiek, Larson 2012). Los investigadores han concluido que existen serios motivos de preocupación por que el agua dulce se convierta en el recurso más limitado en el futuro, producto la estrecha relación entre el uso de agua y la producción de alimentos, energía y otros bienes y servicios (Godfray et al. 2010).

La Gestión Sostenible del agua debe garantizar la disponibilidad de forma oportuna y con la calidad adecuada para satisfacer la demanda, sin que su valor de accesibilidad resulte prohibitivo para los sectores menos favorecidos de la sociedad.

La presente investigación, tiene por objetivo seleccionar y proponer soluciones más sostenibles, como modelos de gestión y como criterio de selección de alternativas tecnológicas. Para este fin, los indicadores resultan indispensables, requerimos conocer que tan “sostenibles somos hoy” es decir que tan responsablemente estamos consumiendo los recursos naturales hoy.

En el 2000, Lancker y Nijkamp sustentaron la urgente necesidad de indicadores para evaluar la sostenibilidad y en particular los de umbrales de los mismos como respuesta a la creciente crisis medioambiental. Consideraron que el desarrollo sostenible es un a construcción social que depende principalmente de la elaboración e implementación de normativas, de toma de decisiones y de elecciones que finalmente serán basadas en los valores que asignemos a las opciones de desarrollo sostenible.

Parece un objetivo simple, en especial siendo el agua un recurso renovable, pero no lo es, teniendo en cuenta que el agua es un recurso finito y escaso, que su disponibilidad no depende únicamente de su existencia física, sino de políticas adecuadas que la acerquen a la demanda, que la gestión del agua es un tema complejo de soluciones que normalmente requieren inversiones importantes y finalmente de la falta de indicadores adecuados para poder evaluar la sostenibilidad de las gestiones a implementar.

3.6.8 Integración en la Gestión del Agua

El concepto de Gestión Integral del Agua Urbana rompe con el tradicional paradigma de la gestión del suministro de agua independiente de los servicios de saneamiento y drenaje centralizados surgidos como modelo para afrontar las crisis sanitarias del siglo XIX. Las políticas centralizadas en la gestión de recursos naturales suelen priorizar aspectos extractivos sin contemplar entornos ecológicos, por lo que generan impactos negativos al medio ambiente como son: Modificación de ecosistemas naturales por a la reducción de flujos, incremento de disposición de residuos sólidos y líquidos indiscriminadas, con consecuencias negativas para la flora y fauna nativa, para la calidad de los flujos de agua en las cuencas de los ríos, y aguas costeras, manejo inadecuado de contaminantes y nutrientes, exceso de uso de químicos y de energía. (Mitchell V. 2006)

La Gestión Integrada de los recursos hídricos, comprende la gestión de la demanda y de la oferta teniendo presente la distribución espacial y temporal de la misma, para poder adecuar los objetivos de implementación de soluciones de ingeniería que eventualmente descentralizaran la infraestructura deberá por lo tanto considerar todos los componentes del ciclo natural del agua urbana para optimizar las soluciones. En este contexto, resulta evidente que las soluciones a implementar para el manejo de las aguas residuales generadas en las ciudades serán componentes fundamentales de cualquier solución integrada.

3.7 Escasez de Agua y Estrés Hídrico

El estrés hídrico se define como la situación en la cual la demanda de agua es más importante que la cantidad disponible durante un periodo determinado o cuando su uso se ve restringido por su baja calidad. El estrés hídrico provoca un deterioro de los recursos de agua dulce en términos de cantidad (acuíferos sobreexplotados, ríos secos, etc.) y de calidad (eutrofización, contaminación de la materia orgánica, intrusión salina, etc.). (PNUMA 1989). La escasez de agua se da cuando la demanda supera el suministro de agua dulce en una zona determinada. La escasez de agua se evidencia por la insatisfacción total o parcial de la demanda, generándose la competencia económica por la calidad y la cantidad del agua, y los conflictos entre usuarios. (FAO 2013).

La escasez de agua es un concepto relativo, puesto que aun existiendo su disponibilidad física, está no necesariamente está disponible para la demanda, estimados de la ONU indican que para el 2025, 1,800 millones de personas vivirán en países o regiones con absoluta escasez de agua y dos tercios de la población mundial podrían estar bajo condiciones de estrés Hídrico (2015).

Los valores tradicionales propuestos por Falkenmark para evaluar la condición de estrés hídrico de una región, son valores globales para evaluar la situación

de una región por lo que las cifras incluyen todos los criterios de uso del agua (incluidos el uso agrícola) y se muestran en la tabla 3.7:

Tabla 3.7: Indicador de Estrés Hídrico (Fuente Falkenmark, 1993)

GRADO DE DISPONIBILIDAD	DISPONIBILIDAD (m³/hab/año)
Escasez extrema	Menor que 1,000
Escasez crítica	1,000 < D < 1,700
Disponibilidad Baja	1,700 < D < 5,000
Disponibilidad Media	5,000 < D < 10,000
Disponibilidad Alta	D > 10,000

La disponibilidad de agua depende de la intervención humana, la cual a través de los diferentes mecanismos ofrecidos por la ingeniería pone en disposición el recurso para el uso de quien la necesita. Dependerá entonces de inversiones, muchas de ellas de montos considerables que alteran los cursos normales de ríos, derivan aguas de embalses naturales o la extraen del subsuelo. Como todo emprendimiento humano, la inversión en la gestión de recursos hídrico, depende finalmente de decisiones políticas, de gestión privada y/o gubernamental y finalmente de planificación y capacidad económica.

Por lo que es de esperar que la escasez de agua se intensifique la carestía de medios económicos y de capacidad de gestión por lo que la identificación temprana de las variables que afectan el suministro hídrico puedan anticiparse, evitarse o mitigarse.

La escasez de agua estará determinada por la falta física de agua disponible para satisfacer la demanda, el nivel de desarrollo de las infraestructuras que controlan el almacenamiento, distribución y acceso y la capacidad institucional para aportar los servicios de agua necesarios.

3.8 Requerimiento Hídrico por persona

Los requerimientos de agua de un ser humano promedio para subsistir son estimados entre 3 y 6 l/día, son valores que dependerán de factores climáticos. La dotación mínima deberá comprender también la satisfacción de las condiciones mínimas sanitarias que requiere el ser humano cuyo el valor será de 20 litros por persona por día de provisión de agua limpia, para maximizar los beneficios de combinar la disposición de los desperdicios con los requerimientos para higiene. (Gleick P 1996)

Otras actividades pueden demandar mayores cantidades de agua, como son: Bañarse: 70 l/d (45-100). Mínimo para aseo: (5-15) lpd, ducha 15 a 25 l/d., para cocinar 30 l/d. (10 -50) (1/3 para cocinar y 2/3 para lavado de platos). Después

de analizar los requerimientos de agua para cada actividad humana, Gleick P, recomienda 80 lpd, (30 m³/por persona año) medido en el ingreso de la vivienda para satisfacer los requerimientos.

El Banco mundial recomienda un mínimo de 25 l/d para beber y sanidad y las agencias de desarrollo internacional recomiendan entre 20 a 40 l/d (alineados con los valores de Agenda 21 (estos valores excluyen agua para cocinar y limpiar). Si contabilizamos los otros conceptos de consumo de agua, como baño y cocina, el rango total será de 27 a 200 l/d. Como amplio rango al valor de 100 l/d propuestos por Falkenmark en 1996.

Los recientes esfuerzos para integrar los aspectos medioambientales con los de desarrollo sostenible en lo económica y social, tienen que regresar a los conceptos de las necesidades básicas humanas y la fundamental es el acceso al agua limpia. Consideraremos un mínimo de 50 lpd como derecho humano mínimo fundamental para el ser humano. (Sin incluir el requerimiento hídrico para garantizar la seguridad alimentaria) para las evaluaciones de sostenibilidad en la presente tesis.

3.9 Situación Hídrica Global

El aumento de demanda de agua de la población mundial ha crecido dramáticamente en el siglo XX, incrementando su consumo en más del doble con referencia a la demanda global (UNESCO 2003). “Hoy existe una crisis mundial del agua. Pero ésta no radica en que sea insuficiente para satisfacer nuestras necesidades. Se debe a que la mala gestión ocasiona que miles de millones de personas, y el medio ambiente, sufren enormemente” (World Water Council 2015).

La ONU estimó recientemente que para el 2030, sólo el 60% de la demanda mundial de agua podrá ser cubierta.

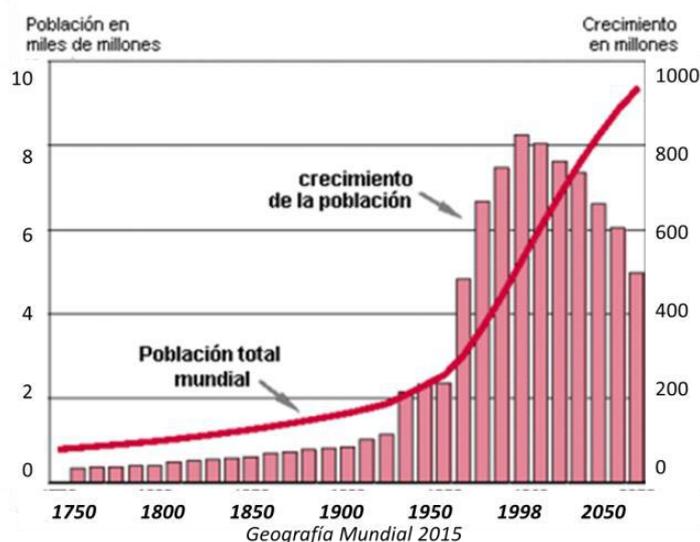


Figura 3.13: Crecimiento población Mundial

El uso de agua de forma indiscriminada ha crecido a nivel tal punto que en muchas regiones ya no es posible el suministro de un servicio de agua fiable. (FAO, 2013). El crecimiento poblacional sumado al desarrollo económico ejerce una presión insostenible sobre los recursos hídricos, en especial en las zonas áridas del planeta. La demanda de agua excede largamente sus usos sanitarios y se estima en un 70% el destino de la misma para fines agrícolas. Muchos de los recursos que la población demanda hoy en día, cuentan entre sus insumos con abundante cantidad de agua (hoy denominada agua virtual)

Se espera que para el año 2050 sea necesario producir 1 billón de toneladas de cereal y 200 millones de toneladas de carne más al año para poder satisfacer la creciente demanda alimentaria (FAO 2013) que presionará sobre los ya escasos recursos hídricos globales

El acceso al agua para uso doméstico y productivo como agricultura, industria y otras actividades económicas, influyen directamente sobre la pobreza y la seguridad alimentaria comprometiendo el Objetivo del Milenio N°1 “Erradicar la pobreza extrema y el hambre” (ONU 2015).

El agua para satisfacer las necesidades básicas no es negociable, las extracciones de agua para uso doméstico solo representan el 10% de todos los usos. (UNESCO 2003), por lo que la escasez futura de este recurso renovable incidirá directamente sobre la hambruna, sobre el desarrollo económico y finalmente sobre la estabilidad global.

A iniciativa de la ONU, el 22 de Marzo del presente año (2015) se celebró el “Día Mundial del Agua” cuyo tema fue “Agua y Desarrollo Sostenible” en busca crear conciencia sobre el agua y el saneamiento.

El agua es un recurso escaso y su valor es esencial para la vida y para el crecimiento económico. El volumen de agua en la Tierra se estima en 1400 millones de kilómetros cúbicos (Km³). Sólo el 2,5% de este total (35 millones de km³) es agua potable. De este 2,5%, el 69,7% (24 millones de km³) está en forma de glaciares y hielo en la Antártida y el Ártico, el 30% está en acuíferos subterráneos y sólo el 0,3% está en lo que se denominan aguas superficiales (Shiklomanov's I. 1993).

La distribución global entre los diez países con más recursos hídricos es como se indica en la tabla 3.8:

Tabla 3.8: Recursos Hídricos Totales de algunos países (Boggiano 2013)

Puesto Mundial	País	Km³/año
1	Brasil	8233
2	Rusia	2132
3	Estados Unidos	1913
4	Canadá	1233
5	China	922
6	Colombia	814
7	Indonesia	622.5
8	Peru	457.2
9	India	424.4
10	República Democrática del Congo	336

Los recursos hídricos de un país, se calculan mediante el índice denominado “Total Actual de Recursos Hídricos Renovables” (Total Actual Renewable Water Resources). Corresponde al máximo monto anual disponible de agua para un país en un determinado momento.

El criterio de cálculo es: Total de Aguas Superficiales + Total de Aguas Subterráneas - Solapamiento entre Aguas Superficiales y Subterráneas. La unidad de medida es de kilómetros cúbicos por año (Km³/año).

Si bien las tablas de reservas de agua son en monto total, la apreciación sobre la disponibilidad hídrica variará notoriamente, así si tenemos en cuenta la población de cada país, China ocuparía el puesto 121 y Sudamérica tendría en 20 años un severo déficit hídrico. El consumo per cápita de agua varía también notoriamente entre algunos países, tal es el caso de Turkmenistán, que con un consumo de 5,752 m³ per cápita anual es el país de mayor demanda per cápita mientras que el consumo per cápita anual en Norte América es de 1,668 m³ y en Sudamérica es de 471 m³ (Green Facts, 2015).

4 Resultados

4.1 Caracterización Lima Metropolitana y Callao

4.1.1 Localización y Ámbito Geográfico

La ciudad de Lima, está ubicada entre la vertiente occidental de los Andes y la costa Pacífico, en la parte baja de las cuencas hidrográficas de los ríos Chillón (2,444 km²), Rímac (2,253 km²) y Lurín (1,719 Km²). Limita por el norte con la cuenca del río Huaral, por el sur con la cuenca del río Chilca, por el este con la cuenca del río Mantaro y por el oeste con el Océano Pacífico. Lima y sus cuencas presentan una gran variedad de pisos ecológicos según los distintos niveles de altitud, que van desde el litoral marino (0 msnm) hasta la cordillera (sobre los 4,800 msnm). Predominan la diversidad ecológica de las regiones Yunga (500 a 1,500 msnm) y Quechua (1,500 a 3,500 msnm).

La ciudad de Lima abarca 49 distritos: 43 de la provincia de Lima y 6 de la Provincia constitucional del Callao, Población: 9'752,000 hab. (INEI 2015), Superficie: 281,165 has. Densidad: 30 hab./ha. (MML 2010)

Se muestran en la tabla 4.1 los valores de parámetros de interés para el presente estudio:

Tabla 4.1: Características generales de la ciudad de Lima

Parámetro	Valor	Fuente
Población	9.8 millones de habitantes	INEI
Tasa de crecimiento poblacional 2015	1.6%	INEI (136,000 personas más cada año)
Cobertura de Agua Potable	91%	SEDAPAL 2014
Cobertura de Alcantarillado	77%	SUNASS 2010
Reúso de Aguas Tratadas	5%	sin considerar las aguas de tratamiento primario de Taboada que son vertidas mediante emisario submarino
Áreas verdes	2.98 m ² /hab.	SERPAR 2012
Déficit de áreas verdes	6.22 m ² /hab.	PLAM 2035 teniendo en cuenta que la OMS recomienda 9.2 m ² /hab.

4.2 Oferta y Demanda hídrica de la ciudad de Lima

4.2.1 Oferta Hídrica para la ciudad de Lima

La oferta hídrica para la ciudad de Lima depende principalmente del caudal natural del río Rímac, de los trasvases de agua de la cuenca del río Mantaro y en menor medida del caudal en avenida del Río Chillón y del acuífero de Lima.

La oferta hídrica del río Rímac, es en promedio 30.1 m³/s en épocas de avenida y de 7.87 m³/s en épocas de estiaje, por lo que los requerimientos de agua de la ciudad deben ser complementados con las aguas del sistema regulado de la cuenca alta y transcuenca.

Estos suministros son estacionales y dependen del ciclo hidrológico del agua. El año hidrológico se inicia el primero de septiembre de cada año y culmina el 31 de agosto del año siguiente. Los caudales suministrados son variables a lo largo de todo el año. Los mayores caudales se presentan generalmente entre diciembre y abril (época de avenida), debido al aporte de precipitaciones estacionales y es de mayo a noviembre (época de estiaje) cuando el río Rímac recibe las aguas del sistema lagunas reguladas de la parte alta de su cuenca y de las aguas transvasadas de la cuenca del Mantaro a través de sistemas de canales y túneles transandinos.

En términos anuales, la oferta hídrica para la ciudad de Lima se puede distribuir como se muestra en tabla 4.2

Tabla 4.2: Oferta Hídrica Anual del Río Rímac. Elaborado en función de los datos mostrados por SEDAPAL en el Plan Maestro del 2014 y los tarifarios de SUNASS del 2010 y 2015

Oferta de Agua en la Cuenca del Río Rímac (MMC)		
	Anual (MMC)	%
Cuenca: Rímac/Chillón		
Aguas Superficiales	754.76	61.50
Aguas Subterráneas	125.97	10.26
Transvase del Mantaro	346.58	28.24
Total	1,227.30 MMC	
	Estiaje (MMC)	%
Cuenca: Rímac/Chillón		
Aguas Superficiales	248.03	40.81
Aguas Subterráneas	78.02	12.84
Transvase del Mantaro	281.78	46.36
Total	607.82 MMC	

De La tabla mostrada, fácilmente se puede apreciar que ya en la actualidad las aguas de la cuenca del Mantaro pueden llegar a representar hasta cerca del 50% de la oferta hídrica durante los meses de estiaje (el cálculo considera a las

aguas de infiltración del túnel Gratón que provienen en parte de la cuenca del Mantaro)

4.2.2 Demanda hídrica de la ciudad de Lima Metropolitana y Callao

La demanda hídrica de la ciudad de Lima estimada por la empresa estatal SEDAPAL, encargada de administrar los servicios en la ciudad, es en promedio de 257.6 l/hab/día, valor estimado a nivel planta de producción de agua potable. Según cálculos de SEDAPAL contenidos en el Plan Maestro del 2014 (Tomo II), la ciudad de Lima requiere de un suministro de 26.863 m³/s para satisfacer sus necesidades (846 MMC al año) y proyecta que alcance los 38.256 m³/s para el 2045, es decir un incremento de 42.41% en los próximos 30 años (1.185% anual) algo menor que el esperado para el crecimiento poblacional del 48.7% proyectado por esa misma institución para los próximos 30 años en la ciudad de Lima (1.28%).

En conclusión, las cifras mostradas por SEDAPAL estiman que la demanda hídrica de la ciudad crecería a menor tasa que el crecimiento poblacional. De otro lado, si tenemos en cuenta que sólo el 70% del agua es facturada, es decir que el sistema de producción y suministro de agua potable en la ciudad tiene pérdidas del 30%, podemos estimar que la demanda real promedio en punto de entrega de los usuarios en Lima es de aproximadamente 180 l/día x habitante (257.6 x 70%).

Además, si se considera que actualmente existen alrededor de 8% de limeños, sin conexión de servicio de agua potable (alrededor de 780,000 personas), como el ciudadano que se muestra en la figura 4.1, se concluirá que la demanda potencial es mayor a la señalada por SEDAPAL.

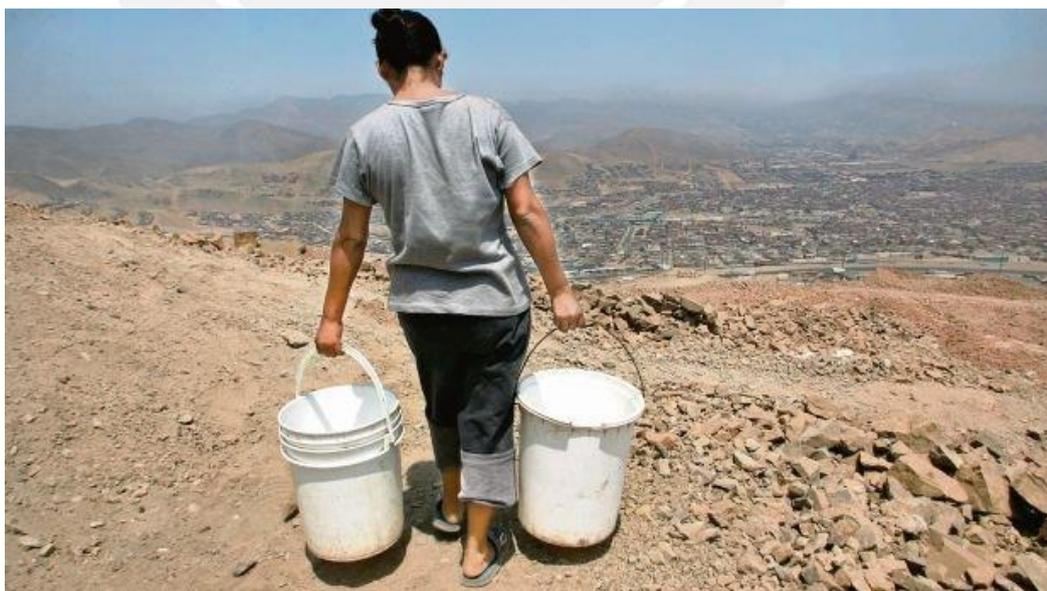


Figura 4.1: Foto de diario El Comercio, Mayo del 2015: Falta de servicios de agua potable en Carabayllo y El Agustino Lima.

4.2.3 Proyección del crecimiento poblacional y de la demanda

La proyección del crecimiento de la demanda hídrica de la ciudad de Lima está directamente vinculada al crecimiento de la población, al crecimiento económico y a la capacidad de SEDAPAL de ampliar las redes de suministro para atender la creciente demanda. Las evaluaciones realizadas por SEDAPAL por lo general incorporan análisis detallados de los consumos de agua según cada sector socio-económico y el crecimiento de la población en base a las tasas de crecimiento poblacional estimadas por el Instituto Nacional de estadística e informática.

La proyección de crecimiento población asumida por SEDAPAL para la estimación de la demanda es de 1.25% entre el 2015 y el 2040, es decir 36.2% de crecimiento poblacional para los próximos 25 años. Consideró en el Plan maestro del 2014 que a inicios del 2015 la ciudad de Lima tendrá una población estimada de 9'700,000 (El INEI estima actualmente la población en 9.75 millones) y será de 13'230,000 para el 2040. (2014, p.26 Tomo II) como se muestra en las tablas 4.3, otros valores de las tasas de crecimiento poblacional, se muestran en las tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.3: Proyección de población de Lima Metropolitana (inicios de cada año). Fuente: SEDAPAL Plan Maestro 2014, p.6.

Año	2007	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Población	8'482,619	9'001,823	9'697,520	10'370,017	11'061,822	11'741,653	12'463,264	13'229,224
Tasa promedio anual		2.00 %	1.50 %	1.35 %	1.30 %	1.20 %	1.20 %	1.20 %

Tabla 4.4: Tasa de crecimiento promedio anual de Lima de la población censada 1940, 1961, 1972, 1981, 1993, 2007. Fuente: INEI 2014. Una mirada a Lima Metropolitana. S/E. Lima.

Periodo	1940-1961	1961-1972	1972-1981	1981-1993	1993-2007
Tasa Lima %	4.4	5.0	3.5	2.5	2.0

Tabla 4.5: Tasas de crecimiento geométrico medio anual según departamentos 1995-2015 Fuente: PROYECCIONES DEPARTAMENTALES DE LA POBLACION 1995 – 2015 (INE 1996)

Periodo	1995-2000	2000-2005	2005-2010	2010-2015
Tasa Perú (%)	1.7	1.6	1.5	1.3
Tasa Callao (%)	2.6	2.3	2.1	1.8
Tasa Lima (%)	1.9	1.7	1.5	1.3

De lo expuesto, se utilizarán los parámetros de la tabla 4.3 para la evaluación del crecimiento de la demanda de agua en Lima, es decir: Población de Lima del 2015: 9'752,000 tasa de crecimiento poblacional 2015: 1.5%; Proyección de tasa de crecimiento poblacional al 2040: 1.2% (proyección lineal).

Las tasas de crecimiento poblacional no contemplan variaciones producto de la migración a las ciudades, de difícil pronóstico por depender de factores de planificación nacional y del crecimiento económico diferenciado, entre el campo y las ciudades.

4.2.4 Crecimiento de la demanda

Según información de SUNASS, la demanda de agua per cápita en la ciudad de Lima, se ha reducido de 262 a alrededor de 150 l/hab/día en coincidencia con lo mostrado en la figura 4.2. Se debe aclarar que este consumo es medido a nivel vivienda, es decir, no contempla los otros gastos de agua potable en la ciudad como las pérdidas en red de suministro.

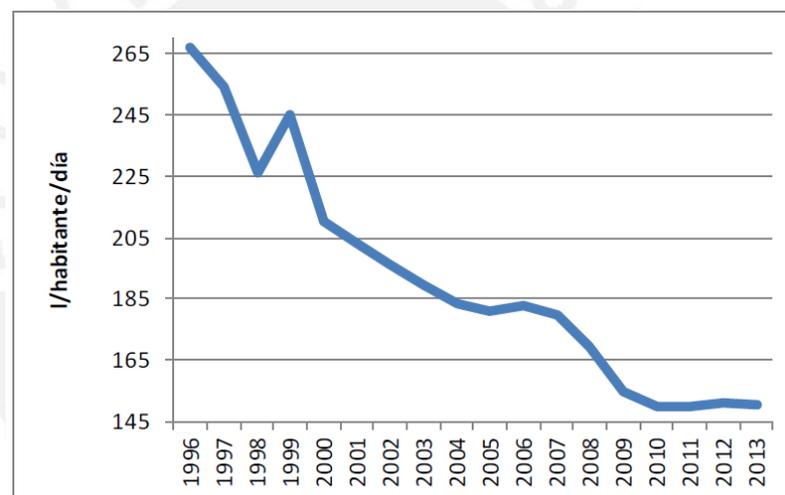


Figura 4.2: Perú: consumo de agua por habitante-Servicio de Agua Potable y alcantarillado de Lima S.A., 1996-2013 (en litros por habitante por día). Fuente: Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento, 2015, extraído de: Lentini E. (2015). El Futuro de los servicios sanitarios de America Latina, BID.

4.3 Balance de las fuentes de agua para Lima

La evaluación de la relación entre la oferta y demanda de agua para la ciudad de Lima mostrada en la tabla 4.6, corrobora la información del Plan maestro de SEDAPAL en el sentido que en la actualidad, el déficit hídrico es aproximadamente 3.3 m³/s para la ciudad de Lima en coincidencia con las proyecciones realizadas por el grupo LIWA en el 2010.

Tabla 4.6: Balance Hídrico durante periodo de estiaje (m³/s): Fuentes: SEDAPAL 2014, ANA 2010, SUNASS 2010, 2012 y 2015, LIWA 2014 (No considera inversiones en ampliación de nuevas fuentes de Agua).

CUENCAS DE LOS RIOS CHILLÓN, RÍMAC Y LURIN AL 2015						
Aguas Superficiales	2015	2020	2025	2030	2035	2040
Agua Superficial Río Chillón	-	-	-	-	-	-
Agua Superficial Río Lurín	-	-	-	-	-	-
Caudal Natural del río Rimac	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87	7.87
Tunel Grathon	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Caudal Natural del río Sta Eulalia	-	-	-	-	-	-
Marca I	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
Marca III	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40	3.40
Marca IV	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
Yuracmayo	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30	2.30
Total Caudal conducido Río Rímac m³/s	25.7	25.7	25.7	25.7	25.7	25.7
Caudal ecológico del río Rímac	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Usuarios Directos	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30
Pérdidas entre Chosica y La Atarjea	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
Pérdida Proceso en Atarjea y otros	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
Extracciones de agua m³/s	6.57	6.57	6.57	6.57	6.57	6.57
OFERTA HÍDRICA SUPERFICIAL DURANTE ESTIAJE M³/S	19.13	19.13	19.13	19.13	19.13	19.13
Aguas Subterráneas (Sólo SEDAPAL)						
Extracción y recarga Río Chillón	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Pozos SEDAPAL	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50
Extracción y recarga del Río Lurín	-	-	-	-	-	-
OFERTA HÍDRICA SUBTERRANEA DURANTE ESTIAJE M³/s	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
TOTAL OFERTA m³/s	23.63	23.63	23.63	23.63	23.63	23.63
DEMANDA PROMEDIO ANUAL m³/s	26.86	28.18	29.89	31.75	33.75	35.91
BALANCE m³/s	-3.23	-4.55	-6.26	-8.12	-10.12	-12.28

Según la tabla 4.6, el balance hídrico de las fuentes de agua para la ciudad muestran un déficit proyectado para el año actual 2015 de 3.30 m³/s y proyectan un incremento del déficit a valores superiores a 12 m³/s para el 2040, de continuar con los actuales patrones de eficiencia del servicio y en la cobertura. (SEDAPAL, 2014 p.26 Tomo II). La situación proyectada por SEDAPAL es más grave aún si se tiene presente que la base de sus cálculos, se basa sólo en la atención a la población que cuenta actualmente con servicio estimada entre el 8% y el 10%, población cuya incorporación en el balance incrementaría el déficit total a 5.80 m³/s, déficit que con la visión actual sólo podría ser cubierto con transvases del Mantaro. Esto en el supuesto que los pobladores beneficiarios de las aguas de la cuenca del Mantaro permitan la reducción de sus expectativas de disponibilidad hídrica.

4.4 Proyectos de inversión para ampliación de fuentes de agua.

SEDAPAL proyecta atender la futura demanda hídrica de la ciudad mediante la implementación de las siguientes obras, mostradas en la tabla 4.7.

Tabla 4.7: Proyectos de Inversión en Infraestructura para ampliación de fuentes de agua para Lima. Total previsto de incremento de más fuentes de agua: 15.46 m³/s Fuente: Adaptado de fuente: SEDAPAL 2014

OBRA	Caudal m ³ /s (reducido por pérdidas en conducción)	Fecha de entrada en operación
Obras de cabecera y conducción cuenca alta del río Rímac (inc. derivación Pomacocha - Río-Banco)	4.70	2020
Represa Casacancha y optimización Marca III.	1.70	2030
Ampliación túnel Gratón	1.41	2035
Embalse Autisha para san juan de Lurigancho.	1.20	2020
Embalse San Antonio río Chillón	1.20	2020
Embalse Jacaypampa río chillón	1.45	2020
Desalinización Lima Sur	0.25	2020
Ampliación Desalinización Lima Sur	0.15	2025
Desalinización Ventanilla	1.50	2040
Explotación acuífero río Chancay	1.50	2040
Extracción y recarga río Lurín	0.40	2040

Este conjunto de obras permitiría suplir el déficit proyectado para el 2040 de 12.28 m³/s, sin embargo no se menciona cual fue el proceso de selección de alternativas para el suministro de agua de Lima, es decir si se evaluaron otras opciones diferentes a las mostradas y cuáles fueron los criterios de selección.

4.5 Sostenibilidad hídrica de la ciudad de Lima

El desarrollo hídrico sostenible de una ciudad debe evaluarse contemplando aspectos económicos, sociales y ambientales a efectos de lograr soluciones de ingeniería idóneas. El conjunto de obras previstas por SEDAPAL para Lima, resuelven en apariencia los requerimientos hídricos a futuro de la ciudad hasta el año 2040, sin embargo, no contemplan soluciones a más largo plazo, ni realizan un análisis del impacto que dichas soluciones traerían como consecuencia de su coste económico para el desarrollo del país ni del impacto previsto para el futuro desarrollo de la cuenca vecina del río Mantaro.

Las obras de regulación y transvase desde la cuenca alta del Mantaro, proyectadas al 2040, referidas en la tabla 4.7, aportarían un caudal de 9 m³/s que sumados a los caudales actuales, configuran un caudal regulado del orden de los 25 m³/s. La contribución del caudal nativo local del río Rímac será poco

significativa comparado con los aportes de trasvases y regulaciones. (SEDAPAL 2012).

El río Rímac está camino a ser un río regular por lo que debemos considerar que las obras de abastecimiento hídrico para el 2040 deberán contemplar la cobertura de futuros déficits anuales y no solo durante los siete meses de estiaje, como es actualmente.

Hoy en día, la producción en planta de SEDAPAL debería contemplar un promedio 260 l/día por cada uno de los 9'752,000 limeños, es decir se debería potabilizar 2.54 MMC diarios para atender los requerimientos de agua de la ciudad (si todos los limeños contasen con el servicio de agua potable). Este valor sería un suministro ideal de 29.35 l/s. Cerca de 800,000 limeños reciben menos de 30 litros diarios cada uno, por las limitaciones de la red de distribución de agua potable.

Hoy en día, una ampliación en la oferta de 1 m³/s trasvasado de la cuenca del Mantaro al río Rímac y almacenado para su disposición durante los 7 meses de estiaje, atendería un crecimiento total de la demanda de 3.41%, que se alcanzaría en 27 meses al crecimiento poblacional actual de 1.5%.

El mismo incremento de 1 m³/s en la oferta para el año 2040, cuando se estima que Lima contará con 13'229,224 habitantes, permitirá atender un crecimiento de la demanda de 2.51%, es decir que se alcanzaría en sólo 14 meses (en lugar de 27 meses como sería hoy), como consecuencia de la regularización futura del río Rímac.

En conclusión, sólo considerando la vida útil de las inversiones en ampliación de fuentes de agua para la ciudad de Lima, los costos a valor actual a partir del 2040 serán 92% mayores que en la actualidad para resolver los requerimientos futuros a pesar de la desaceleración del ritmo de crecimiento poblacional.

4.5.1 Inversión Proyectada

Los costos proyectados de ampliación de fuentes de agua para atender la demanda hídrica adicional de la ciudad, de 15.31 m³/s se detallan en la tabla 4.8, en ella se puede apreciar que total de la inversión proyectada es de 3,331'905,795 soles (US\$ 1,031'549,781), si consideramos que la inversión se realizaría en un periodo de 27 años (a razón promedio de US\$ 200 millones por año, que equivale a un promedio de US\$ 20.0 por Limeño por año) da la apariencia de ser un valor económico afrontable, pero esta cifra se quintuplica si consideramos que en el mismo periodo SEDAPAL proyecta invertir un adicional de 12,438'123,840 soles (US\$ 3,850'812,335) para obras de rehabilitación y ampliación de los sistemas de conducción, ampliación de las capacidades de tratamiento de mayores volúmenes de agua potable y de aguas residuales entre otros. El costo estimado será de aproximadamente US\$

100.00 por limeño por año para mantener la ciudad abastecida de agua hasta el 2040. (SEDAPAL 2014).

Tabla 4.8: Costos proyectados de inversión en infraestructura para nuevas fuentes de agua para Lima (Incluye la inversión directa por SEDAPAL y la proyectada a través de proyectos de Inversión público privado). Fuente SEDAPAL 2014, pg. 90-95 Tomo III.

OBRA	Caudal m ³ /s (reducido por pérdidas de conducción)	Inversión en Millones de soles al 2042
Obras de cabecera y conducción cuenca alta del río Rímac. (inc., derivación Pomacocha)	4.70	963´499,998
Represa Casacancha y optimización Marca III	1.70	132´108,319
Ampliación túnel Gratón	1.41	308´795,080
Embalse Autisha para San Juan de Lurigancho	1.20	262´641,395
Embalse San Antonio río Chillón	1.20	509´600,016
Embalse Jacaypampa río Chillón	1.45	96´128,289
Desalinización lima Sur	0.25	300´000,000
Ampliación Desalinización lima Sur	0.15	Sin información
Desalinización Ventanilla	1.50	579´600,000
Explotación Acuífero río Chancay	1.50	179´532,698
Extracción y recarga río Lurín	0.40	Sin información

La tabla 4.8 también permite apreciar que el costo promedio de ampliación de 1 m³/s de nuevas fuentes de agua para los próximos 25 años será de 67.3 millones de dólares, valor que no incluye ampliaciones de la red de abastecimiento de agua potable y de alcantarillado, ni los costos de implementación de nuevas plantas potabilizadoras de agua.

4.5.2 Sostenibilidad del 2040 en adelante

Es previsible que los costos de ampliación futura de nuevas fuentes de agua, en caso de ser posibles, sería notoriamente superior al asumido entre los años 2015 y 2040 tanto a nivel de inversión en infraestructura como en el costo operativo, producto de una mayor distancia y desniveles desfavorables de nuevas fuentes de agua que eventualmente requerirán estaciones de bombeo.

En un escenario conservador, donde el costo de inversión proyectado para el 2040, en ampliar la dotación de Lima en 1 m³/s con nuevas fuentes de agua fuese el doble del costo actual, sería previsible que el costo final se incrementara producto de la menor vida útil de las inversiones futuras como se explicó al inicio de este capítulo y como se muestra en la tabla 4.9:

Tabla 4.9: Proyección de incremento de costo de dotar a Lima de 1 m³/s por cada mes de cobertura. Fuente: Elaboración propia.

Costo de incremento de 1 m³/s en la ampliación de la oferta para la ciudad de Lima		
Año	2015	2040
Tiempo de vida	27 meses	14 meses
Inversión media anual	US\$ 200 millones	US\$ 400 millones
Costo de nuevas fuentes de agua por mes para la ciudad	US\$ 7.41 millones/mes	US\$ 28.57 millones/mes

La tabla 4.9 muestra que el modelo actual de solución para los requerimientos hídricos de la ciudad de Lima no es sostenible dado que es previsible que los costos se cuadrupliquen. Acercarse al ideal sostenible, exigirá a la ciudad de Lima:

- a) Mayor eficiencia de las redes de suministro de agua potable (aumentar el porcentaje de agua facturada).
- b) Reúso de aguas residuales (anualmente se vierten al mar más de 20 m³/s).
- c) Reducción de la demanda hídrica per cápita.

4.5.3 Recarga del Acuífero de Lima como Solución Sostenible

La actual situación de escasez hídrica de la ciudad de Lima y la grave situación pronosticada para el 2040 exigen que los recursos hídricos de la ciudad sean gestionados de forma integrada, es decir considerar las aguas residuales actualmente vertidas al mar como un recurso a ser reusado al máximo posible. Entre las prácticas de reúso, se incluyen la recarga de acuíferos, como es práctica usual en algunas ciudades del mundo que enfrentan la misma disyuntiva, con la finalidad de reducir la demanda hídrica y ganar años de vida sostenibles.

4.6 Delimitación de Sector para la Evaluación de situación Hídrica de la ciudad de Lima

El objetivo de la investigación planteada, requiere de la selección de un sector de la ciudad de Lima como volumen control para la determinación de los parámetros principales requeridos para la evaluación de la sostenibilidad del recurso hídrico de la ciudad de Lima.

4.6.1 Delimitación de Sector

El principal criterio para la selección del área de la ciudad que se utilizará para evaluar la situación hídrica es el de la viabilidad en la obtención de valores fidedignos. Este objetivo sólo será posible si los valores del vertimiento de aguas residuales en el sector seleccionado son cuantificables, por lo que resultará conveniente, la selección del área territorial comprendida por las áreas de los distritos tributarios del colector de aguas servidas denominado “Colector Surco”, colector que realiza el vertimiento al Océano Pacífico de forma independiente de otros sectores de la ciudad.

El colector Surco que incluye las aguas residuales de parte de las áreas de los distritos de Ate, Santa Anita, Cineguilla, San Borja, San Luis, La Molina, La Victoria, Pachacamac, Surquillo, Surco, Barranco, parte de San Juan de Miraflores y Villa El Salvador y Chorrillos para verterlas de forma conjunta en la playa La Chira del litoral pacífico de la ciudad de Lima. Se evaluará el sector definido como un eco-sistema artificial cuyos efluentes líquidos son parte del metabolismo urbano cuyo colector central de redes de alcantarillado es común.

Tabla 4.10: Distribución de áreas y población de sector bajo análisis en comparación con los totales distritales. Fuentes: INEI (2015), SEDAPAL (2014), SERPAR (2009)

Distrito	Área Total Distrito (has)	Área Tributaria Colector Surco (has.)	Población INEI 2015	Población distrital Sector al 2015	Total área verde pública Distrital (m2)	Área verde en el Sector (m2)
Ate	7,772.0	2,856.4	630,085	364,764	1,233,500	714,088.3
Barranco	333.0	333.0	29,984	29,984	99,900	99,900.0
Chorrillos	3,894.0	850.5	325,547	79,358	1,395,600	340,202.6
Cineguilla	22,744.0	133.5	47,080	1,237	89,139	2,342.4
La Molina	4,884.0	2,732.0	171,646	156,156	1,742,195	1,584,973.6
La Victoria	874.0	874.0	171,779	171,779	368,031	368,031.0
Miraflores	962.0	334.6	81,932	28,498	336,700	117,113.5
Pachacamac	17,473.0	84.8	129,653	1,256	153,572	1,487.8
San Borja	996.0	996.0	111,928	111,928	497,580	497,580.0
San Isidro	1,110.0	181.2	54,206	8,848	386,429	63,077.4
San Juan de Miraflores	2,398.0	2,304.0	404,001	404,001	1,725,202	1,725,202.0
San Luis	349.0	349.0	57,600	57,600	128,428	128,428.0
Santa Anita	1,069.0	1,069.0	228,422	228,422	452,133	452,133.0
Santiago de Surco	3,475.0	3,120.0	344,242	344,242	1,206,332	1,206,332.0
Surquillo	346.0	279.6	91,346	73,819	205,510	166,077.0
Villa El Salvador	3,546.0	1,858.0	463,014	300,797	858,000	557,400.0
Villa María del Triunfo	7,057.0	2,415.0	448,545	448,545	724,500	724,500.0
TOTAL	79,282	20,771	3,791,010	2,811,234	11,602,750	8,748,869

Los valores de los parámetros mostrados para el Sector en análisis en la tabla 4.10, han sido obtenidos por interpolación lineal.

En la figura 4.3 se muestra la ubicación del sector en análisis con relación a la ciudad de Lima Metropolitana

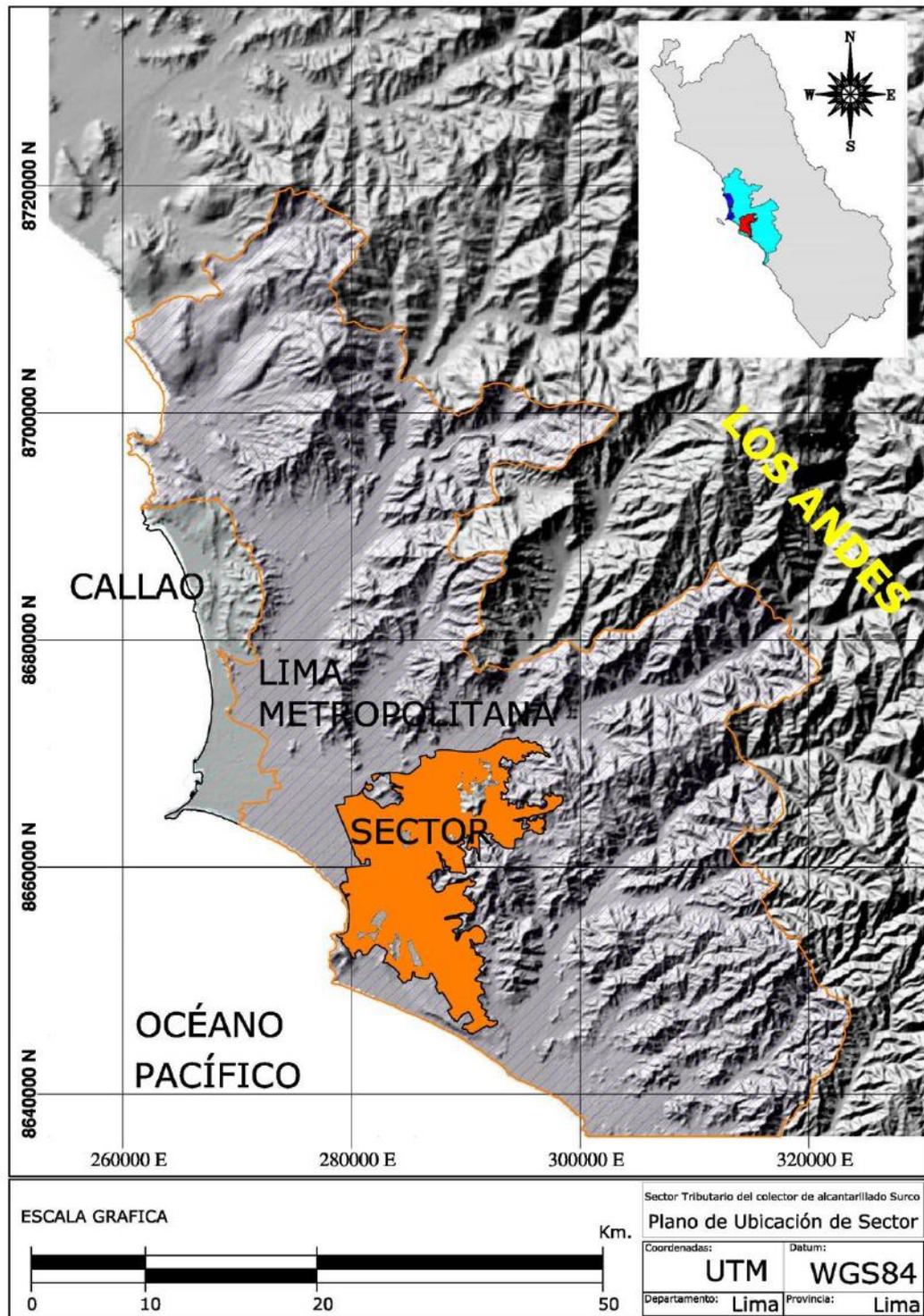


Figura 4.3: Ubicación de sector de análisis para evaluación de la viabilidad de las soluciones de reúso de aguas residuales. Fuentes: composición: GEOCADMIN (2015), SEDAPAL (2014).

El sector seleccionado comprende parcialmente algunos distritos de Lima como se muestra en la figura 4.4:

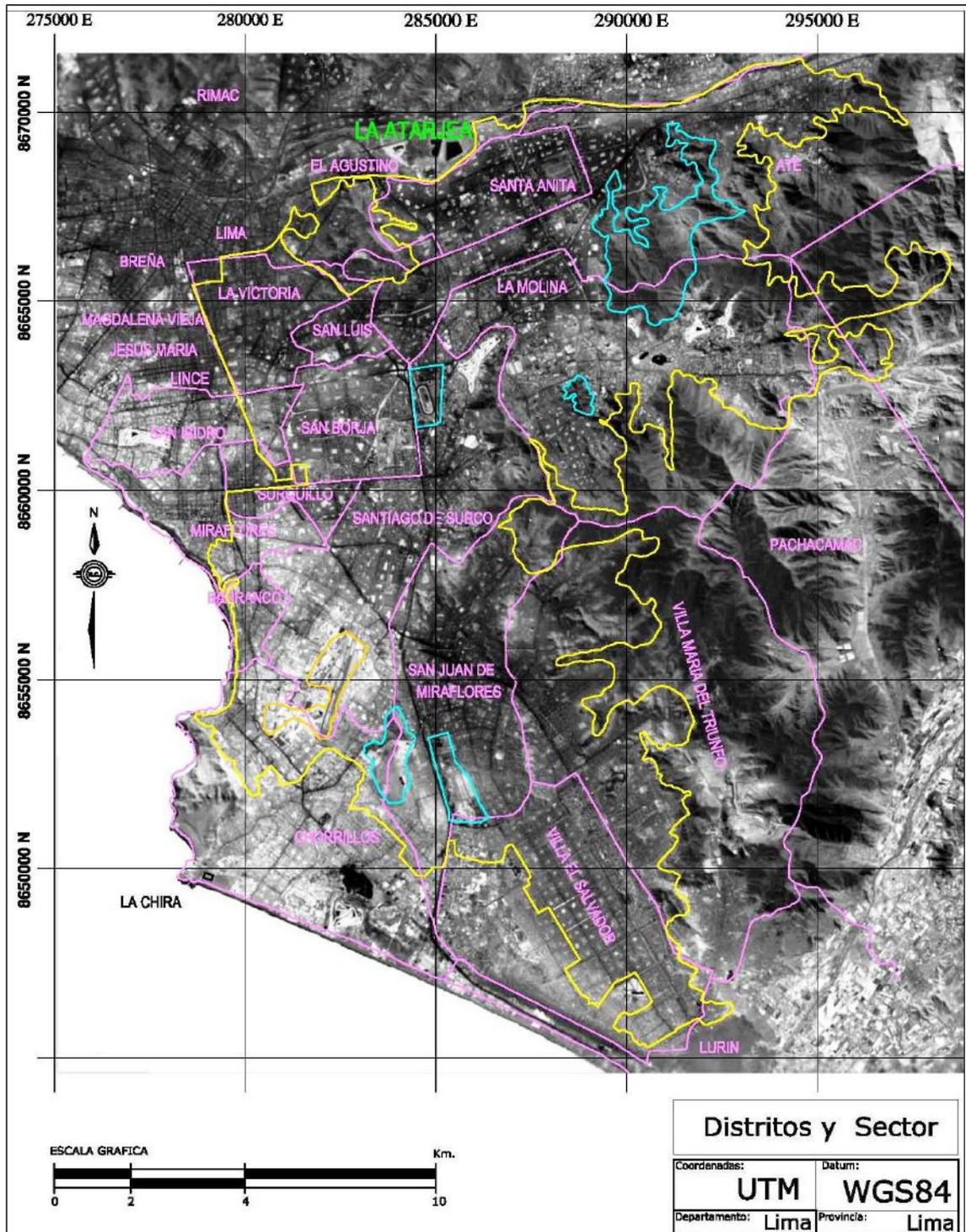


Figura 4.4: Ubicación distrital del Sector. Fuente: Adaptación de Geocadmin (2015)

El sector delimitado comprende de forma integral los sectores tributarios del colector surco y que corresponden a: Colector Circunvalación, colector Villa

María, colector San Juan y colector Villa El Salvador como se muestra en la figura 4.5.

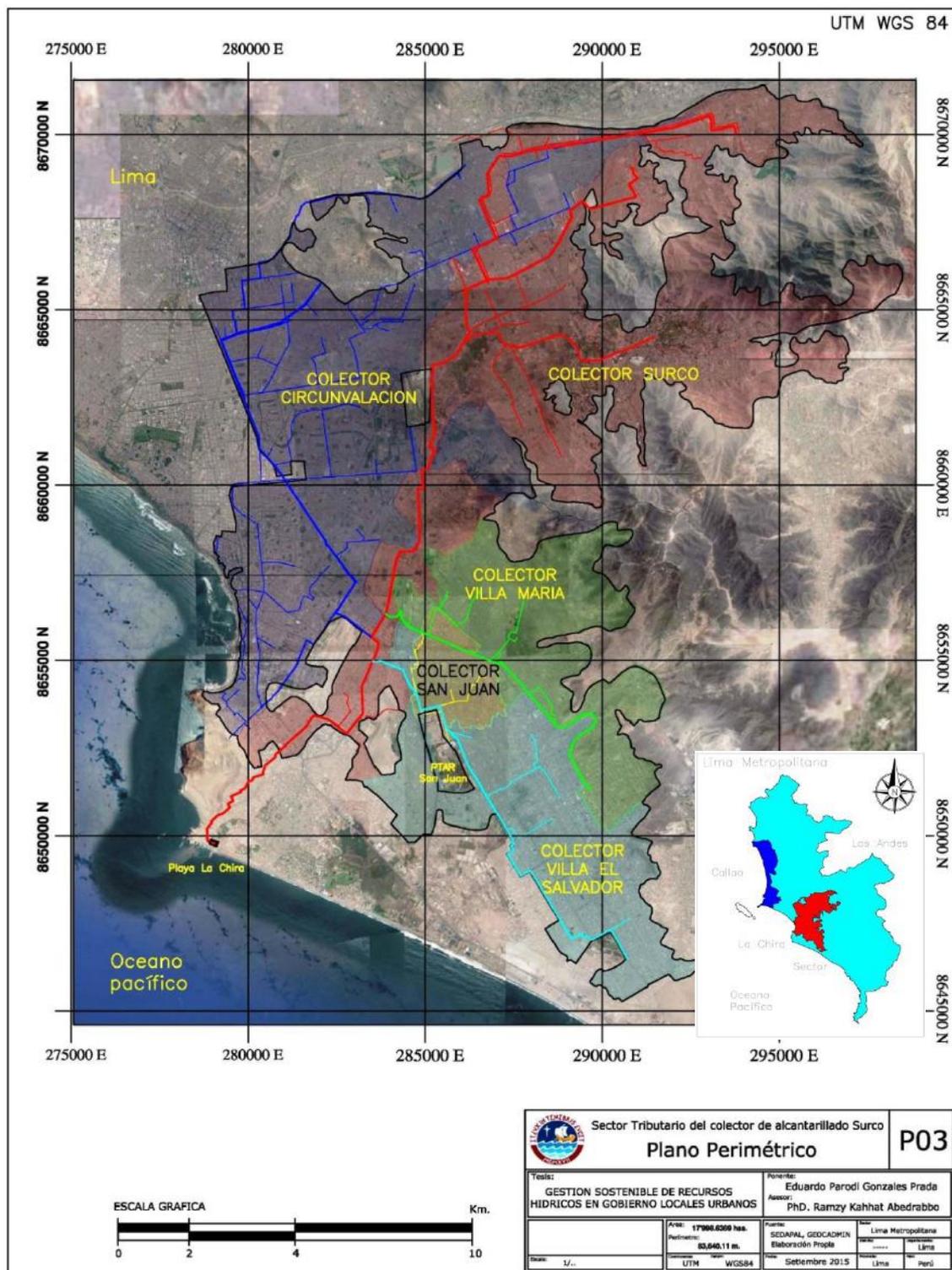


Figura 4.5: Red de alcantarillado primario en los sectores tributarios de la red de alcantarillado del colector Surco. Fuentes: Adaptación de Plan Maestro Sedapal 2014 y Google Earth 2015.

4.6.2 Demanda de Agua Potable

De la tabla 4.11, se desprende que la demanda de agua potable en la planta de producción de SEDAPAL para el área control es de 7.38 m³/s, que equivale a 226.73 litros diarios per cápita (l/d/pc) Este valor incluye las pérdidas de aprox. 30% que SEDAPAL reporta entre la planta de producción de la Atarjea y los usuarios, mayormente debidas a fugas y a falta cobranzas adecuadas de usuarios sin micromedición.

Tabla 4.11: Resumen de requerimiento de agua diarios en los distritos de Lima dentro del sector en estudio. Fuentes: Plan Maestro de Sedapal 2014, SUNASS 2015

DISTRITO	Demanda Agua Potable Total Distrito (m3)	% de Area Tributaria Sector/ area urbanizable	Demanda Anual Agua Potable Sector Distrito (miles m3)	Población distrital Sector al 2015	Consumo Agua potable litros/persona x día	Demanda Producción de Agua Potable litros/persona x día	Demanda Producción de Agua Potable Total (miles de m3)
Ate	24,378,150	57.9%	14,112.81	364,764	106.00	151.43	20,161.16
Barranco	3,190,450	100.0%	3,190.45	29,984	291.52	416.46	4,557.79
Chorrillos	16,842,140	24.4%	4,105.57	79,358	141.74	202.48	5,865.11
Cineguilla	704,915	2.6%	18.52	1,237	41.02	58.60	26.46
La Molina	17,011,248	91.0%	15,476.10	156,156	271.52	387.89	22,108.71
La Victoria	13,146,760	100.0%	13,146.76	171,779	209.68	299.54	18,781.09
Miraflores	15,725,288	34.8%	5,469.69	28,498	525.84	751.20	7,813.84
Pachacamac	2,016,522	1.0%	19.54	1,256	42.61	60.87	27.91
San Borja	12,051,096	100.0%	12,051.10	111,928	294.98	421.40	17,215.85
San isidro	12,211,039	16.3%	1,993.23	8,848	617.18	881.69	2,847.46
San Juan de Miraflores	17,456,228	100.0%	17,456.23	404,001	118.38	169.11	24,937.47
San Luis	4,456,284	100.0%	4,456.28	57,600	211.96	302.80	6,366.12
Santa Anita	9,227,145	100.0%	9,227.15	228,422	110.67	158.10	13,181.64
Santiago de Surco	31,465,731	100.0%	31,465.73	344,242	250.43	357.75	44,951.04
Surquillo	7,642,031	80.8%	6,175.69	73,819	229.21	327.44	8,822.41
Villa El Salvador	14,755,889	65.0%	9,586.17	300,797	87.31	124.73	13,694.53
Villa Maria del Triunfo	14,906,003	100.0%	14,906.00	448,545	91.05	130.07	21,294.29
TOTAL	217,186,919		162,857	2,811,234	158.71	226.73	232,653

El valor de 226.73 l/d per cápita aparenta ser un valor elevado, en especial si se compara con los consumos diarios para habitantes de ciudades como Madrid y París, que bordean los 150 l/d per cápita, (se incluye en el conteo al millón de personas diarias que ingresan a París a diariamente por trabajo o Turismo), ciudades en las que el costo del m³ del agua potable supera los US\$ 2.0 x m³, varias veces el promedio pagado por los limeños.

La demanda real en este sector de Lima es mayor si tenemos presente que el valor calculado de consumo diario per cápita es referido al total de la población del Sector (incluidos aquellos sin conexión) por lo que el consumo diario para habitantes con cobertura del servicio es de 246.53 l/d per cápita (considerando una cobertura de 92% reportado por SEDAPAL en el 2014), valor que se acerca a lo calculado por el Proyecto LIWA, Q=261 l/d pc. (Seifert R, 2009).

Los valores de requerimiento de agua potable para la ciudad de Lima, de donde se desprenden los consumos diario, se obtuvieron de el Plan Maestro 2014 elaborado por SEDAPAL.

Los datos mostrados en la tabla 4.11, han sido calculados sobre la base del área urbanizable de cada distrito que se muestra en la tabla 4.12 (columna de Área Tributaria Colector Surco), de la población mostrada en la tabla 4.13 (columna de Población Distrital Sector al 2015) y de las áreas verdes que se muestran en la tabla 4.14 (columna de Áreas Verdes Sector).

Tabla 4.12: Áreas en el distrito. Fuentes: Atlas de Lima, Sedapal 2014. Fuente: elaboración propia en función de información contenida en el Plan Maestro de SEDAPAL 2014.

DISTRITO	Área Total Distrito (has)	Área no habitable (has)	Área Urbanizada a la fecha (has)	Área de Expansión urbana (has)	Total Área urbanizable (has)	Area Tributaria Colector Surco (has.)	% de Area Tributaria/ area urbanizable
Ate	7,772.0	2,838.0	3,804.0	1,130.0	4,934.0	2,856.4	57.9%
Barranco	333.0		333.0		333.0	333.0	100.0%
Chorrillos	3,894.0	405.0	3,489.0		3,489.0	850.5	24.4%
Cineguilla	22,744.0	17,664.0	900.0	4,180.0	5,080.0	133.5	2.6%
La Molina	4,884.0	1,881.0	2,732.0	271.0	3,003.0	2,732.0	91.0%
La Victoria	874.0	-	874.0	-	874.0	874.0	100.0%
Miraflores	962.0		962.0		962.0	334.6	34.8%
Pachacamac	17,473.0	8,721.0	1,006.0	7,746.0	8,752.0	84.8	1.0%
San Borja	996.0		996.0		996.0	996.0	100.0%
San Isidro	1,110.0		1,110.0		1,110.0	181.2	16.3%
Miraflores	2,398.0	94.0	2,304.0		2,304.0	2,304.0	100.0%
San Luis	349.0		349.0		349.0	349.0	100.0%
Santa Anita	1,069.0		1,069.0		1,069.0	1,069.0	100.0%
Santiago de Surco	3,475.0	355.0	3,120.0		3,120.0	3,120.0	100.0%
Surquillo	346.0		346.0		346.0	279.6	80.8%
Villa El Salvador	3,546.0	686.0	2,860.0		2,860.0	1,858.0	65.0%
del Triunfo	7,057.0	4,642.0	2,208.0	207.0	2,415.0	2,415.0	100.0%
TOTAL	79,282.0	37,286.0	28,462.0	13,534.0	41,996.0	20,770.5	

La tabla 4.12 muestra los porcentajes de área urbanizable de cada distrito que corresponden al área del sector en análisis y que permitirán estimar el nivel de población distrital dentro del sector que vierten sus aguas residuales de forma conjunta al colector Surco que desagua en la playa La Chira en el litoral Pacífico de la ciudad de Lima.

Asimismo, la tabla 4.13 muestra la población estimada del sector, la misma que ha sido calculada sumando la población de cada distrito dentro del sector que a su vez se calcula de forma proporcional al área de cada distrito dentro del sector en análisis y a la población total distrital. De forma similar se procedió para el cálculo de las áreas verdes en el sector, como se muestra en la tabla 4.13.

Tabla 4.13: Población en el Distrito y en el Sector. Fuente: elaboración propia en función de información contenida en el Plan Maestro de SEDAPAL (2014) e INEI (2015)

DISTRITO	Población INEI 2015	Tasa de crecimiento poblacional 2005-2015	Habitantes /vivienda	% de Area Tributaria/ area urbanizable	Población distrital Sector al 2015
Ate	630,085	2.693%	4.02	57.89%	364,764
Barranco	29,984	-1.696%	3.16	100.00%	29,984
Chorrillos	325,547	0.991%	4.34	24.38%	79,358
Cineguilla	47,080	5.923%	4.79	2.63%	1,237
La Molina	171,646	2.455%	3.47	90.98%	156,156
La Victoria	171,779	-1.611%	3.64	100.00%	171,779
Miraflores	81,932	-0.784%	2.05	34.78%	28,498
Pachacamac	129,653	6.767%	3.45	0.97%	1,256
San Borja	111,928	0.099%	3.18	100.00%	111,928
San isidro	54,206	-1.118%	2.37	16.32%	8,848
San Juan de Miraflores	404,001	0.794%	5.02	100.00%	404,001
San Luis	57,600	0.145%	3.86	100.00%	57,600
Santa Anita	228,422	1.945%	4.45	100.00%	228,422
Santiago de Surco	344,242	1.504%	3.28	100.00%	344,242
Surquillo	91,346	-0.280%	3.41	80.81%	73,819
Villa El Salvador	463,014	1.726%	4.73	64.97%	300,797
Villa María del Triunfo	448,545	1.472%	4.27	100.00%	448,545
TOTAL	3,791,010	1.562%			2,811,234

4.6.3 Áreas verdes públicas en los distritos del sector.

Tabla 4.14: Áreas verdes distritales (cuadrículas en rojo, estimados) Fuente: elaboración propia en función de información contenida en el Plan Maestro de SERPAR (2010).

DISTRITO	Área Total Distrito (has)	Total Área urbanizable (has)	Total area verde pública Distrital (m2)	% de Areas Verdes/área urbanizable	% de Area Tributaria Sector/ area urbanizable	Area verde en el Sector (m2)
Ate	7,772.0	4,934.0	1,233,500	2.50%	57.9%	714,088.3
Barranco	333.0	333.0	99,900	3.00%	100.0%	99,900.0
Chorrillos	3,894.0	3,489.0	1,395,600	4.00%	24.4%	340,202.6
Cineguilla	22,744.0	5,080.0	89,139	0.18%	2.6%	2,342.4
La Molina	4,884.0	3,003.0	1,742,195	5.80%	91.0%	1,584,973.6
La Victoria	874.0	874.0	368,031	4.21%	100.0%	368,031.0
Miraflores	962.0	962.0	336,700	3.50%	34.8%	117,113.5
Pachacamac	17,473.0	8,752.0	153,572	0.18%	1.0%	1,487.8
San Borja	996.0	996.0	497,580	5.00%	100.0%	497,580.0
San isidro	1,110.0	1,110.0	386,429	3.48%	16.3%	63,077.4
San Juan de Miraflores	2,398.0	2,304.0	1,725,202	7.49%	100.0%	1,725,202.0
San Luis	349.0	349.0	128,428	3.68%	100.0%	128,428.0
Santa Anita	1,069.0	1,069.0	452,133	4.23%	100.0%	452,133.0
Santiago de Surco	3,475.0	3,120.0	1,206,332	3.87%	100.0%	1,206,332.0
Surquillo	346.0	346.0	205,510	5.94%	80.8%	166,077.0
Villa El Salvador	3,546.0	2,860.0	858,000	3.00%	65.0%	557,400.0
Villa María del Triunfo	7,057.0	2,415.0	724,500	3.00%	100.0%	724,500.0
TOTAL	79,282.0	41,996.0	11,602,750			8,748,869

4.6.4 Resumen de las principales características de sector bajo análisis.

Se muestra en la tabla 4.15 las características más relevantes del sector control en comparación porcentual con la ciudad de Lima Metropolitana y el Callao.

Tabla 4.15: Principales características de sector bajo análisis en comparación con Lima Metropolitana.

Parámetro	Unidad	SECTOR	%	LIMA METROPOLITANA
Área urbana (has)	has	20,770.55	26.0%	79,860.00
Población Total		2,811,234.41	28.8%	9,752,000.00
Tasa de crecimiento poblacional al 2015		1.56%		1.60%
Requerimiento Anual de Agua Potable a nivel Pto de Entrega	Total Miles de m3	162,857.01	27.5%	593,006.10
Requerimiento Agua Potable	m3/s	5.16	27.5%	18.804
Requerimiento Producción de Agua Potable	m3/s	7.38	27.5%	26.863
Demanda de Alcantarillado (al 85% de la demanda de Agua Potable)	m3/s	6.27	31%	20.555
Caudal Tratado en PTAR San Juan de Miraflores	m3/s	0.40		
Caudal Tratado en PTAR Villa Maria del Triunfo	m3/s	0.10		
Superhabit de Aguas Residuales	m3/s	5.77	29.4%	19.63
Caudal aguas Residuales evacuado en la Chira	m3/s	4.66		
Areas Verdes	has	874.89	29.9%	2,925.60
Requerimiento anual riego de áreas verdes (bajo sistema convencional)	Total Miles de m3	8,748.87	29.9%	29,256.00
Caudal promedio anual requerido para riego de áreas verdes	m3/s	0.28	29.9%	0.93

De los valores mostrados en la tabla 4.15, se puede apreciar que el sector elegido como volumen de control para la presente investigación, es un sector representativo de la situación hídrica de Lima Metropolitana y Callao con un factor aproximado de 28% para todos sus parámetros.

4.7 Ubicación de sistemas de recarga de acuíferos

La ubicación del sistema de recarga del acuífero de Lima en el sector de análisis, dependerá de las restricciones de distancias mínimas entre las zonas de extracción y de recarga para garantizar el tiempo de residencia hidráulico. El dimensionamiento de sistemas de recarga de acuíferos requiere de algunos parámetros indispensables para la evaluación del comportamiento del agua en el subsuelo como son: la permeabilidad, el gradiente hidráulico, la capacidad de infiltración, el coeficiente de almacenamiento entre otros (Ordoñez J, 2011).

4.7.1 Parámetros de Diseño Preliminar

Permeabilidad (k): Según diversos autores consultados, el coeficiente de permeabilidad tienen una amplia variación en los suelos que conforman el acuífero de Lima. Algunos valores típicos son mostrados en el estudio Hidrogeológico del Fundo Oquendo, los cuales reportaron valores promedios de 3.9×10^{-4} m/s

Otros valores de la permeabilidad son mostrados en el estudio de Martinez A, en el 2007 sobre el conglomerado de los suelos de Lima que calcula valores entre 10^{-5} a 10^{-3} m/s (equivalente a un rango entre 0.864 m/día a 86.4 m/día), rango que coincide con los valores utilizados en los modelamientos del acuífero de Lima realizados por Nippon Koei (2002) y que son los que utilizaremos para el dimensionamiento preliminar.

Gradiente hidráulico (i): Las lecturas de los gradientes hidráulicos del plano de morfología del acuífero de Lima mostrado por Tovar (Anexos, Figura 8.1) muestran valores comprendidos entre 0.010 y 0.040 m/m, estos gradientes corresponden al periodo de sobreexplotación del acuífero de Lima. Estos valores se consideran conservadores para cualquier dimensionamiento previo, es decir darán mayores velocidades de flujo del agua en el subsuelo y por ende obligarán a alejar más las zonas de extracción de las de inyección para lograr los tiempos de retención hidráulica que se exijan. Otros autores sugieren valores de (0.015 a 0.035 m/m) como los propuestos en los estudios hidrogeológicos del ex fundo Oquendo (Consortio Blasa 2002).

Tiempo de retención hidráulica: Tomaremos como referencia la norma mexicana (NOM-014-CONAGUA-2003), por carecer el Perú de normas que regulen la recarga de acuíferos con aguas residuales tratadas. En ellas se establece que en el caso de Inyección directa al acuífero, los puntos de inyección se deben situar a no menos de 1 km. de distancia de los puntos de extracción y en el caso que el punto de inyección se deberán distanciar entre 600 y 1000 mts. de las zonas de extracción, se deberá realizar un proyecto piloto previamente. Nunca se deberá situar pozos de inyección a menos de 600 metros de zonas de extracción.

Para el caso de infiltración desde la superficie o subsuperficie, la norma mexicana es más flexible, ya que toma en cuenta la capacidad biodegradadora de la zona vadosa y permite bajo ciertos condicionantes la infiltración desde la superficie hasta 150 mts de la zona de extracción. En cualquier caso, se deberá respetar siempre los tiempos mínimos de residencia hidráulica en cada sector para garantizar que la acción de biodegradación y purificación del agua residual durante su tránsito por la zona vadosa de forma tal de obtener las características mínimas de la calidad de agua a ser usada para recarga, según se muestran en las tablas 4.16 y 4.17

Tabla 4.16: Parámetros para recarga de Acuíferos según norma mexicana. Fuente: NOM-014-CONAGUA-2003

VARIABLE	TIPOS DE RECARGA	
	Superficial/Subsuperficial	Directo
Distancia horizontal mínima entre el límite exterior del sistema de recarga de acuífero y las captaciones para uso público-urbano o doméstico	150m	600m
Tiempo de residencia del agua de recarga antes de su extracción	6 meses	12 meses

Tabla 4.17: Calidad del Agua de Recarga. Fuente: NOM-014-CONAGUA-2003

TIPOS DE CONTAMINANTE	Tipos de Sistemas de Recarga	
	Superficial/Subsuperficial	Directo
Microorganismos Patógenos	Remoción o inactivación de microorganismos entero patógenos	Remoción o inactivación total de microorganismos entero patógenos
Contaminantes Regulados por Norma	Límites Permisibles según norma mexicana: NOM-127-SSAT-1994	
Contaminantes no Regulados por Norma	DBO5: 30 mg/l, COT = 16 mg/l	COT ≤ 1 mg/l

4.7.2 Distancia para ubicación de zonas de inyección o infiltración en el acuífero de Lima:

Los rangos de distancias entre las zonas de extracción y los pozos de inyección de aguas tratadas dependerán finalmente del tiempo de residencia hidráulica, requerido para el abatimiento de la carga contaminante. Son estos tiempos y la textura de los suelos, su porosidad y capacidad de conducción hidráulica los que determinan las distancias seguras entre recarga e inyección, mediante la aplicación de la Ley de Darcy que establece lo siguiente:

$$\text{Velocidad (V)} = \text{Coeficiente de Permeabilidad (K)} \times \text{Gradiente Hidráulico (i)}$$

Para los parámetros seleccionados: $K = (10^{-5} \text{ a } 10^{-3}) \text{ m/s}$ e $i = (0.01 \text{ a } 0.04)$, se obtiene: $V = (0.01 \times 10^{-5} \text{ m/s a } 0.04 \times 10^{-3} \text{ m/s})$, por lo que la distancia recorrida en 6 meses estará en el rango de 1.56 mts para suelos arcillosos muy poco permeables y a 624 m para suelos franco arenosos muy permeables, y distancia recorrida en 12 meses será entre 3.12 mts a 1,248 mts.

Considerando los tiempos mínimos de residencia hidráulica exigidos por el reglamento mexicano, se puede indicar las distancias entre los puntos para recargar el acuífero de Lima y las zonas de extracción, como se muestran en la tabla 4.18 en función a lo calculado en el capítulo 4.7.2.

Tabla 4.18: Distancia mínima para ubicación de puntos de recarga de acuífero de Lima con aguas residuales tratadas.

Parámetros Referenciales para la recarga del Acuífero de Lima	Inyección Directa a Acuífero Distancia	Infiltración desde Subsuelo. Distancia
Distancia Mínima permitido (con proyecto Piloto)	600 m	150 m
Máximo exigido para proyecto Piloto (<i>distancias superiores no requieren proyecto piloto</i>)	1,248 m	624 m

4.7.3 Capacidad de Infiltración

Para el caso de infiltración desde la superficie, la tabla 4.19 muestra los parámetros típicos de la velocidad de infiltración según la textura del suelo, valores que permiten evaluar el tiempo requeridos para infiltrar aguas desde la superficie según el tipo de suelo.

Tabla 4.19: Capacidad de Infiltración en diversos tipos de suelo. Fuente: Interpretación de Análisis de Suelos y recomendaciones; J. Guerrero; 1998.

Clase Textural	Velocidad de infiltración en cm/h	Calificación
Arenoso	5.00	Muy rápida
Franco Arenoso	2.50	Rápida
Franco	1.30	Moderada
Franco Arcilloso	0.80	Lenta
Arcilloso	0.05	Muy Lenta

El tránsito a través del suelo del agua infiltrada estará gobernado por la conductividad hidráulica del mismo, por lo que resulta evidente que será viable infiltrar también desde la superficie en todos los sectores donde se utilicen métodos de recarga directa del acuífero suficientemente alejados de los pozos de extracción, como indica la norma mexicana, tal como indican numerosos estudios, la infiltración directa de aguas residuales (aún sin tratar) puede ser un método eficiente de disposición final si está adecuadamente diseñado (Nieto P. et al 1994).

4.7.4 Ubicación de PTARS y pozos de inyección

Se aplicó la metodología señalada en el capítulo 2.2.5 y se superpuso la información correspondiente a la ubicación de los pozos de extracción de SEDAPAL a las zonas de exclusión de recarga del acuífero para los valores que mostrados en la tabla 4.16 con las áreas verdes en el sector de estudio en la ciudad.

Como resultado final se identificaron 6 zonas aparentes para la implementación de PTAR con pozos de inyección en el sector se muestran en la figura 4.5 y se detallan en la tabla 4.18.

Tabla 4.20: Relación de zonas aparentes para la implementación de pozos de recarga del acuífero en el sector.

PTAR	Distrito	Ubicación	Detalle
1	El Agustino	250 mts al Sur-Este de la captación de la Atarjea	Anexo 8.5
2	Ate (Límite con San Borja)	Sector Nor-Este del trebol de Javier Prado	Anexo 8.6
3	La Molina	Universidad Agraria	Anexo 8.7
4	Santiago de Surco	Predios del Jockey Club	Anexo 8.8
5	San Isidro	Hoja Sur-Este del trebol de Via Expresa con Javier prado	Anexo 8.9
6	San Juan de Miraflores	Area verde lateral a avenida Los Eucaliptos	Anexo 8.10

4.7.5 Características de las zonas seleccionadas

El análisis realizado permite apreciar que el limitante principal para proyectos de tratamiento y recarga del acuífero de Lima es la escasa disponibilidad de áreas aparentes, producto de la densidad urbana de la ciudad de Lima y de la escasez de áreas verdes en la ciudad. En adicional, se debe tener presente que algunos sectores tienen pozos de extracción ubicados a menor distancia de la recomendada en la tabla 4.18, por lo que la solución en estos casos será la de anular la operación de los pozos de extracción que se encuentren dentro de las zonas de exclusión o en su defecto, transformar algunos pozos de extracción en pozos de inyección.

Asimismo, siempre será viable según el caso, utilizar algunos pozos de extracción también como pozos de inyección de forma alternada, dejando los periodos de tiempo requeridos para garantizar la residencia hidráulica requerida.

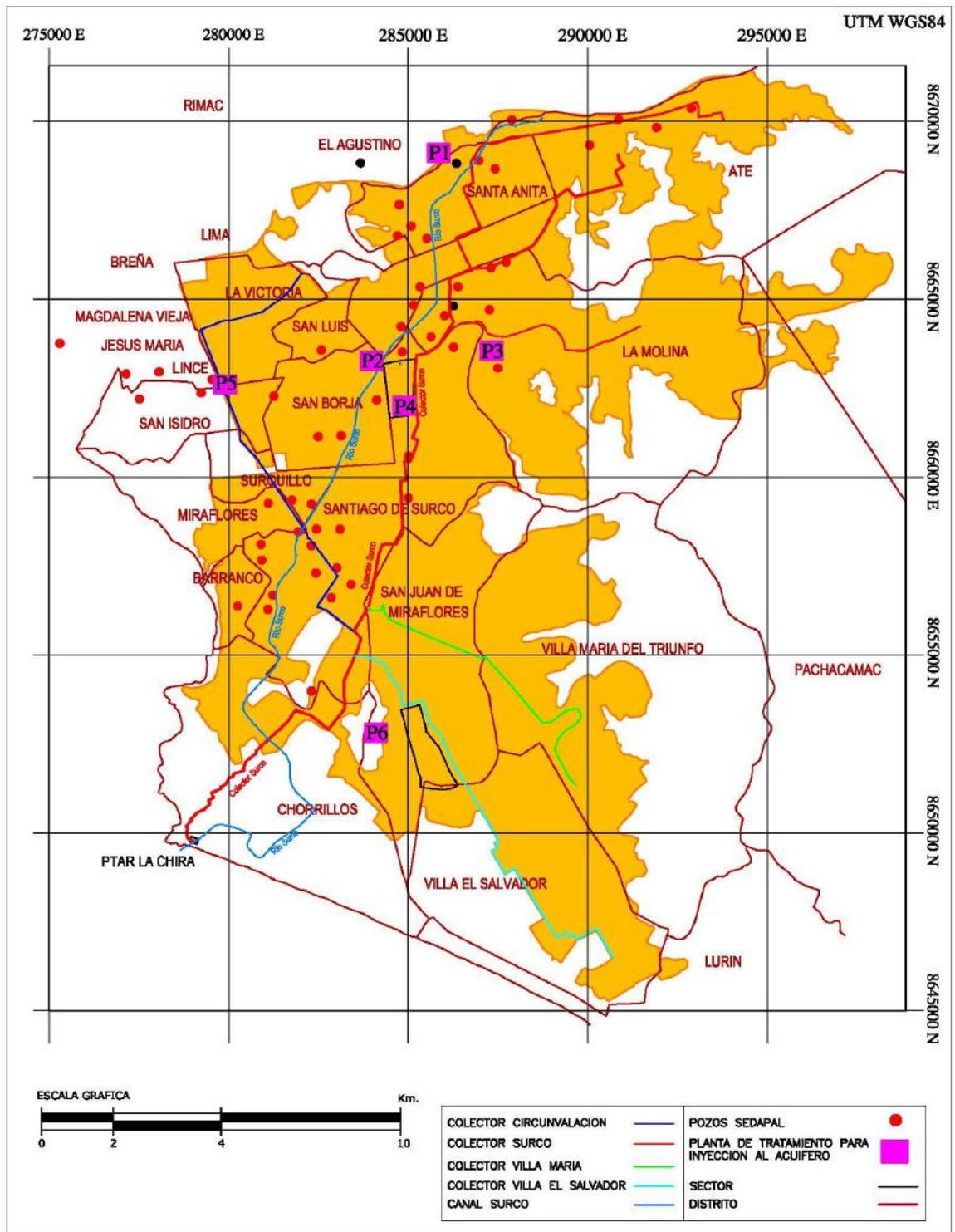


Figura 4.6: Ubicación tentativa de plantas de tratamiento de agua residual. Fuente: Adecuación de información contenida en PLAN MAESTRO SEDAPAL 2014

4.8 Resumen de Resultados

Los resultados determinan que en el Sector de análisis, existe un superávit potencial de aguas residuales de 5.77 m³/s (tabla 4.21), parte de los cuales, 4.66 m³/s (tabla 4.21) serían evacuados a la playa La Chira y son disponibles para recarga del acuífero de Lima.

Asimismo, se ha determinado que existe la posibilidad de recarga del acuífero de Lima en la zona del Sector de 3.58 m³/s, como indica la tabla 4.22, por lo cual se demuestra la existencia de caudales de aguas residuales en suficiencia para atender la recarga del acuífero de Lima.

Tabla 4.21: Cálculo de disponibilidad de aguas residuales en el Sector:

Parámetro	Caudal m ³ /s
Caudal de superávit de aguas residuales (Tabla 4.15)	5.77
Caudal reportado durante estiaje, evacuado al mar en la playa la CHIRA. Fuente: SEDAPAL 2014.	4.66
Caudal medio anual proyectado por PTAR La Chira	6.00

Tabla 4.22: Potencial de captación de aguas residuales con la finalidad de potabilización para recarga artificial del acuífero de Lima.

PTAR	Caudal m ³ /s.	Detalle
1	0.44	La ingeniería del proyecto deberá resolver los riesgos contaminación de la Atarjea. Un detalle relevante es que en la Atarjea ya existe una PTAR con capacidad mínima (1 l/s)
2,3,4	0.95	Sectores con facilidades para el tratamiento y la inyección directa o según sea el caso, para infiltración directa.
5	0.79	El área con que se cuenta para la instalación es limitada, por lo que deberá contemplarse la segmentación de la planta y los procesos en diferentes locaciones.
6	1.40	Tiene la ventaja de contar con el mayor caudal disponible pero se tendrá que aplicar soluciones de ingeniería que eviten el riesgo de contaminación de los Pantanos de Villa. Una de las ventajas es que permitirá la disminución de la intrusión marina y el deterioro de la calidad de las aguas del acuífero.
Total	3.58	

5 Discusión de Resultados

La investigación realizada ha permitido comprobar que la ciudad de Lima es actualmente hídricamente deficitaria en 3.3 m³/s, déficit hídrico que se agravará en el futuro. Asimismo, el acuífero de Lima, es un recurso usual de la ciudad ante la insuficiencia de fuentes de aguas superficiales y ha sido sobre-explotado (los niveles máximos de extracción fueron de 12.38 m³/s durante 1997). La evaluación realizada indica que la sobreexplotación continua (aunque en menor medida) como consecuencia de la existencia del déficit hídrico actual señalado por SEDAPAL en el Plan Maestro del 2014 y tiene que ser cubierto por extracciones del acuífero mayores al caudal seguro de 6 m³/s y a la explotación de pozos informales.

El sector de análisis, dispone de 6.27 m³/s de aguas residuales, de los cuales 0.5 m³/s son tratados, es decir hay un superávit teórico de 5.77 m³/s de aguas residuales que son vertidos por el emisario submarino de la Chira al Mar. El caudal mínimo reportado en el colector Surco es de 4.66 m³/s, medidos a la altura del emisario submarino de La Chira. Es deducible que la diferencia entre los caudales teóricos producidos y los evacuados en La Chira corresponden a infiltraciones del sistema de alcantarillado y otros reúsos no reportados.

Asimismo, el área verde (parques y jardines públicos) existente en el sector tiene una extensión de 875 has. (Tabla 4.10) con una demanda de agua de riego anual de 8.75 MMC, cálculo basado en la evapotranspiración promedio anual de 1000 mm, medido en las estaciones de Manchay Bajo, Campo de Marte e Hipólito Unanue (ANA 2010), equivalente a un caudal medio de 0.28 m³/s, por lo que el reúso de aguas residuales para el riego de las áreas verdes, si bien es una práctica recomendable y viable, es de por si es totalmente insuficiente para disponer de los caudales de aguas residuales disponibles en el sector y por ende en la ciudad.

La demanda de agua para riego de áreas verdes públicas es de 0.28 m³/s, es mayormente abastecida mediante la utilización de aguas del canal regulado Surco (llamado río Surco) salvo en el distrito de La Molina que recientemente instaló una PTAR de 28 l/s. Otros distritos como San Borja y Santiago de Surco cuentan con PTARS pero que en esencia son simples plantas de tratamiento primario (desbaste y filtrado) de aguas del denominado río Surco para su uso riego de parques y jardines.

El caudal máximo de recarga del acuífero está determinado por las condiciones físicas del acuífero, y la forma física de distribución de la recarga. La capacidad de recarga y reúso, estará determinado por la extensión total del Acuífero: 390 km², suelos relativamente permeables (no arcillosos) en un 70% del área superficial, con una altura útil del acuífero de 100 m. y capacidad de almacenamiento (S) entre 5% y 10% del volumen total almacenable por el Acuífero de Lima (Nippon Koei Co. LTD 2001), es decir tiene capacidad para almacenar 2,730 MMC y presenta una variación del volumen almacenado de agua de 270 MMC que

corresponden a una variación del nivel piezométrico de 10 m. que permite un caudal de extracción medio anual de 8.56 m³/s y un caudal de extracción durante los meses de estiaje de 14.70 m³/s, por lo que la inyección a recargar estará determinada finalmente por mayores volúmenes de extracción futuros, es decir se podría recargar hasta volúmenes no menores a los volúmenes medios de extracción anual de 8.56 m³/s para toda la ciudad de Lima.

5.1 Viabilidad Técnica

Es técnicamente viable la recarga del acuífero de Lima mediante el uso de aguas residuales tratadas, por reunir su acuífero las condiciones de permeabilidad, profundidad, extensión, condición de acuífero libre y tipo de suelo, y por la disponibilidad de aguas residuales, en la ciudad, como se ha demostrado en el análisis del sector seleccionado el mismo que es representativo de la realidad de la ciudad.

Del análisis de la oferta de aguas residuales en el sector, de la evaluación de disponibilidad de espacios adecuados para la implementación de PTARS y del análisis de la experiencias en otras ciudades en el mundo, se concluye que la recarga del acuífero de Lima puede realizarse mediante la inyección directa de aguas tratadas a nivel terciario o por técnicas de infiltración desde superficie (superficial o sub superficial) de aguas tratadas a nivel secundario.

La viabilidad de la recarga del acuífero mediante el uso de agua residual tratada, para su posterior reúso como agua potable dependerá finalmente de la evaluación técnica que se realice para cada sitio potencial señalado en el capítulo anterior (tabla 4.20), evaluación que deberá comprender entre otros: resultados de las evaluaciones geofísicas, permeabilidad, calidad de aguas residuales a tratar, calidad del agua del acuífero subyacente, tecnología de tratamiento a aplicar e impactos ambientales y sociales.

El éxito del emprendimiento de la recarga del acuífero de Lima dependerá principalmente de las soluciones de ingeniería que se desarrollen para afrontar las limitaciones de áreas adecuadas en la ciudad, dado que son pocas las áreas urbanas aparentes para la captación de aguas residuales e implementación de PTARS y las pocas existentes requerirán la gestión de los derechos de uso ante autoridades públicas o eventualmente privadas. Como referencia del área demandada para proyectos de esta naturaleza, tratar caudales de 1 m³/s de agua, implica volúmenes de almacenamiento de 3,600 m³ por cada hora de retención hidráulica del sistema de tratamiento.

Se tendrá que hacer uso de diversas estrategias en forma conjunta, para maximizar la eficiencia en el uso del espacio y minimizar los requerimientos del área así como la selección de tecnologías adecuadas para el tratamiento de aguas residuales que exijan menores tiempos de retención hidráulica.

El estándar usual de calidad requerido para inyección directa de aguas al acuífero en otras ciudades es el de agua potable, es decir apta para el consumo humano, lo que supone la utilización conjunta de las tecnologías más avanzadas desarrolladas hasta la fecha (Osmosis inversa, microfiltración, sistemas de oxidación avanzados, tratamientos terciarios de ozonización y de rayos U.V. etc.). Estos estándares son particularmente exigibles cuando la recarga del acuífero será realizada por medio de la inyección directa. En el caso la recarga del acuífero sea realizada de forma extensiva, la calidad exigible podría ser menor, producto de la capacidad de biodegradación de la zona vadosa.

La recarga del acuífero de Lima mediante el uso de aguas residuales adecuadamente tratadas según el tipo de recarga a aplicar, es técnicamente viable, a pesar de las dificultades que presentan la escasa disponibilidad de áreas aparentes en la ciudad por lo que es importante analizar la sostenibilidad de esta opción para la ciudad de Lima. Se deberá tener presente que el tratamiento de aguas residuales no necesariamente tendrá que hacerse dentro de la ciudad ya que existen zonas aparentes en las periferias de Lima para el desarrollo de este tipo de proyectos, como lo son las áreas del extinto proyecto Mesías en Lurín.

Con respecto a la necesidad de medir la sostenibilidad de esta solución, se ha determinado según la revisión literaria realizada, que no existen indicadores ni criterios aparentes para el fin, por lo que es pertinente desarrollar los criterios y conceptos bajo los cuales se pueda lograr este objetivo.

5.2 Teoría de los Estados Límites

5.2.1 Discusión académica

Las discusiones académicas en las últimas décadas han estado profundamente marcadas por aspectos medioambientales y sociales, por lo que es difícil abordar emprendimientos nacionales, empresariales o científicos sin contemplar las implicancias de estos aspectos.

No existen dudas sobre la afectación del cambio climático al desarrollo global, de la naturaleza finita de los recursos naturales o de los problemas de distribución de la riqueza al desarrollo de la humanidad, y en particular de la relevancia del agua para el desarrollo nacional y global.

La vida humana como la conocemos hoy, cambiará en el futuro, la sociedad tendrá que adaptarse a las condiciones futuras de límites al uso de los recursos naturales, el proceso de cambio ya se ha iniciado. En años recientes, en el Perú se han presentado amplias perturbaciones al desarrollo de proyectos de inversión que en apariencia atentan contra el bienestar ambiental de las comunidades del entorno. Inversiones de exploración petrolera que se confrontan con los derechos de los pueblos nativos selváticos a preservar su entorno, proyectos de inversión minera detenidos por conflictos socio ambientales que contraponen los derechos de uso de agua para la agricultura contra la implementación de proyectos de explotación minera o comunidades que paralizan obras de infraestructura por no satisfacer sus expectativas.

Los ejemplos de conflictos a nivel nacional son numerosos, actualmente el gobierno tiene identificados 160 Conflictos a nivel nacional, de los cuales el 80% son de naturaleza socio-ambiental (Geocadmin 2015). Algunos casos sonados en los últimos tiempos son Santa Ana, Conga, Cañarico y Tía Maria en el sector Minero, Iñapari en el sector de infraestructura, etc. De igual forma, gracias a las facilidades de comunicación existentes, no resulta difícil encontrar numerosos ejemplos a nivel global, donde los intereses de explotación de recursos naturales o de afectación al medioambiente encuentran oposición de quienes en apariencia serían los más beneficiados, que son los poblados vecinos.

La disertación sobre el origen y justificación de cada conflicto citado es compleja, máxime si como en el caso peruano, se aprecia insatisfacción poblacional latente por la distribución de la riqueza y postergación de los reclamos sociales, los mismos que son exacerbados por la comunicación global (que muestra nuevos horizontes a poblaciones con pretensiones de desarrollo relegadas por muchos años). La existencia de inversiones millonarias en el vecindario será siempre oportunidad para poner en agenda cualquier tipo de reclamo social, justo o no.

El presente desarrollo conceptual de la “Teoría de los Estados Límites” pretende dotar a los evaluadores de proyectos y a los responsables de la gobernanza, de una herramienta que les permita gestionar mejor la toma de decisiones, en especial cuando, como en la mayoría de los casos, involucran recursos naturales.

Desde 1987, fecha en que se presentó el informe de la comisión Bruntland “The Common Future” en donde por primera vez se definía el Desarrollo Sostenible como principal valor a cultivar para garantizar el bienestar común con respeto al futuro medioambiental del planeta. Con acierto se definió la “Desarrollo Sostenible” como: “satisfacer las necesidades de las generaciones actuales sin afectar las capacidades de las generaciones futuras”, definición que en esencia resulta un llamado de atención de sobre el nivel de compromiso de los recursos naturales actualmente explotados y de la biocapacidad ecológica del planeta para satisfacer las demandas de la creciente población internacional, hoy contabilizada en cerca de 7’300,000,000 de seres humanos.

La explosión demográfica global, tarde o temprano, agotará los recursos que requiere para su subsistencia, sea agua dulce, terrenos de cultivo, bosques que limpien la atmosfera entre otros bienes naturales de dominio global. Esta problemática fue expuesta con mucha anticipación, en 1968 por Garret Hardin en su disertación sobre los “Bienes Comunes”. No existe duda de que la humanidad en sí misma es insostenible, salvo que se lograran tasa de crecimiento poblacional cero, (control global de reproducción humana), considerado utópico por el mismo Hardin en “La Tragedia de los Bienes Comunes”.

Las matemáticas no mienten, podremos discutir cuanto tardaremos en agotar cada recurso del que requerimos para el sustento como especie, pero lo que nunca será tema de debate es que se acabarán.

Expuesto de esta manera, el planteamiento de Sostenibilidad del informe Bruntland es utópico, pero no por ello menos valioso, la presión de consumo de la humanidad sobre lo que hemos denominado bienes de dominio global es insostenible y terminará por agotar aquellos recursos no renovables y estrechar la disponibilidad de los recursos renovables que obligará a racionar su oferta, aunque no de forma equitativa como nos lo ha mostrado la historia.

Es importante destacar la diferencia entre no sostenible y extinción, la certeza de no sostenibilidad no implica la desaparición de la especie humana como consecuencia del agotamiento del algún recurso natural o de un ecosistema mayormente contaminado, la naturaleza de la especie humana es adaptarse a nuevos entornos por lo que el fondo de la discusión de sostenibilidad debe centrarse en los procesos de adaptación frente a desequilibrios de sostenibilidad y los procesos socialmente traumáticos de adaptación a nuevas condiciones límites de recursos naturales o capacidades eco sistémicas.

El proceso es predecible y no se requiere de ningún novelista de ciencia ficción para pronosticar el tránsito hacia un mundo de escasez, que como el lector de estas líneas estará imaginando será el de conflictos y guerras entre naciones y revoluciones internas de cada país.

Esta es una visión en apariencia apocalíptica extrema, a la que sin duda múltiples autores le han dedicado innumerables escritos, pero tiene por finalidad resaltar lo que ahora debe resultar evidente, el futuro de nuestra descendencia está comprometido, la sostenibilidad tiene límites y las mitigaciones deben empezar hoy.

No menos preocupante es reflexionar sobre el proceso de transición de la humanidad por periodos de escases o periodos de compromiso de la oferta de los recursos naturales, donde como muchos también han especulado, la humanidad tendrá que reducir su número de manera abrupta para reequilibrarse con su entorno ya sea artificialmente o por eventos de extinción parcial que finalmente actuarán como reguladores de la sostenibilidad de la vida humana terrestre. Visiones más conservadoras como las de la ONU especulan que el nivel poblacional global se estabilizará en 10 mil millones de personas, supuesto que difícilmente se podría considerar optimista y que en el mejor de los caso presentará problemas de otra naturaleza.

Por lo expuesto, es evidente que nadie podrá garantizar la sostenibilidad de la especie humana en el planeta, al menos basado en lo que conocemos de la ciencia actual, por lo que no será posible que los recursos naturales finitos alcancen para un crecimiento poblacional eterno.

5.2.2 Límite de la Sostenibilidad

La “Sostenibilidad” es una palabra de moda y difícilmente escucharemos en la actualidad discurso de políticos, investigadores y empresarios que no hagan referencia a ella. Hoy la gestión debe ser sostenible, el uso de los recursos naturales debe ser sostenible, la construcción puede ser sostenible si se invierte más, las obras de los estados deben garantizar la sostenibilidad y las políticas de gobierno de los diferentes estados deben ser sostenibles etc. etc. etc.

La definición tradicional de sostenibilidad ha sido ampliada, con acierto o conveniencia para incluir aspectos ambientales, sociales y económicos, es así que hoy en día entendemos (al estilo Francés) por sostenible a todo aquello que puede ser perdurable. Si aceptamos que a lo largo de toda la historia de la humanidad nada ha sido sostenible, solo podemos concluir que la sostenibilidad tiene límites.

Acertadamente, en tiempos recientes algunos expositores más reflexivos e instituciones más responsables hablan de grado de sostenibilidad, es decir ya no se refieren a la palabra en términos absolutos sino relativos, por lo que

será más común encontrarnos con expresiones hablada o escritas que se refieren a proyectos o políticas como “más sostenibles”

La definición de un punto de partida conceptual de la presente reflexión académica, queda claro que siendo la sostenibilidad una urgencia moral humana con nuestra descendencia (sino con nosotros mismos en un futuro cercano) debemos acotar su uso a efectos de cuantificar objetivos.

Entonces este desarrollo conceptual de sostenibilidad debe estar orientado a definir los términos en que las personas y sociedades encuentran soluciones para ser “más sostenible” pero ¿cómo lograr este objetivo si este no puede ser medido cuantitativamente?

La necesidad de cuantificar la sostenibilidad requiere de un indicador fácil de aplicar y que pueda ser una herramienta de “Gestión para el Desarrollo Sostenible” (otro cliché) que cumpla con el reto de conciliar la naturaleza ampliada del concepto para abarcar sus tres aspectos fundamentales: Medio Ambiental, Social y Económico.

Por lo expuesto anteriormente, aceptado el hecho de que la sostenibilidad tiene límites, se debe medir cuánto tiempo se sostendrá una situación en particular y centrar nuestros esfuerzos en evaluar la naturaleza de los cambios que la sociedad tendrá que afrontar durante los periodos de transición entre diferentes estados de equilibrio entre límites de sostenibilidad.

5.2.3 La Sostenibilidad al Límite de la Teoría del Caos

Los afanes de la humanidad por poner orden al caos son intrínsecos a la naturaleza misma del hombre, la racionalidad es la herramienta que utiliza para entender su relación con el medio ambiente, todo efecto tiene una causa en el universo newtoniano, por lo que conocida la ubicación y comportamiento de una partícula podemos determinar su ubicación futura. Estos simples principios tienen su talón de Aquiles en el principio de la realidad que indica la imposibilidad determinística de un sistema complejo.

La naturaleza es probablemente uno de los sistemas más complejos que intentamos entender, la interacción del hombre con el medio ambiente y el delicado balance entre la capacidad de sustento de la biosfera y el tamaño de la humanidad son parte de ello. Si aceptamos que la sostenibilidad dependerá de la forma en que consumimos los recursos, entonces asumir el reto del desarrollo sostenible implicará minimizar el consumo global de los recursos naturales y asegurar de esta forma su disponibilidad para futuras generaciones.

El éxito del propósito es de difícil pronóstico por la naturaleza compleja del sistema, por la dificultad para describir la interrelación en el tiempo de las distintas variables que lo describen y de la relación no lineal y eventualmente aleatoria de su comportamiento caótico, pronóstico que aparenta ser más un

acto profético que un esfuerzo científico serio. Si esto fuera poco afán, evaluemos el desarrollo sostenible en diferentes fases: social, económica, y ambiental etc. para lograr la universalidad del objetivo, es decir que satisfaga a todos, imposible. Es pues difícil entender los afanes determinísticos de algunos indicadores que pretenden englobar en un solo número mágico la sostenibilidad de algún recurso natural, es un acto de soberbia intelectual.

La concepción de la teoría de los límites es un acto de humildad, que nace de la aceptación de la naturaleza compleja del ideal sostenible, de la no linealidad de las relaciones entre variables que describen la dinámica del sistema y de la forma azarosa en que la voluntad humana define el futuro, modificando sus patrones de gobernanza y con ello la forma en que impacta su entorno.

Los estados límites han estado siempre presentes y lo estarán en el futuro para aquellos investigadores acuciosos dispuestos a observar la realidad del comportamiento de los sistemas complejos (teoría del caos) y es que en el caos también hay un orden. La imposibilidad determinística de los sistemas complejos es real, la no linealidad entre las relaciones de causa y efecto una limitante, pero aún dentro del caos podemos apreciar periodos de estabilidad predictiva enmarcados entre intervalos menores de grandes cambios, de mucha actividad que disipa energía: “Los Estados Límites”.

5.2.4 Teoría de los Estados Límites

Los Estados Límites son intervalos de tiempo cortos, de comportamiento caótico que enmarcan periodos de estabilidad predictiva donde eventualmente las relaciones entre las variables que describen el comportamiento del sistema pueden exhibir patrones de funciones lineales. El periodo de tiempo entre dos estados límites es el tiempo de vida sostenible. Definido de esta manera, será más fácil intentar cuantificar el concepto Sostenibilidad referido a la explotación de los recursos naturales en términos del tiempo que tardará en llegarse a una condición de un estado límite a otro durante su explotación, donde los estados límites estarán determinados por los puntos (o pequeños intervalos) donde la demanda alcanza a la oferta, ya sea por la insuficiencia de cantidad del recurso ofertado o por afectación de la eficiencia del consumo (disminución de la calidad y afectación etc.).

5.2.5 Tiempo de vida sostenible y Estado Límite

El Estado Límite del consumo de un recurso natural será cuando la demanda alcance a la oferta, ya sea por la insuficiencia de cantidad o calidad y el Tiempo de vida Sostenible será el tiempo que tardará en llegarse a una condición de “Estado Límite” en el uso de un recurso natural por lo que la forma coherente de sus unidades serán años de vida humana (AVH)

5.2.6 Medir para mejorar

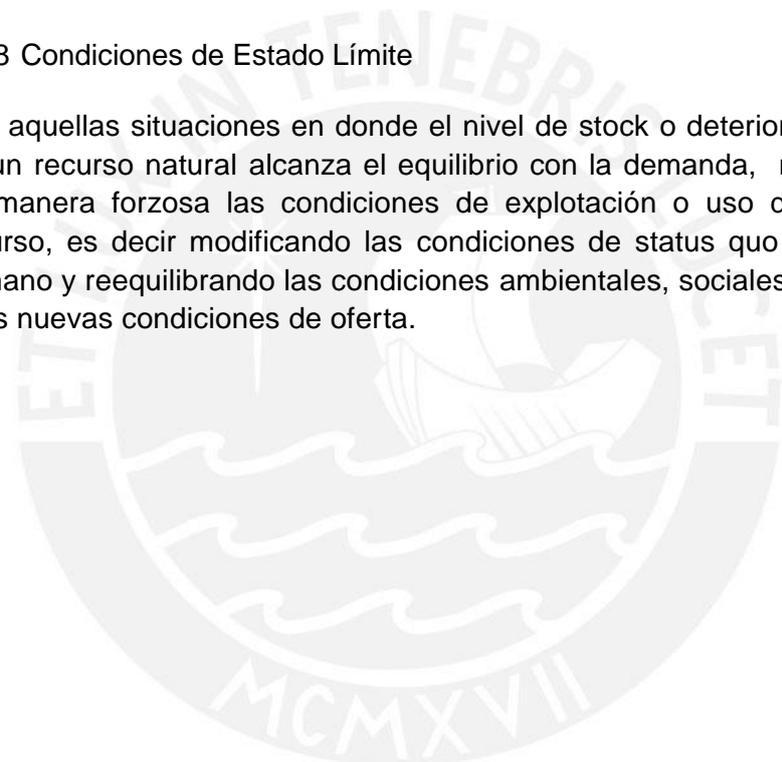
La “Gestión Sostenible” requiere ser medida de forma tal que los encargados de la gobernanza tengan herramientas e indicadores para mejorar su performance, una autoridad podrá evaluar la mejora su gestión midiendo cuantos años de vida sostenible en el uso de un recurso determinado logra como consecuencia de su gestión (AVH per cápita).

5.2.7 Medir para para elegir

La Gestión sostenible requiere elección de proyectos de inversión, por lo que la disyuntiva sobre qué proyecto priorizar estará resuelta al implementar aquel que genere más años de vida sostenible AVH o menores costos por cada año de vida ganado.

5.2.8 Condiciones de Estado Límite

Son aquellas situaciones en donde el nivel de stock o deterioro de condición de un recurso natural alcanza el equilibrio con la demanda, modificando la de manera forzosa las condiciones de explotación o uso de determinado recurso, es decir modificando las condiciones de status quo para un grupo humano y reequilibrando las condiciones ambientales, sociales y económicas, a las nuevas condiciones de oferta.



5.3 Caso de aplicación de la Teoría de los Estados Límites

5.3.1 Análisis de sostenibilidad Hídrica de la ciudad de Lima

La aplicación de los conceptos de la denominada “Teoría de los Límites”, exige determinar o predecir con anticipación las coyunturas de explotación del recurso natural bajo análisis, en este caso, el agua en la ciudad de Lima. La condición de Estado Límite, son punto a partir del cual las relaciones entre las múltiples variables dependientes entre sí, cambia con respecto al comportamiento exhibido durante el periodo iniciado con el estado límite anterior.

Para el caso de la evolución de la situación hídrica de la ciudad, se han definido y evaluado los siguientes Estados Límites (ver tabla 5.1).

Tabla 5.1: Situación de Estado Límite a Evaluar

	ESTADO LIMITE	PUNTO
I	Situación Actual de oferta y demanda hídrica de Lima.	A
II	Demanda hídrica de Lima, en condiciones de Límite Falkenmark.	A'
III	Equilibrio entre la oferta ampliada de fuentes de agua superficial y demanda proyectada.	B
IV	Equilibrio entre demanda reducida por reúso de aguas residuales en la recarga del acuífero y oferta superficial actual sin ampliaciones.	C
V	Equilibrio entre la oferta ampliada de fuentes de agua superficial y la demanda proyectada, reducida por la optimización de redes de servicios.	D
IV	Equilibrio entre la oferta sin ampliación de fuentes de agua superficiales y la demanda proyectada al límite Falkenmark.	E
V	Límite de equilibrio entre la demanda actual y la oferta mejorada por el reúso de aguas residuales para la recarga del acuífero	F
VI	Límite de equilibrio entre la oferta mejorada por el reúso de aguas residuales para la recarga del acuífero y la demanda proyectada al límite Falkenmark.	G
VII	Límites entre la demanda mínima considerada por Falkenmark reducida por reúso de aguas residuales para la recarga del acuífero y la oferta sin ampliación de fuentes de agua superficial.	H
VIII	Límites entre la demanda mínima considerada por Falkenmark reducida por reúso de aguas residuales para la recarga del acuífero y la oferta con ampliación de fuentes de agua superficial.	I

En la tabla 5.1 se puede apreciar los Tiempos de Vida Sostenible (TVS) para diferentes situaciones críticas (Estados Límites) de relación entre la oferta y demanda de agua para la ciudad de Lima. La tabla 5.2 muestra las variables críticas que modelan su comportamiento entre la oferta y demanda de agua para Lima y la figura 5.1, grafica las diferentes curvas de oferta y demanda para el análisis del TVS.

Tabla 5.2: Matriz de Ingreso de parámetros para el cálculo de tiempo de vida sostenible, escenario conservador.

ANÁLISIS DE TIEMPOS DE VIDA SOSTENIBLE ENTRE ESTADOS LÍMITES		Escenario conservador			
CASO: SITUACION HIDRICA DE LA CIUDAD DE LIMA METROPOLITANA Y CALLAO		Lima, 15/11/16			
INPUTS					
1	Población de Lima a Enero del 2015	9,752,000			
2	Tasa de Crecimiento Poblacional	1.25%			
3	Demanda de Agua Potable per capita día, promedio anual	180.0			
OUTPUTS					
LIMITE	A	B	C	D	
TVS años	hoy	6	27	38	
LIMITE	E	F	G	H	
TVS años	46	58	81	121	
INPUTS					
PROYECCION COBERTURA DE AGUA TOTABLE					
4	Porcentaje de Población atendida al 2015	91%			
5	Objetivo de cobertura de agua potable	95%			
6	Plazo para mejora de cobertura, años.	10.00			
7	Incremento Anual de % cobertura	0.40%			
SOLUCION DE PROBLEMAS PERDIDAS SUMINISTRO					
8	Porcentaje de agua facturada	70%			
9	Objetivo de mejora de Tasa facturada	85%			
10	Plazo para mejora de % facturado, años.	10.00			
8	Incremento Anual de % Eficiencia de Suministro	1.50%			
SOLUCION RECARGA DE ACUIFERO DE LIMA					
11	Potencial de recarga de acuífero	50%			
12	Potencial de recuperación por recarga	90%			
13	Fecha de Inicio de recarga de acuífero	2,017			
14	Plazo de implementación del recarga de Acuífero	20			
15	Pot. Recuperada de Acuífero (11x12x17)	11.89	M3/s		
INPUTS					
DEMANDA DE AGUA EN PUNTO DE ENTREGA					
16	Demanda total anual	832.92	MMC		
17	Demanda Promedio per cápita	257.14	Lts. x día		
18	Caudal mínimo demanda	26.41	M3/seg día		
OFERTA HIDRICA					
19	Superficial caudal disp. Estiaje	19.3			
20	Subterránea Caudal Seguro	4.5	23.8	M3/seg.	
21	Balance Hídrico Actual	-2.61	M3/seg		
ESTADOS LÍMITES DE USO DEL AGUA					
22	Límite Falkenmark	100	litros por persona día		
23	Límite Sanitario	80	litros por persona día		
24	Límite Rímac+Transvases	32	m3/seg		
25	Límite pozos	4.5	m3/seg		
26	Límite físico oferta	36.5	m3/seg		

Límites de Sostenibilidad Hídrica para la ciudad de Lima (a nivel producción)

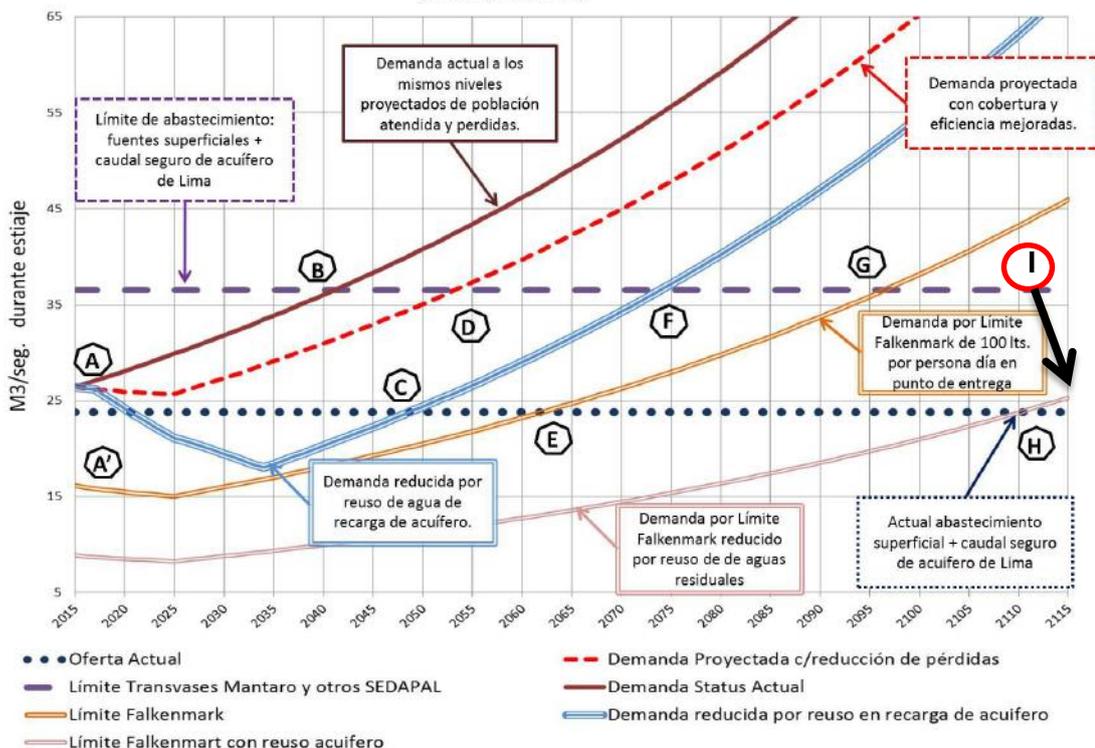


Figura 5.1: Gráfico de estados límites y curvas de oferta - demanda

Tabla 5.3: Resultados de tiempos de vida de sostenibilidad hídrica para Lima;

ESTADOS LIMITE		TIEMPO DE VIDA SOSTENIBLE	
	Límite	AÑO	TVS (años)
A	Insuficiencia hídrica para atender a población total actual según condiciones de consumo promedio.	2015	hoy
A'	Reequilibrio de demanda reducida por reuso de aguas de recarga de acuífero con oferta.	2021	6.0
B	Límite de abastecimiento de demanda a niveles actuales de eficiencia con obras proyectadas SEDAPAL	2042	27.0
C	Límite de suministro de agua considerando reuso de acuas residuales en recarga de acuífero.	2048	33.0
D	Límite de suministro considerando obras proyectadas SEDAPAL y mejoras de eficiencia y cobertura	2053	38.0
E	Límite Falkenmark, insuficiencia para abastecer de un mínimo de 100 lts/día a cada poblador.	2061	46.0
F	Límite de abastecimiento de demanda incluida Recarga de Acuífero + Transvases	2073	58.0
G	Límite Falkenmark con obras de ampliación SEDAPAL	2096	81.0
H	Límite Falkenmark con obras de ampliación SEDAPAL y reuso de aguas residuales en recarga de acuífero	2110	95.0
I	Situación de Estado Límite Final	2136	121.0

La tabla 5.3 muestra los valores de TVS para las diferentes relaciones entre la oferta y demanda de agua para Lima, los valores mostrados han sido calculados en función de una tasa de crecimiento poblacional de 1.25% anual, como se muestra en la tabla 5.2, sin embargo se deberían utilizar valores mayores como los mostrados en la tabla 4.5, donde el promedio de crecimiento para Lima entre los años 2000 y 2010 fue de 1.6%. Para este valor, los TVS se reducen sensiblemente y el valor del mayor TVS (I) sería de 100 años.

6 Conclusiones

La ciudad de Lima es la segunda ciudad más grande asentada en un desierto y está considerada entre las 20 ciudades con mayor estrés hídrico a nivel global. Atraviesa por una situación de escasez hídrica que se refleja en limitaciones del acceso al agua de parte de la población de Lima, limitaciones que no obedece solamente a factores de inversión en nuevas redes de distribución sino a límites físicos de la oferta de agua disponible.

El agotamiento de las fuentes superficiales de agua que suministran los ríos y su acuífero obliga a explorar nuevas alternativas. La ciudad requiere con urgencia nuevas fuentes de agua, los trasvases de la cuenca del río Mantaro, práctica iniciada a principios de la década del 60, ya no son hoy suficientes y pueden comprometer el desarrollo futuro de la cuenca vecina.

El déficit hídrico de la ciudad seguirá creciendo, se estima alcance los 12 m³/s para el 2040 de no incrementarse nuevas fuentes de agua. Las previsiones realizadas por SEDAPAL hasta el 2042 indican la necesidad de inversión de \$ 5,000 millones para sostener los servicios sanitarios de la ciudad, recursos económicos que podrían tener un mejor destino que satisfacer las necesidades hídricas de la capital en desmedro del desarrollo de otras zonas del país.

La solución propuesta de recargar el acuífero de Lima mediante el uso de aguas residuales tratadas a nivel potable es, como concluye el presente trabajo de investigación, técnicamente viable y e hídricamente más sostenible. El reúso indirecto de aguas tratadas para su uso potable luego de una residencia hidráulica en cuerpos de agua (superficiales o subterráneos) usados como amortiguadores ambientales, es una práctica usual en varias ciudades del mundo que sufren de escasez de agua.

Los recursos que aporta el río Rímac han sido largamente superados por la demanda, su cauce recibe aportes de lagunas reguladas de la cuenca vecina del Mantaro desde la década del 60 y se prevé que en 25 años el Rímac se transforme en río regular, producto del aumento de embalses regulados en las cuencas que lo abastecen. La conclusión es simple, los déficits en el futuro serán anuales y no estacionales y la generosidad hídrica actual de los pobladores de la cuenca del Mantaro no será eterna, ya que tienen sus propias problemáticas que atender.

Tratar a nivel potable el agua residual que hoy se vierte al mar para su reúso en la recarga del acuífero de la ciudad de Lima es lo más cerca de la sostenibilidad que podremos estar, solo de esta forma ganaremos los años de vida sostenible que requerimos para explorar otras opciones en el futuro.

La inadecuada priorización de las inversiones en la gestión hídrica de la ciudad requiere nuevos enfoques que permitan elegir aquellos proyectos de inversión que sean más sostenibles, para ello se debe considerar las aguas residuales

como un recurso valioso a ser reusado en irrigación y/o en la recarga del acuífero de Lima.

El análisis realizado referente a los límites de sostenibilidad de la situación Hídrica de Lima muestra que de no contar con soluciones para mejorar la eficiencia del suministro de agua potable que brinda SEDAPAL y nuevas fuentes de agua para la ciudad ocurrirá un severo desabastecimiento en el futuro. Aun siguiendo el plan de SEDAPAL de aumentar la oferta de agua mediante cuantiosas inversiones en trasvases, derivaciones, mejora de redes y embalses, lograremos contar con 36.5 m³/s (incluyendo 4.5 m³/s de aguas subterráneas del acuífero de Lima), caudal que sería copado por la demanda a lo sumo en 25 años.

Las soluciones actualmente utilizadas para resolver la problemática hídrica de la ciudad son necesarias e insuficientes, el presente estudio alerta sobre situaciones más graves previstas, como es la posibilidad de alcanzar el valor límite de 100 l/d día per cápita entregado a cada usuario en aproximadamente 100 años, situación que se alcanzaría aunque se realicen las inversiones requeridas para implementar todas las opciones disponibles para solucionar la situación hídrica de la ciudad (recarga del acuífero, trasvases del Mantaro, mejoras de eficiencia del suministro etc.)

Es impostergable la reducción de las pérdidas de agua del sistema de abastecimiento de la ciudad, estimadas en 30%, reducirlas a la mitad (15%) le daría 10 años más de provisional sostenibilidad a la ciudad de Lima bajo los estándares actuales, lo que permitirá la postergación de costosas obras de ampliación de fuentes de agua y generará importantes ahorros a la economía del País de cerca de US\$ 1'000,000,000 para los próximos 10 años.

Acercarnos al ideal de “Desarrollo Sostenible” requiere del reúso de aguas residuales en la recarga del acuífero de Lima para su posterior reúso potable, objetivo que debe ser emprendido a la brevedad posible. De esta manera ganaremos el tiempo necesario, estimado en 22 años, para adecuarnos a un futuro hídricamente sombrío.

Emprender el objetivo de ganar sostenibilidad hídrica, implicará profundos cambios en el estatus quo actual, éstos deberán comprender la generación de normativas para la recarga de acuíferos, modificación de los estándares actualmente utilizados para la evaluación y aprobación de proyectos, a efectos de que incluyan análisis de tiempo de vida sostenible, adecuación de las competencias de gestión de los gobiernos locales para que sean los motores de impulso de políticas de reúso y finalmente la liberalización del mercado de recarga y recuperación de aguas en acuíferos.

Aún con mejoras sustantivas, Lima tiene fecha límite y ésta es 100 años, por lo que el futuro sostenible se deberá buscar más allá de las fronteras de la ciudad y exigirá finalmente refundar Lima.

7 Referencias

- 2030 The Water Resource Group (2015). Análisis Hidro-económico y Priorización de Iniciativas para Recursos Hídricos en el PERÚ. Lima.
- Agnew G. Eriksen M. (2004). New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity. Tyndall Centre for Climate Change Research (2004). Reino Unido: Tyndal Centre.
- Amjad U, Ojomo E, Downs K, Cronk R y Bartram J. Rethinking Sustainability (2015). Scaling Up, and Enabling Environment: A Framework for Their Implementation in Drinking Water Supply. North Carolina Global Research Institute, University at Chapel Hill FedEx.
- ANA (2009). Política y estrategia nacional de recursos Hídricos del Perú. Lima Ministerio de Agricultura.
- ANA (2010). Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Rímac: Estudio Hidrológico de la red de estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Río Rímac, Volumen I. Lima ALA. CHRL.
- AQUAFONDO (2013). Planificación Estratégica para la conservación en el esquema del Fondo de Agua para Lima y Callao. Lima, AQUAFONDO.
- Arjen Y. Hoekstra (2009). Huella Hídrica.– Netherlands, University of Twente, Water Footprint Network.
- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., and Tchobanoglous, G. (2006). Water reuse: issues, technologies and applications. Metcalf&Eddy, McGraw-Hill.
- Banco Interamericano de Desarrollo, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2014). La economía del cambio climático en el Perú. s/i. Lima,
- BellagioSTAMP (2009). Sustainability Assessment and Measurement Principles, www.iisd.org/measure/
- Bitton G. & Harvey R.W. (1992), Transport of pathogens through soil. In Mitchell, R. ed. Environmental Microbiology: New York, Wiley-Liss, pp. 103-124.
- Boggiano M.A. (2013) <http://www.cartafinanciera.com/uncategorized/los-10-paises-con-mas-reservas-de-agua-del-mundo/>. Accesado el 26/09/15.
- Boulding, K. E. (1966). The economics of the coming spaceship earth. Pages 3–14. . in Jarrett, H. ed. . Environmental Quality in a Growing Economy. . Baltimore John Hopkins University Press.
- Burns Tom R. (2012). The Sustainability Revolution: A Societal Paradigm Shift, ISSN 2071-1050, Article: www.mdpi.com/journal/sustainability.
- Canadian Water Sustainable Index.
- Castillo G, Mena M, Dibarrart F., Honeyman G, Moreno F, Vallejos J. (2000) Tratamiento de Aguas residuales mediante sistemas suelo acuífero, aspectos microbiológicos- Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Chacón N, Pajuelo D. (1993). Factores Geológicos en los humedales de Villa. Lima
- Chung T. (2013). Estrategia de intervención y plan Maestro de inversiones en la Cuenca del río Rímac. Lima, ANA.
- CONAGUA (2011). Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento: Alternativas tecnológicas de tratamiento de aguas residuales para la recarga artificial de acuíferos, 38. Comisión Nacional del Agua, México.

- CONSORCIO BLASA S.A - ING. ROBERTO RIBEIRO A (2002). Informe hidrogeológico: Estudio de factibilidad para el mejoramiento y ampliación de los sistemas de agua potable y alcantarillado de los ex fundos Oquendo, Santa Rosa, Naranjal, Chuquitanta y parque porcino de los distritos de San Martín de Porres y Callao. S/E.
- CORDIS (2014). Final Report - RECLAIM WATER (Water reclamation technologies for safe artificial groundwater recharge).
- Custodio, E., Llamas M. R. y Sahuquillo A (1983), Hidrología Subterránea. (2 tomos). Omega.
- DIGESA (1997). Evaluación Ambiental territorial de la cuenca del Río Rímac. Lima, Ministerio de Salud.
- DIGESA (2009). Evaluación de monitores del río Rímac con datos de Sedapal. Lima, Ministerio de Salud.
- Dillon J. y Jiménez B. (2008) Water Reuse vía Aquifer recharge: Intentional and unintentional practice.
- DINAMAR (2010). La gestión de la recarga artificial de Acuíferos en el Marco del Desarrollo Sostenible, UNESCO-MAR Working Group, IGS-TH. Grafinat, Madrid.
- Donella H. Meadows, Dennis I. Meadows, Jorgen Randers, William W. Behrens III (1972). The Limits to Growth, A Report to The Club of Rome
- El Plan Maestro Optimizado 2015-2044 de SEDAPAL.
- EPA (2012). Guidelines for water reuse; USAID, Washington DC.
- Evaluación de los Recursos Hídricos en la Cuenca del Río Rímac. Estudio Hidrológico y Ubicación de la Red de Estaciones Hidrométricas en la Cuenca del Río Rímac VOLUMEN I (INFORME FINAL) Lima, Diciembre 2010. ANA.
- Falkenmark, M. (1993). Landscape as Life Support Provider: Water-related Limitation, Population Summit of the World's Scientific Academies, New Delhi, October 1993, in Graham-Smith, F. (ed.) Population - the complex reality. London: Royal Society.
- Falkenmark, M.; Lundquist, J.; Widstrand, C. 1989). Macro-scale (water scarcity requires micro-scale approaches: Aspects of vulnerability in semi-arid development. Nat. Resour. Forum 1989, 13, 258–267.
- Fernández A, García M. Villarroya F. (2005), Inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen III. Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X.
- FAO (2013). Afrontar la escasez de agua, Un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria. Roma, UNESCO.
- FAO 2013. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACIÓN Y LA AGRICULTURA – Roma,. ISBN 978-92-5-307304-7 (edición impresa), E-ISBN 978-92-5-307633-8 (PDF)
- Fenner F. (2010) Humans will be extinct in 100 years says eminent scientist . accesado el 25 September 2015 from <http://phys.org/news/2010-06-humans-extinct-years-eminent-scientist.html>
- Fernández A, García M. Villarroya F. (2005), Inventario de experiencias de recarga artificial de acuíferos en el mundo. Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Volumen III. Escuela Politécnica Superior. Universidad Alfonso X.

- Foster S, Garduño H, Tuinhof A, Kemper K. & Nanni M (1998). Gestión Sustentable del Agua Subterránea, Banco Mundial.
- Foster S., Gale I & Espanhol I. (1994) Impactos del Uso y Reposición de las aguas Residuales en los Acuíferos (Con Referencia a America Latina). OMS-CEPIS.
- Gale I. (2005) Estrategias para la gestión de la recarga de acuíferos. UNESCO, París.
- GSAAC, Gestión Social del Agua y Ambientes de Cuencas (2006). Las Amunas de Huarochiri. IICA, Lima.
- Grey, Rob 1992, Contabilidad y Ambientalismo: La Exploración del Desafío de a Contabilización fácil para Rendición de Cuentas, Transparencia y Sostenibilidad. Accounting Organization and Society, Vol 17, No 5, pp.399-425
- Gleick P. 1996
- Huapaya C. (2009). Identificación de Fuentes de contaminación en la cuenca del río Rímac, Resumen Ejecutivo. Lima, MINAM.
- Huertas E., Folch M., Vergés C., Pigem J. y Salgot M. (2002), La Calidad de Agua Residual Regenerada para la Recarga de Acuíferos. Universidad de Barcelona. INEI (2014)
- INRENA (1994). Cuenca del Rímac. Diagnóstico de la calidad de aguas, vertiente del Pacífico. Lima, Ministerio de Agricultura.
- IPCC, 2007. Cambio Climático 2007: Informe de síntesis. Ginebra, IPCC.
- IUCN, PNUMA & WWF (1991) "Cuidar la Tierra" Estrategia para el futuro de la vida.
- Jhonson T. (2001). Recycled Water for Groundwater Recharge, WRD California.
- Lancker, E., Nijkamp, P. (2000). A policy scenario analysis of sustainable agricultural development options: a case study for Nepal. Impact Assess. Project Appraisal 18 (2), 111–124.
- Leviston Z, Blair E. Nancarrow, David I. Tucker & Natasha B. Porter. Predicting Community Behaviour: Indirect Potable Reuse of Wastewater through Managed Aquifer Recharge. Australia, CSIRO Land and Water Science Report 2006.
- Latouche Serge, (2003). Sustainable Development as a Paradox, Plenary Session II, University of Paris.
- LIWA (2014). <http://www.lima-water.de/es/lima.html>. Accesado: 26/06/15: 10:19 pm
- Martínez A. (2007). Conglomerado de Lima Metropolitana en Cimentaciones. Lima, Conferencia Internacional de Ingeniería Sísmica, universidad Nacional de Ingeniería.
- McMahon G. F. y J. R. Mrozek (2012). The Logic of Sustainability. World Environmental and Water Resources Congress 2012: Crossing Boundaries © ASCE 2012 2873
- Meadows D. H. Meadows D.L. Randers J. y Behrens III W. (1972). The Limits to Growth. Boston MIT.
- Ministerio de Energía y Minas (2009). Agua, Energía y el Cambio Climático en Lima Metropolitana: Oportunidades de Mitigación y Adaptación. Lima, MINEM.
- Mitchell, V., (2006). Applying integrated urban water management concepts: a review of Australian experience. Environ. Manag. 37 (5), 589–605.
- Nieto, P., Brissaud, F., Mottier, V. (1994). Depuración natural de ARU mediante su Infiltración controlada. Un paso más. Parte II. Resultados obtenidos. Boletín Geológico y Minero. Vol. 105-3. A o 1994.

- Nippon Koei Co. LTD (2001). Supplemental investigation on water use and loss in rímac Basin. Volumen IV, JICA (Japan International Cooperation Agency)
- ONU (2015). Water for a Sustainable World. United Nations Educational (UNESCO), Paris. Scientific and Cultural Organization.
- Ordoñez J. (2011) Cartilla Técnica: Agua Subterránea y Acuíferos. Sociedad Geográfica de Lima, Lima.
- Papa Francisco (2015). Encíclica Laudato Si (El cuidado de la casa común). Roma, Vaticano (p.25)
- PNUMA (1989) Glosario de términos sobre el medio ambiente
- PNUMA (2002). Perspectivas del Medio Ambiente Mundial 2002, GEO-3.Londres, Earthscan Publications Ltd
- Quintana, J. y Tovar, J. (2002). Evaluación del acuífero de Lima (Perú) y medidas correctoras para contrarrestar la sobreexplotación. Boletín Geológico y Minero, 113 (3): 303-312, ISSN: 0366-0176
- Redclift Michael (1992) the Meaning of Sustainable Development, Geoforum, Vol. 23. No3 pp 395-403, Gran Bretaña
- Reig P. Maddocks A. & Gassert F. (2013). World's 36 Most Water-Estrésed Countries, World Resource Institute, accesado el 17/10/2015.
- Riveros J.C. Germaná C. Alvarez C. (2015). Un Frágil Ciclo de Agua. Perú, WWF.
- Rojas R, Montoya M, Mamani E, Maguiña J, Montoya E. y Churasacari T, (2013). Origen de los Manantiales de la Costa Verde. Encuentro Científico internacional. Lima, Guzlop editoras.
- Salgot, M. (2001). Hygienic aspects of DESAR: water circuits. Chapter 24 in Decentralised Sanitation and Reuse: concepts, systems and implementation. P. Lens, G. Zeeman and G. Lettinga (eds.). IWA, London.
- Secretaría General de la Comunidad Andina, Instituto de Investigación para el Desarrollo, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Oficina Regional para América Latina y el Caribe y la Agencia Española de Cooperación Internacional (2007). Typographics E.I.R.L., Lima.
- SEDAPAL (2014). Plan Maestro optimizado 2015-2044. Lima.
- SEDAPAL (2014). Plan Maestro de los Sistemas de Agua Potable y Alcantarillado, Junio 2014, Gerencia de desarrollo e investigación, Gerencia de Desarrollo e investigación SEDAPAL.
- Seifert R. (2009). Análisis de la situación del agua (cantidad y residual) en Lima Metropolitana, Proyecto LIWa/Zirn-SEDAPAL.
- SENAMHI (2010). Escenarios climáticos en el Perú para el año 2030. Lima, Centro de Predicción Numérica. Lima, Omega representaciones y Servicios S.R.L.
- Shiklomanov's I. (1993). Chapter "World fresh water resources" in Peter H. Gleick (editor), Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources (Oxford University Press, New York).
- SUNASS (2010) Estudio Tarifario. Lima.
- SUNASS (2015) Estudio Tarifario. Lima.
- The Nature Conservancy (2014).Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. Elsevier.
- TRAGSA (2014). Técnicas de Recarga Artificial de Acuíferos: Aplicación en entornos Mediterráneos. Universidad de Málaga.

- 2030 The Water Resources Group (2012). Background, Impact and the Way Forward. Briefing report prepared for the World Economic Forum. Switzerland: Davos-Klosters
- UNESCO (2003). La Crisis Mundial del Agua;
- UNFPA (United Nation Fund for Population Assessment (2007). State of world population: Unleashing the Potential of Urban Growth.
- UN (United Nations) (2014). Department of Economics and Social Affairs. World Urbanization Prospects The 2014, Revision. <http://esa.un.org/unpd/wup/Highlights/WUP2014-Highlights.pdf>
- UN (United Nations) (2013). Water Scarcity.
- Urooj Q. Amjad, Edema Ojomo, Kristen Downs, Ryan Cronk, and Jamie Bartram (2015) Rethinking Sustainability, Scaling Up, and Enabling Environment: A Framework for Their Implementation in Drinking Water Supply, Academic Editor: Marc Henry www.mdpi.com/journal/water
- US National Research Council (1994). Ground Water Recharge using waters of impaired quality. Washington, DC, USA: National Academy Press.
- Wiek A, Larson K. (2012). Water, People, and Sustainability: A Systems Framework for Analyzing and Assessing Water Governance Regimes. Published online: 1 June 2012, # Springer Science And Business Media B.V. 2012 Water Resource Manage (2012) 26:3153–3171, DOI 10.1007/s11269-012-0065-6
- World Commission on Environment and Development (1987). Our common future (Informe Brundtland) . Oxford, UK:Oxford University Press.
- Zhang X, Zhao Xuan (2012) Ecotoxicity Assessment of Artificial Groundwater Recharge with Reclaimed Water: A Pilot-Scale Study. New York, Springer Science+Business Media.