

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO MANEJO DE RECURSOS FORESTALES

**EFFECTO DEL RIEGO CON AGUAS SERVIDAS TRATADAS EN
ESPECIES VEGETALES ORNAMENTALES**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniero Forestal

EUGENIO ANTONIO BASTÍAS CANTUARIAS

Calificaciones:

Prof. Guía Sra. Matilde López Muñoz	6,0
Prof. Consejero Sr. Mario Gallardo	5,8
Prof. Consejero Sr. Pedro Gutiérrez	5,2

SANTIAGO – CHILE

2004

De las grandes cuestiones económicas que afectan a Chile, yo he reconocido siempre dos de un orden superior a todas las demás; éstas son la emigración y la cuestión de bosques, con una grave diferencia, empero, a favor de la última: y es la de la que si aquélla es un negocio vital de regeneración, de mejoramiento, de porvenir, la cuestión de bosques es un asunto palpitante de conservación, de existencia, de actualidad, de eminente urgencia. La una puede esperar los siglos. Para la otra cada año perdido es un desastre.

Benjamín Vicuña Mackenna.

“La Cuestión de Bosques en Chile y Francia”, Luxeil-les-Bains, Francia, junio de 1870.

¡Silencio!, que va a nacer un árbol.

Vicente Huidobro.

Agradecimientos

A ti, espíritu viajero del tiempo.
A ti, dador de paciencia infinita.
A ti, experimentador de lo que hay entre una muerte y otra.

Al humor, por darme una herramienta para salir del paso muchas veces.
A la lectura, profunda fuente de plenitud y saber.
A la poesía, por la libertad de ser yo mismo.
A la música, por enseñarme que soy capaz de mucho más de lo que yo pueda imaginar.
A la danza, por dotarme de una potente herramienta de adaptación ante la adversidad.
A la cueca, por conocer la emoción de oírla.

Al Ballet Folklórico Antumapu, por darle cobijo a este soñador, aún después de tantos años.

Al Vivero “Leliantú” del Parque Metropolitano de Santiago y a su Jefa en 1998, por proporcionarme gratuitamente las plantas para esta memoria. Justamente, con gestos gratuitos como éste, es como progresa un país, no con más consumo. Por lo demás, sin estas delicadas actitudes, no sería posible sustentar experiencias científicas que no interesan a una sociedad más contaminada de farándula que de aguas servidas.

A mi profesora guía, por confirmar con su existir que es mejor ser optimista, y porque no ha olvidado que entre sus deberes de maestra se halla el inculcar la dignidad.

A mis padres, por la oportunidad de vivir estas extrañas circunstancias que llamamos vida;
por su calidad humana, que intento reproducir en mi caminar;
por su más que anómala paciencia para con este inconsciente hijo.

A la dama que por siglos me buscara,
por darle sentido y complemento a mi condición de hombre atípico.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	3
SUMMARY	4
1 INTRODUCCIÓN	5
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 El agua como recurso y sus diversas demandas	7
2.2 Balance entre disponibilidad-oportunidad y demanda de agua	8
2.3 Legislación y administración del agua	9
2.4 Valoración económica, social y ambiental del agua	10
2.5 Las aguas servidas y el suministro de nitrógeno	11
2.6 Las aguas servidas y el riego en la zona poniente de Santiago	14
2.7 Áreas verdes en Santiago de Chile	15
3 OBJETIVO	18
3.1 Objetivo General	18
3.2 Objetivos Específicos	18
4 MATERIAL Y MÉTODO	18
4.1 Generalidades	18
4.2 Material	18
4.2.1 Tratamiento de aguas en Planta Santiago Poniente	18
4.2.1.1 Planta elevadora	19
4.2.1.2 Planta de tratamiento	19
4.2.2 Características del terreno	19
4.2.3 Agua empleada en el riego	19
4.2.4 Especies vegetales	20

	Página
4.3 Método	20
4.3.1 Preparación del terreno	20
4.3.2 Características de los ejemplares	20
4.3.3 Plantación de los ejemplares	21
4.3.4 Riego	21
4.3.5 Atributos a medir	21
4.3.5.1 Medición de diámetro	21
4.3.5.2 Muestreo foliar	22
4.3.6 Diseño del experimento	22
4.3.7 Caracterización fenológica	22
5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
6 CONCLUSIONES	36
7 BIBLIOGRAFÍA	37

ANEXOS

APÉNDICE

RESUMEN

Se estableció un ensayo en la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas Santiago Poniente, en la Región Metropolitana de Santiago. El ensayo consistió en regar con aguas servidas tratadas durante un año, ejemplares de dos especies arbóreas y una arbustiva de interés ornamental en programas de forestación urbana, sometiendo al grupo control a riego con agua potabilizada mediante cloración, y proveniente de un pozo profundo. Las especies utilizadas en el ensayo fueron: *Cassia closiana* (“quebracho”), *Casuarina stricta* (“casuarina”) y *Schinus molle* (“pimiento boliviano”).

Al término del ensayo, se detectaron diferencias estadísticamente no significativas en el crecimiento en diámetro de los ejemplares. En cambio, existe un efecto significativo del factor especie en el incremento del diámetro.

En cuanto al análisis estadístico de la altura, existen diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento producidas por el riego con aguas servidas tratadas. Además, sí existe un efecto significativo de la especie en el crecimiento en altura.

No obstante los anteriores resultados, los valores de los promedios de los crecimientos en diámetro y en altura experimentan aumentos relativos en el caso de los ejemplares sometidos a riego con aguas servidas tratadas.

Asimismo, se midió el contenido de nitrógeno presente en las hojas de los ejemplares sometidos al tratamiento y los del grupo control. Se concluyó que el nitrógeno disponible en las hojas de los ejemplares sometidos a los tratamientos y los del grupo control presentan leve variación entre sí.

SUMMARY

One assay was established in the “Santiago Poniente” Wastewater Treatment Facilities, at the Metropolitan Region of Santiago in Chile. This assay consisted of treated wastewater irrigation, performing it during one year. This irrigation was applied to two tree-like species and one shrub species, with ornamental significance in urban forestation programs. The control group was submitted to chlorinated potable water irrigation, which was originate in one deep well. The species utilized in this assay was: *Cassia closiana* (“Quebracho”), *Casuarina stricta* (“Casuarina”) y *Schinus molle* (“Pimiento boliviano”).

At the end of assay, no significant statistics differences were detected in the diametrical increase of the samples. In contrast, one significant effect exists in this diametrical increase connected to species factor.

With regard to the analysis for height effect, significant statistics differences was detected for the samples which was submitted to treated wastewater irrigation. Besides, one significant effect was detected in relation with the species influence over the height increase.

However, the mean values of the diametrical increases and the height increases, experiences relatives increases in the case of the samples which was submitted to treated wastewater irrigation.

Therefore, the Nitrogen contents into the all samples’s leaves in this assay was measured. It was deduced that the Nitrogen available into the samples’s leaves which was irrigated with treated wastewater, and the Nitrogen available into the samples’s leaves which was irrigated with chlorinated potable water, only showed small differences.

1 INTRODUCCIÓN

De los recursos naturales existentes, el agua es el más esencial, es el recurso fundamental para todos los procesos vitales en la naturaleza. Este recurso parece abundante a primera vista; de hecho, casi el setenta por ciento (70 %) de la superficie terrestre está cubierto por el líquido elemento (Marcoux, 1994).

La población requiere agua para usos domésticos y usos públicos, o también llamados municipales. Además el agua es usada como recurso para la producción: en agricultura, industria y servicios. Finalmente, es usada para evacuación de desechos industriales y domésticos. La creciente demanda ejercida por todos estos sectores, originada por el aumento en la eficiencia productiva y en la demanda de la población, genera un aumento competitivo intersectorial por el suministro de agua (Marcoux, 1994).

El agua cuenta con algunas particularidades que la convierten en una riqueza muy singular e importante. En primer lugar, su disponibilidad aparentemente amplia en el planeta es engañosa: el agua dulce, es decir, la única forma utilizable del agua para las necesidades humanas vitales, es la pequeña fracción representada por el 2,5 % del agua presente en el planeta. Aún más, bastante agua dulce se encuentra en la forma de hielo y nieves eternas, consideradas no renovables en una escala de tiempo de vida humana. A consecuencia de esto, se considera como renovable sólo un 0,3 % del agua dulce total disponible en el mundo (Marcoux, 1994).

Otro aspecto del agua consiste en que ésta presenta una distribución irregular en el planeta y, a menudo, no se encuentra donde es más necesaria. Se estima que dos billones de personas viven en zonas de la Tierra que están sujetas a escasez crónica de agua. Por otra parte, el agua posee discontinuidades temporales en su suministro, pero, en cambio, los usos a que es sometida, sobre todo en aspectos domésticos e industriales, requieren de un suministro constante (Marcoux, 1994).

Muchas ciudades del tercer mundo son áreas de crisis en el suministro de agua. Este problema se agudiza cuando el crecimiento urbano se basa en migraciones rurales no respaldadas por un crecimiento económico al mismo ritmo (Marcoux, 1994).

Ante esta perspectiva, la reutilización de aguas servidas para propósitos tales como el riego de parques, será una práctica cada vez más común en el futuro. No obstante, existe escasa evidencia relacionada con los impactos en la salud de la población por el uso de aguas servidas recicladas en el riego de parques de acceso público (TWRI, 1999).

El tratamiento y reciclaje de aguas servidas, por otra parte, es un factor de importancia al considerar que de esta forma se reduce la presión sobre la calidad y disponibilidad del agua, además de minimizar la descarga de aguas servidas sin tratamiento a los ríos (Homsí, 1990).

En otras palabras, el uso de efluentes de plantas de tratamiento de aguas servidas en el riego, ofrece una buena oportunidad para conservar recursos de agua. El reciclaje del agua permite contar con una alternativa de tratamiento en lugares donde el agua superficial posee una capacidad limitada para asimilar los contaminantes tales como el nitrógeno y fósforo, los que permanecen en la mayoría de las descargas de efluentes de aguas servidas tratadas (NAP, 1996).

Santiago de Chile, con una población de más de cinco millones de personas, es uno de los centros económicos emergentes de América Latina. Aunque cuenta con una completa cobertura de agua potable y alcantarillado, sólo en los últimos diez años se ha ido acrecentando el porcentaje de aguas residuales que cuentan con tratamiento. Tal situación repercute en un considerable deterioro de la calidad natural de los cauces y cuerpos de agua utilizados para la disposición de las aguas servidas. Esta contaminación produce importantes efectos negativos sobre el ambiente y, en particular, en la salud pública. Por ello, el tratamiento de las aguas servidas se ha constituido en un tema de primera prioridad en la agenda nacional. Al respecto, el Gobierno de Chile se ha planteado el objetivo de tratar una importante proporción de las aguas servidas para la primera década del siglo XXI, mediante la operación de cuatro plantas de tratamiento de aguas servidas (EMOS S.A., 1997).

Las aguas servidas tratadas en nuestra capital pueden constituirse, como ya se dijo, en un importante elemento de mitigación de presiones de demanda sobre los recursos de agua; en efecto, la utilización de este recurso reciclado, sujeto a adecuadas normas de calidad ambiental y de salud pública, puede emplearse en riego de áreas verdes urbanas y periurbanas, con la consecuente recuperación de ambientes degradados y el aumento de masas de árboles y arbustos que mejoran la calidad del suelo y del aire, acciones muy necesarias en una capital contaminada como es Santiago de Chile. Asimismo, el lodo, como subproducto de costosa disposición en el tratamiento de aguas servidas, posee interesantes cualidades fertilizantes y mejoradoras de suelos. Por su parte, dada la escasa información disponible acerca de la respuesta al riego con aguas servidas tratadas sobre las especies vegetales ornamentales, es necesario estudiar las especies adecuadas para este tipo de empleo del agua servida tratada y sus efectos colaterales en el suelo y las aguas subterráneas.

En virtud de estos antecedentes, este trabajo tiene como objetivo estudiar el efecto en el crecimiento de dos especies arbóreas y una arbustiva de interés ornamental, cuando se les somete a riego con aguas servidas tratadas en la Planta Santiago Poniente operada, hasta la fecha de término de este estudio, por Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias S.A. (EMOS S.A., 1997).

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 El agua como recurso y sus diversas demandas

La obtención de agua potable constituye uno de los desafíos más significativos en los estudios que se realizan sobre la proyección de recursos hídricos. La tabla 1 resume la demanda bruta de recursos hídricos demandados por región para los usos consuntivos de agua potable e industria, apreciándose la heterogeneidad en el consumo, fundamentalmente concentrado en las regiones V, VIII y Metropolitana.

Tabla 1. Demandas brutas de recursos hídricos para agua potable e industria.

Región	Demandas brutas		
	Agua Potable [l/s]	Industria [l/s]	Minería [l/s]
I	767	512,2	497,3
II	753	364,8	2.009,3
III	412	161,9	4.077,9
IV	756	65,2	489,7
V	3.472	1.434,0	340,1
R.M.	14.945	3.079,0	140,2
VI	1.015	291,1	3.073,0
VII	1.058	808,4	0,0
VIII	3.745	13.937,3	468,8
IX	882	141,5	0,0
X	1.035	790,5	639,2
XI	116	17,0	2.525,7
XII	313	1.160,4	77,1
Total País	29.272	22.763	14.338

Fuente: Brown, E. et al., 2000.

En la mayor parte del país la calidad de los recursos para agua potable es apta para este propósito; no obstante, las aguas son de mala calidad para el consumo en las regiones I y II, debido a la salinidad de los escasos cursos superficiales; por ello, se emplean principalmente aguas subterráneas para este fin. Además, cabe nombrar casos de contaminación natural por exceso de minerales, como la cuenca del Aconcagua, que presenta altos niveles de hierro y cobre en su parte alta, o la cuenca del Rapel, en la parte superior del río Cachapoal. Mención aparte merecen las cuencas con altos índices de contaminación de origen humano, como las del Maipo, Aconcagua y Biobío, en sus cauces aguas abajo de las descargas de residuos de grandes centros industriales y urbanizaciones, donde el tratamiento de las aguas de cauces naturales se ha hecho imprescindible. Las posibilidades de uso para agua potable se extienden a fines industriales, sin embargo los requerimientos de calidad dependen del tipo de industria (Brown et al., 2000).

El hecho de que exista una disponibilidad de agua de buena calidad para su utilización en el consumo humano, disminuye los costos de tratamiento de las aguas, los que están más orientados a la sedimentación de sólidos suspendidos en forma natural que al tratamiento bioquímico. Sin embargo, el

aumento de la demanda de la población hará que se recurra a fuentes de agua actualmente contaminadas, motivando la construcción de nuevas plantas de tratamiento. En resumen, actualmente la obtención de recursos para agua potable es poco costosa por su relativa abundancia, dependiendo de la disponibilidad en cada zona del país, aunque con el aumento de la demanda adquirirá un valor adicional por su escasez y se deberá implementar infraestructura de tratamiento más completa y eficiente (Brown et al., 2000).

2.2 Balance entre disponibilidad - oportunidad y demanda de agua

Las condiciones hidrometeorológicas transforman a algunas zonas de Chile en blanco frecuente de sequías. Se han distinguido tres tipos de sequía, obedeciendo al tipo de demanda: agrícola, si no hay disponibilidad de agua en las raíces de las plantas; meteorológica, si hay déficit de precipitaciones; e hidrológica, si hay déficit de caudales en los ríos. Estas últimas dos presentan una relación directa que se manifiesta, sin embargo, con un retardo entre ellas.

Los déficit de agua se presentan en forma distinta según la oferta y demanda involucradas. En el caso de la oferta, ésta puede provenir de regímenes pluvial, nival, glacial o mixto. Según la descripción de la disponibilidad de recursos hídricos en Chile, los regímenes pluviales presentan un máximo en cierta temporada del año, dependiendo de la zona que se estudie. Los nivales presentan mínimos en invierno y máximos en primavera y verano. Los glaciales son similares a los nivales pero con un poco de retraso. Las demandas, en tanto, son principalmente el regadío, con valores muy pequeños en invierno y máximos en verano, la generación hidroeléctrica, con máximos en otoño e invierno, y el abastecimiento urbano, con un máximo también en verano.

Las combinaciones de estas ofertas y demandas originan distintos tipos de déficit, considerando la naturaleza de las variables involucradas. La tabla 2 muestra estos tipos de sequías y señala su frecuencia. Debe notarse que el análisis está realizado en la zona de Chile Central y al extremo norte del Sistema Pacífico Sur, ya que en ella se concentran las demandas de riego, generación hidroeléctrica y abastecimiento urbano más importantes del país.

Tabla 2. Tipos de déficit de agua y su frecuencia en Chile.

Oferta (Régimen Fluvial)	Demanda	Temporada de sequías	Frecuencia
Pluvial	Regadío Hidroeléctricas Abast. Urbano	Verano Otoño Verano	Frecuentes Esporádicas Frecuentes
Nival/Glacial	Regadío Hidroeléctricas Abast. Urbano	Fines de verano Invierno Otoño / Primavera	Esporádicas Frecuentes Esporádicas

Fuente: Brown, E. et al., 2000.

La región más crítica en la que se manifiestan estos déficit está ubicada en la zona de transición climática, entre los 30° y 42° de latitud sur. Sin embargo, entre los 33° y 35° interviene el efecto regulador de los glaciares, y entre los 39° y 42° ocurre una situación análoga con los importantes lagos. En estos casos, las condiciones de sequía llevan a los caudales a valores de alrededor de un 60% del caudal normal, llegando a un 30% en el resto de las zonas.

Con esto, las zonas más desfavorecidas son las comprendidas entre los 30° y 33°, correspondientes a las regiones IV, V y Metropolitana, y entre los 35° y 39°, correspondientes a las regiones VII, VIII y IX. Para combatir estas circunstancias, se han construido numerosos embalses en estas zonas, con el fin de regular el agua disponible para riego y acumular agua con fines de generación hidroeléctrica y abastecimiento de la población. Incluso, en aquellas zonas de secano de la VIII y IX regiones, se han desarrollado planes de riego con el fin de salvaguardar el desarrollo de la agricultura frente a las variaciones de la disponibilidad de recursos (Brown et al., 2000).

2.3 Legislación y administración del agua

En Chile, el Código de Aguas, vigente desde 1981, establece las formas de administración del agua, habiéndose realizado la última revisión en 1996. Según estas disposiciones, las aguas son bienes nacionales de uso público y se otorga a particulares el derecho de aprovechamiento de ellas, el cual es un derecho real de dominio de su titular, quien puede usar y disponer libremente de él (Brown et al., 2000). En la práctica, esto ha implicado logros, pero también múltiples inconvenientes, debido, justamente, a que los derechos de propiedad han sido definidos como privados, exclusivos y enajenables, para que sus dueños puedan intercambiarlos libremente a través de mecanismos de mercado. Por lo tanto, la legislación ha olvidado considerar el agua como un bien social y ecológicamente valioso (López, 2002)

El rol regulador y normativo del Estado está centralizado en el organismo denominado Dirección General de Aguas, un servicio dependiente del Ministerio de Obras Públicas. Entre sus principales funciones y atribuciones están: planificar el desarrollo del recurso, otorgar los derechos de aprovechamiento de aguas e investigar y medir el recurso a través de la mantención de un sistema hidrométrico nacional de información.

Se han propuesto algunas modificaciones al Código de Aguas, de modo de fortalecer algunas funciones de la Dirección General de Aguas y propender a un uso más eficiente y equitativo del recurso. Entre estas iniciativas, la creación de Corporaciones de Cuencas estuvo presente en el proyecto original de modificaciones al Código de Aguas de 1992, pero fue eliminada en esa ocasión. En agosto de 1997 una comisión especial de la Cámara de Diputados aprobó esta iniciativa, sin embargo, el Tribunal Constitucional emitió una resolución con observaciones al proyecto. Desde esa fecha, el proyecto está en la Comisión de Constitución del Senado y requiere una indicación modificatoria que incluya la creación

de Corporaciones o una ley especial de Corporaciones de Cuenca (López, 2002). Asimismo, la institucionalidad del agua en Chile no está configurada de manera tal que propenda a una gestión integrada de los recursos agua, suelo, vegetación y medio ambiente asociado (Brown et al., 2000). En este sentido, y puesto que no ha habido una política de Estado claramente definida para la protección y el uso racional de los recursos hídricos, son los pobres quienes continúan siendo los que más sufren los costos del daño ambiental en todos los niveles (López, 2002).

Por otra parte, todas las formas de administración existentes están contenidas en la estructura nacional; tampoco existe una administración internacional en las cuencas compartidas con otros países. Esto ha generado algunos conflictos en la zona de mayor escasez del recurso, en las regiones I y II, donde existen ríos que nacen en Bolivia y van a desaguar a Chile, o viceversa (Brown et al., 2000).

Los tipos de organizaciones de usuarios de agua definidos en la Ley son:

- **Juntas de Vigilancia:** es una organización de usuarios que aprovechan aguas de una misma corriente superficial, con el fin de administrar y distribuir las aguas sobre las cuales sus miembros tengan derechos; además, pueden explotar y conservar las obras de aprovechamiento común, entre otros fines. Como sus atribuciones giran en torno a los cauces naturales, también tienen funciones como la declaración de escasez de los recursos, pudiendo reasignar las aguas según lo estime su Directorio.
- **Asociaciones de Canalistas:** grupos de usuarios que son responsables de la administración de la infraestructura primaria constituida por embalses y canales. Estos organismos poseen personalidad jurídica.
- **Comunidades de Aguas:** idénticas a las anteriores, aún cuando no tienen personalidad jurídica.
- **Comunidades de Obras de Drenaje:** constituye el grupo de usuarios que aprovechan obras de drenaje o desagüe en beneficio común.

2.4 Valoración económica, social y ambiental del agua

La falta de valoración económica del agua y, con mucha frecuencia, su inadecuada valoración social, ocasiona un aprovechamiento ineficiente del recurso que estimula usos abusivos, los cuales, a su vez, hacen que la población sufra escasez o falta de servicios. En consecuencia, se requiere una adecuada valoración económica, social y ambiental para garantizar mecanismos sociales y solidarios, y la implementación de un marco legal que establezca precios e incentivos para asegurar que toda la población tenga acceso al uso del agua o a sus servicios.

Para lograr una asignación eficiente de usos –actividad esencial para el manejo integrado de los recursos hídricos- se requieren las siguientes acciones: emplear criterios económicos, sociales y ambientales; definir cada uso del agua sobre la base de criterios comparables de eficiencia económica, social y ambiental;

analizar la implementación –cuando resulte posible- de sistemas apropiados de mercado de agua como instrumentos para lograr una asignación eficiente de los recursos hídricos (GWP, 2000).

Los diferentes usos del agua requieren sistemas tarifarios que permitan el financiamiento de inversiones, de costos de operación y mantenimiento y la obtención de un retorno sobre el capital, basados en criterios de eficiencia y sustentabilidad, toda vez que sea posible. Se estima que las siguientes acciones son pertinentes para este propósito: aplicar mediciones al consumo; una adecuada asignación y diferenciación de la demanda; determinar las tarifas del agua usando instrumentos regulatorios que favorezcan la eficiencia, en condiciones monopólicas por naturaleza; desarrollar sistemas tarifarios para servicios de riego que permitan la operación y mantenimiento de la infraestructura involucrada, revisando periódicamente las tarifas para posibilitar una constante superación de los niveles de eficiencia de los usos y servicios del agua; desarrollar e implementar el principio: “el que contamina paga”, en base a la calidad de las descargas, la capacidad de auto depuración de los cuerpos de agua, otros usos y servicios e impactos ambientales (GWP, 2000).

Existen avances en los indicadores de crecimiento de cobertura y mejoramiento de eficiencia respecto del agua potable. Sin embargo, sigue manteniéndose un considerable déficit en cuanto a la satisfacción de los requerimientos básicos de saneamiento de la población.

El mejoramiento en la eficiencia implica el logro de costos competitivos que permitan a los usuarios acceder al agua y a los servicios sanitarios. En este sentido, algunas acciones identificadas para revertir los usos ineficientes del agua, tanto respecto de las inversiones como de la operación, son: priorizar los proyectos multipropósito; promover la participación de todos los interesados en los proyectos desde las primeras etapas de pre-inversión; garantizar la incorporación de las variables ambientales a través de la generalización de las Evaluaciones de Impacto Ambiental (E.I.A.); promover programas de recuperación y reuso del agua; desarrollar programas de rehabilitación y optimización de la infraestructura existente y, finalmente, promover el empleo de tecnologías apropiadas (GWP, 2000).

2.5 Las aguas servidas tratadas y el suministro de nitrógeno

Aunque el nitrógeno comprende el 78% de la atmósfera, en esta forma química no es asimilable por las plantas, excepto por aquéllas que tienen la capacidad de llevar a cabo su fijación biológica, pues, a diferencia de otros nutrientes, el nitrógeno no se encuentra en las rocas. El nitrógeno natural de los suelos está compuesto por una fracción orgánica superior al 90% y por otra fracción mineral o nitrógeno no disponible (Binkley, 1993). La producción de nitrógeno mineral, en un período dado, depende de las condiciones climáticas y de las características físicas y químicas propias de los suelos, esto es, la temperatura ambiental, la humedad del suelo, el contenido de nitrógeno y la relación carbono/nitrógeno (C/N) de los residuos incorporados al suelo. En los períodos de bajas temperaturas y fluctuaciones

extremas de humedad, las tasas de producción de nitrógeno se ven fuertemente reducidas (Wood, 1994). Las fuentes primarias de este elemento para los ecosistemas terrestres son los iones amonio y nitrato (NH_4^+ y NO_3^-), que están disueltos en el agua de lluvia, y la fijación biológica del nitrógeno que realizan los microorganismos. Ocasionalmente, otra fuente de suministro la constituyen ciertas formas orgánicas como ácidos aminados (Binkley, 1993; Wood, 1994).

El nitrógeno cumple importantes funciones estructurales y funcionales en las células. Forma parte de las unidades que componen las proteínas y los ácidos nucleicos, además, es un elemento muy similar al carbono, por lo que se asocia con facilidad a las cadenas orgánicas al sustituir al carbono. Funcionalmente, participa en gran variedad de reacciones químicas dentro de la célula, entre ellas, la fotosíntesis y la respiración.

El nivel de nitrógeno total en el suelo en los primeros 20 cm es variable, fluctuando entre 0.08 - 0.4% en base peso seco de nitrógeno total. Para suelos minerales de zonas templadas el porcentaje varía entre 0.12 - 0.15%. De la fracción orgánica, un 20 - 40% del nitrógeno total corresponde a aminoácidos, 5 - 10% a amino azúcares y las bases púricas y pirimídicas no exceden el 1% (Wood, 1994).

El contenido de nitrógeno de las plantas varía de acuerdo a los tejidos. Generalmente, el follaje contiene 0,9 a 2,0% de nitrógeno, mientras que la madera tiene menos del 0,5%. La inmovilización de nitrógeno ocurre de manera significativa durante el período inicial de descomposición, cuando se entregan al suelo residuos con alto contenido de carbono. En este período y por regla general, la fertilización con nitrógeno aumenta el crecimiento de los bosques (Binkley, 1993).

Los componentes en que el nitrógeno se presenta usualmente en las aguas servidas son: el nitrógeno orgánico, el amoniaco y el nitrato, así como también el agua residual puede contener pequeñas concentraciones de nitrito. La proporción relativa de estos elementos varía según el origen del agua servida y los tratamientos a que ha sido sometida. El amoniaco es el compuesto predominante en la mayoría de los casos, oscilando su concentración entre 5-40 mg N/l. La fracción de nitrógeno orgánico, sea en forma soluble o en pequeñas partículas, abarca una mezcla compleja de compuestos como aminoácidos, azúcares aminados y proteínas. Todas estas sustancias son fácilmente convertibles en amoniaco por los microorganismos que existen en las aguas servidas o en el suelo, siendo en el suelo mucho más rápida esta conversión. El nitrógeno orgánico es menos de la mitad del total del nitrógeno del agua servida, salvo en el caso de aguas provenientes de la industria de los alimentos. Por su parte, las concentraciones de nitratos pueden variar entre 0-30 mg N/l (Mujeriego, 1990).

Desde el punto de vista de la salud pública, la posibilidad que el agua de consumo público se contamine con nitratos, desencadenaría un aumento en el riesgo de contraer enfermedades como la *metamoglobinemia* entre la población infantil. En los Estados Unidos, el Servicio de Salud Pública estima un monto máximo permisible para los nitratos de 10 mg/l $\text{NO}_3\text{-N}$ en las aguas para bebida. (Mujeriego,

1990). Este límite en Chile llega a 50 mg/l NO₃-N (INN, 1993). El riesgo de contraer esta enfermedad se basa en que los nitratos, en el estómago de los niños de menos de seis meses de edad, son reducidos a nitritos, los cuales, una vez presentes en el torrente sanguíneo, pueden combinarse con la hemoglobina, reduciendo su capacidad de transporte de oxígeno. Sin embargo, aparte del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas que los nitratos pueden provocar, debe destacarse el gran interés que tiene el reciclar la mayor parte del nitrógeno contenido en el agua servida, por ser éste un nutriente esencial para la producción de alimentos y fibras. En este sentido, la reutilización del nitrógeno representa una forma de conservación de la energía (Mujeriego, 1990).

Un buen ejemplo de los impactos del riego con aguas tratadas en los suelos forestales, son experimentos llevados a cabo en el bosque Pack de la Universidad de Washington. En un estudio, se aplicaron aguas tratadas municipales a rodales que mostraban las siguientes características: ausencia de vegetación, esquejes de *Populus sp.* (álamo), plántulas de *Pseudotsuga menziesii* (abeto de Douglas) y pasto. Las aguas servidas se aplicaron en una proporción de 5 cm/semana. Su retención varió ampliamente entre los tipos de vegetación al segundo año de riego. El rodal sin cultivar retuvo sólo el 35% de los 400 Kg de N/ha que se aplicaron; la mayor parte del nitrógeno se oxidó en nitrato y se lixivió más allá de los 180 cm de profundidad del suelo. El proceso de desnitrificación probablemente eliminó una cantidad adicional no medida. El rodal de *Populus sp.* retuvo el 95% del nitrógeno aplicado y se lixivió una menor cantidad de nitrato que el que se incorporó a las aguas tratadas. En el rodal de *Pseudotsuga menziesii*, las plántulas retuvieron casi el 85% del nitrógeno aplicado. El rodal de pasto acumuló mucho menos nitrógeno en su biomasa y retuvo sólo el 75% del nitrógeno aplicado (Binkley, 1993).

Un aspecto importante en el riego de aguas tratadas es la lixiviación de nutrientes a través del suelo. En los estudios citados, la vegetación tuvo el mayor efecto sobre las concentraciones de nitrato del suelo lixiviado, a una profundidad de 180 cm: 13 mg de NO₃-N/L para el rodal con ausencia de vegetación; 0,5 mg/L para el de *Populus sp.*; 2,3 mg/L para el de *Pseudotsuga menziesii* y 4,3 mg/L para el de pasto. En este experimento, sólo el rodal vacío mostró en promedio concentraciones de nitrato mayores que el estándar máximo para consumo humano, el que llega a 10 mg de NO₃-N/L.

En otros estudios se han obtenido resultados similares; las pérdidas de nitrato por lixiviación son por lo general bajas, pero en los casos donde existen altas tasas de aplicación o la cubierta vegetal es pobre, las tasas pueden ser altamente inaceptables (Binkley, 1993).

Los investigadores de la U. de Washington también han encontrado que las aguas tratadas estimulan el crecimiento en una forma mucho mejor que el agua de los ríos. Después de cuatro años, los ejemplares de *Populus sp.* sometidos a riego con aguas servidas tratadas, promediaron 70 mg/ha de biomasa, comparados con 7 mg/ha utilizando el riego con agua de río. La biomasa de *Pseudotsuga menziesii*, en los mismos tratamientos, fue de 34 y 8 mg/ha, mientras que la de los rodales de pasto fue de

40 y 8 mg/ha. Se han observado incrementos similares en la producción de biomasa de los órganos vegetales aéreos en todos los estudios de riego de aguas tratadas en los bosques (Binkley, 1993).

2.6 Las aguas servidas y el riego en la zona poniente de Santiago

La zona poniente de la Región Metropolitana más próxima a la ciudad de Santiago, conformada primordialmente por las comunas de Quilicura, Renca, Cerro Navia, Lo Prado, Pudahuel y Maipú y caracterizada por contener sectores rurales en transición a urbanos, recibía un suministro de aguas servidas en un monto de 10 m³/s proveniente del río Mapocho y del Zanjón de la Aguada, principalmente. Estas áreas constituían grandes sectores de cultivos para consumo humano, fundamentalmente dedicados a hortalizas. La utilización de estas aguas servidas para riego ha incidido directamente, durante muchos años, en la proliferación de enfermedades que tienen relación con la presencia en el agua de agentes patógenos generadores de enfermedades intestinales, tales como, disentería, fiebre tifoidea, paratifo y otras. Cada año se producen cerca de 7.000 casos de paratifo y fiebre tofoidea, 8.000 de hepatitis y 700.000 casos de diarreas agudas en niños de corta edad. Cerca del 60% de los casos ocurre en la población laboralmente activa, esto es, entre los 16 y 65 años de edad, por lo cual, un alto porcentaje de las camas hospitalarias está ocupado por pacientes con patologías entéricas, con la consiguiente pérdida en productividad (Sanhueza, 1998).

Los riesgos financieros para el ámbito productivo son también muy altos. La fruticultura es vital para el país, en consecuencia, es muy importante cumplir con las normas internacionales de calidad asociadas a la producción limpia y a la utilización de insumos que no ejerzan efectos contaminantes.

Una planta de tratamiento de aguas servidas construida por la Empresa Metropolitana de Obras Sanitarias en 1993, en la zona poniente de Santiago, fue el primer paso hacia la depuración del total del volumen de aguas servidas que produce la capital (Sanhueza, 1998).

Además del impacto que provocan las aguas servidas en lo económico y en la salud de la población, está también la disminución en la calidad del ambiente a través de la contaminación de los cuerpos de agua y consiguiente deterioro de las condiciones de vida de la flora y la fauna que utilizan ambientes terrestres, aéreos y acuáticos; la emanación de olores desagradables; la contaminación de los suelos mediante infiltraciones de excesivas concentraciones de elementos químicos como el nitrógeno, fósforo, boro, hierro, carbono y otros; el aumento en la probabilidad de difusión de agentes patógenos a través de vectores como insectos y aves. Asimismo, podemos identificar como un efecto no deseado de las aguas servidas el deterioro en la calidad estética del paisaje por turbiedad en las aguas, cambios de color, sabor, aroma, presencia de espumas y grasas.

Frente a esto, las aguas servidas tratadas pueden constituir un importante recurso para el riego de cultivos, particularmente en áreas donde el agua es escasa o de alto valor. Puede ser la única o principal

fuentes de agua de riego debido al rápido desarrollo urbano, el cual genera aumentos en las descargas de alcantarillas a ríos y canales, es decir, a las principales fuentes de agua para riego. En consecuencia, es necesario un estudio específico que evalúe los efectos de las aguas residuales tratadas sobre diferentes suelos y cultivos para determinar las consecuencias sanitarias de los elementos y compuestos químicos contenidos en dichas aguas (Zapico, 2001).

La utilización de aguas residuales tratadas para el riego muestra ventajas y desventajas, ya que puede proveer de recursos de bajo costo económico en función de su uso y, probablemente, reducir la cantidad de fertilizante empleado. Sin embargo, su nivel de contaminación depende del origen y tratamiento de esta agua, ya sea por altas concentraciones de sales, metales pesados, virus y/o bacterias (Zapico, 2001). En relación a las ventajas, se tiene: disponibilidad de agua debida al flujo regular que dispensan los efluentes del tratamiento de aguas residuales; el aporte de nutrientes, que reduce o elimina la fertilización con abonos químicos y disminuye hasta en 50% el costo de producción. Se agrega a esta última ventaja, la presencia de oligoelementos, la cual puede mejorar suelos deficientes en Zinc y otros elementos que se corrigen usando esta agua (Zapico, 2001).

En definitiva, el tratamiento de las aguas servidas es una medida de protección de los recursos de agua potable, dado que alivia la presión que ejerce la población sobre los cuerpos de agua superficiales o subterráneos, pudiendo utilizar las aguas servidas tratadas en el riego de ciertos cultivos, en parques y en jardines, aplicando normas de calidad decretadas por la autoridad sanitaria.

2.7 Áreas verdes en Santiago de Chile

La ciudad de Santiago cuenta con un área intercomunal de 213.014 ha y un patrimonio de 5.311 ha de áreas verdes, siendo esta última cifra un 2,5% del área intercomunal y un 8% del área urbana consolidada de la ciudad, la cual llega a 63.480 ha (MINVU, 1994). Por otra parte, según el documento “Registro de hábitats del Área Metropolitana de Santiago”, elaborado gracias a un proyecto financiado por el Fondo Darwin, la superficie total de áreas verdes alcanza a 11.790 ha, distribuidas en 825 sitios de potenciales parques naturales. Según otros cálculos, basados en el estudio antes mencionado, la superficie llega a 9.636 ha, desglosadas en 166 sitios, separando las áreas verdes de acuerdo a su interés metropolitano, intercomunal, comunal y vecinal (MINVU, 1999).

En el área intercomunal existen 2.686 ha de parques, plazas y bandejones de propiedad pública, con un 51% del total de estas áreas; por su parte, existen 2.625 ha de propiedad privada, llegando al 49% del total de áreas verdes. Estas cifras determinan un estándar de 9,8 m²/habitante para toda el área intercomunal que incluye las áreas verdes públicas y privadas, variando entre 0,6-16 m²/habitante entre municipios, sin incluir el Parque Metropolitano de Santiago.(MINVU, 1994).

La comuna con mayor superficie de áreas verdes públicas y privadas es Puente Alto, con 709 ha totales y 28 m²/habitante. Le sigue Peñalolén, con 471 ha y 26 m²/habitante; luego Las Condes, con 348 ha y 17 m²/habitante. La comuna con menor superficie de áreas verdes es Cerrillos, llegando sólo a 10 ha y 1,5 m²/habitante (MINVU, 1994).

En cuanto a superficie por habitante, se encuentra en primer lugar Lo Barnechea, con 35 m²/habitante, seguida de Puente alto, con 28 m²/habitante y Vitacura, con 27 m²/habitante. La comuna con menor superficie por persona es El Bosque, alcanzando sólo a 1,3 m²/habitante. El promedio de área verde pública por persona es de 4,2 m²/habitante (MINVU, 1994).

En general, todas las comunas presentan un porcentaje de áreas verdes con mantenimiento entre 80-99,6%, exceptuando la comuna de Lo Espejo, que alcanza el 52%. Hasta el año 1999, se construían áreas verdes a un ritmo promedio de 29 ha por año. La tipología de cobertura se distribuye de la siguiente manera: 40% césped, 26% tierra, 19% cubierta de plantas y 6% con pavimento. Asimismo, existe un 27% de áreas verdes de la intercomuna en mal estado y un 11% de terrenos eriazos. Las comunas con áreas verdes en peor estado de conservación son: Huechuraba, La Pintana, Lo Prado, Quilicura, Cerro Navia y La Granja (MINVU, 1994).

En términos cualitativos, las áreas verdes son entes multifuncionales, puesto que contribuyen a la calidad del entorno urbano, poseen un papel socializador, proveen de esparcimiento y recreación, cumplen un rol simbólico y estructuran el espacio y el ambiente natural inserto en el área urbana. En estas funciones, son las plazas las que asumen mayor importancia, seguidas de los parques y los bandejones. Sin embargo, los parques irradian un área de influencia mayor que la de sus propios límites, purificando el aire, impidiendo la propagación de ruidos molestos y reteniendo las partículas de polvo en suspensión mediante su masa foliar.

En cuanto a la gestión de los municipios respecto de sus áreas verdes, el panorama es variado en relación a los recursos que los organismos edilicios destinan a la administración de dichas áreas. Así, los porcentajes de los presupuestos destinados a la mantención de áreas verdes varía entre 0,1-13,2% del total de los recursos municipales. En cuanto a las inversiones en nuevos proyectos, las proporciones son aún más bajas, pues están entre el 0,01-0,1% de dicho total. El caso atípico lo constituyó Providencia, con un 2,8% del presupuesto municipal (MINVU, 1994).

Entre los inconvenientes que presenta el modelo actual de manejo de áreas verdes por parte de los municipios, están las rigideces que presentan las licitaciones, la participación y la coordinación. A través de la delegación de funciones que implica la licitación a contratistas privados, se han enfrentado diversos escollos provenientes de las bases usadas para licitar, las cuales provienen del Ministerio de Obras Públicas y son, por tanto, aplicadas a obras de construcción. Esto ha significado obviar las características intrínsecas de las especies vegetales con que se trabaja, particularidades que las bases no formulan. Esto

incide en la elección de especies no aptas para el clima y los suelos de Santiago, por ejemplo, el césped inglés; al mismo tiempo, existe insuficiencia de personal técnico que supervise y evalúe el trabajo de los contratistas; hay falta de coordinación entre los municipios y entre éstos y las empresas públicas, las que suelen provocar la destrucción de áreas verdes recién instaladas para ejecutar obras viales, ductos, matrices y otras; por su parte, existe escasa participación de la comunidad organizada, tampoco hay una planificación adecuada basada en información oportuna y confiable que asegure la continuidad de las inversiones. Finalmente, la comunidad no dispone de mecanismos que permitan hacer llegar su voz respecto de sus necesidades específicas, ni información acerca de cómo organizarse para participar en actividades de mantenimiento. No obstante, la Ley Orgánica Constitucional de Municipalidades facilita la participación, la asociación coordinada de los municipios y establece mecanismos para la participación local en estas actividades. Otros cuerpos legales que atañen a este tema, son la Ley General y la Ordenanza de Urbanismo y Construcciones, las que constituyen un valioso conjunto de normas y acciones destinadas a orientar y regular el desarrollo físico de las áreas verdes, equipamiento y espacios públicos (MINVU, 1994).

Entre las más recientes iniciativas para estudiar las condiciones actuales de las áreas verdes en Santiago, está el proyecto “Registro de Hábitats del Área Metropolitana de Santiago”. En efecto, a comienzos del año 1995, The London Ecology Unit, institución de carácter cuasi gubernamental con sede en Londres, obtuvo financiamiento del Fondo Darwin para la Sobrevivencia de las Especies o Darwin Initiative Fund, dependiente del Gobierno Británico, para realizar un catastro de sitios con potencial para la conservación de la vida silvestre dentro del radio urbano de la ciudad de Santiago. Este trabajo contó con la coordinación general del Ministerio de Vivienda y Urbanismo y la colaboración del Laboratorio de Ecología Vegetal de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile.

Utilizando en este proyecto el concepto de áreas seminaturales, el estudio distingue entre parques tradicionales y áreas más naturales. Los primeros tienen estructura más simple, estática y uniforme a la vista de las personas, y una reducida diversidad vegetal y animal. Por el contrario, las áreas más naturales presentan una estructura compleja, más dinámica y contienen relaciones más estrechas entre sus componentes, sustentando una mayor diversidad biológica, por lo que resultarían más heterogéneas e interesantes para los habitantes de una ciudad (León, 1998).

Respecto del Plan Regulador Metropolitano, este catastro significa una posible modificación consistente en incorporar una nueva categoría de parque urbano: los parques naturales, cuyo principal atributo es la posibilidad de apreciación de la flora nativa y la fauna asociada, para contribuir a la sustentabilidad ambiental de ella y al aprendizaje y observación de los valores naturales locales (León, 1998).

El documento final de este proyecto fue entregado a los 34 municipios más consolidados a la trama urbana del Área Metropolitana, los cuales fueron objeto de este estudio, es decir, no se incluyeron las comunas de San José de Maipo, Pirque y Calera de Tango.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

- ☞ Analizar el efecto de los nutrientes presentes en las aguas servidas tratadas, en el crecimiento de tres especies vegetales.

3.2 Objetivos específicos

- I Comparar el crecimiento de tres especies arbóreas y arbustivas, para determinar el efecto debido al riego con aguas servidas tratadas.
- II Determinar, al final del ensayo, la concentración de nitrógeno disponible en las hojas.

4 MATERIAL Y MÉTODO

4.1 Generalidades

Se estableció un ensayo en la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas Santiago Poniente, a cuyo efecto se utilizó terreno, ejemplares de árboles y arbustos, suministro de agua potable y agua efluente de tratamiento de aguas servidas.

Las etapas cumplidas involucran: establecimiento del ensayo en terreno, aplicación de riego y mensura de los atributos de interés en los individuos objeto del ensayo.

4.2 Material

4.2.1 Tratamiento de aguas servidas en la Planta Santiago Poniente de EMOS S.A.

La Planta Santiago Poniente, inaugurada por el Presidente de la República Sr. Patricio Aylwin el 11 de agosto de 1993, fue la primera en el Gran Santiago. Se encontraba localizada en el sector La Farfana, comuna de Maipú. Su objetivo fue depurar las aguas servidas que conduce el colector Santiago Poniente que en marzo de 1993 descargaba un caudal de 16.000 m³ por día al río Mapocho. La planta servía un área de 1.410 ha que es parte de las comunas de Pudahuel y Lo Prado, con una población estimada en 120.000 habitantes (EMOS S.A., 1997).

La Planta fue diseñada en función de un modelo no convencional de tratamiento, basado en una combinación de lagunas y embalses de estabilización. Las aguas del efluente contaban con tratamiento secundario, aunque, eventualmente, podía aplicarse la desinfección química o tratamiento terciario. Las unidades que conformaron el esquema de la planta se detallan en los siguientes párrafos (EMOS S.A., 1997).

Es importante hacer notar que pocos meses después de finalizado el ensayo (octubre de 1999), comenzó el proceso de reconversión de la planta de tratamiento desde un sistema no convencional o natural, a otro convencional de lodos activados, con una capacidad proyectada de procesamiento de 5.000 l/s.

4.2.1.1 Planta elevadora

Incluye un pozo de acumulación en donde se instalaron cuatro grupos motobombas sumergibles con capacidad para elevar un caudal máximo de 480 l/s a una torre de carga, desde donde nace la cañería de 700 mm de diámetro que conduce las aguas a la planta de tratamiento.

4.2.1.2 Planta de tratamiento

Atiende un caudal medio de 200 l/s con una carga orgánica de 5.500 mg de DBO. Consta de las siguientes unidades dispuestas en dos módulos en paralelo:

Módulo 1: formado por cuatro lagunas aireadas, cuatro lagunas anaeróbicas (de sedimentación), una laguna facultativa (se realizan procesos anaeróbicos en profundidad y procesos aeróbicos en la superficie) y un embalse de estabilización.

Módulo 2: contiene el mismo tipo de unidades que el módulo 1 (EMOS S.A., 1997).

4.2.2 Características del terreno

El ensayo se estableció en la Planta de Tratamiento de Aguas Servidas Santiago Poniente, operada por EMOS S.A. y localizada en el sector La Farfana, comuna de Maipú, Región Metropolitana. El sector del ensayo constaba de una superficie de 512 m² de terreno plano, con un 1 % a 2 % de pendiente, de forma rectangular, cuyo eje mayor se orientó en el sentido NO - SE. Los vientos predominantes venían del SO, soplando intensamente durante las horas de la tarde.

4.2.3 Agua empleada en el riego

Las aguas servidas tratadas fueron suministradas por la Planta de Tratamiento desde una tubería que daba salida al efluente del tratamiento secundario. Esta agua se acopió en un estanque de 2.000

l de capacidad, ubicado a 30 m del terreno del ensayo, para su posterior uso en el riego durante el período requerido.

El agua potable se extrajo de un pozo profundo ubicado a 40 m del terreno, la cual era sometida a cloración.

4.2.4 Especies vegetales

Los ejemplares son árboles y arbustos que fueron suministrados por el vivero "Leliantú" del Parque Metropolitano de Santiago.

Las especies seleccionadas son: *Schinus molle* ("Pimiento boliviano"), *Casuarina stricta* ("Casuarina", "Pino de París", "Australian Pine") y *Cassia closiana* ("Quebracho"). Estas especies reúnen las siguientes condiciones generales:

- ✓ Especies de rápido crecimiento.
- ✓ Adaptables a condiciones de aridez.
- ✓ Tolerancia a condiciones de alta salinidad relativa.
- ✓ Facilidad de propagación.
- ✓ Abundante oferta en viveros.
- ✓ Figuran en planes municipales de forestación cuyo objeto es generar áreas verdes para esparcimiento y recuperación de suelos degradados.

4.3 Método

4.3.1 Preparación del terreno

Se extrajo todo tipo de basuras, aprovechando de regularizar la superficie, se procedió a cercar el sector y se prepararon las casillas en que fueron depositadas las plantas, adquiriendo cada casilla un volumen de 30 x 30 x 30 cm. Complementariamente a esto, se previó un permanente trabajo de extracción de vegetación competidora, proveniente tanto del terreno, como de semillas suspendidas en las aguas servidas.

4.3.2 Características de los ejemplares

Los ejemplares empleados en el ensayo tenían un año de desarrollo en vivero. Las plantas de *Schinus molle* ("Pimiento") poseían una altura promedio de 1,1 m y un diámetro a la altura de cuello (DAC) de 1,4 cm; los ejemplares de *Casuarina stricta* ("Casuarina") contaban con una altura inicial promedio de 1,5 m y un DAC de 1,3 cm; la especie *Cassia closiana* ("Quebracho") tenía ejemplares con una altura inicial promedio de 1 m y 1,1 cm de DAC.

4.3.3 Plantación de los ejemplares

La plantación se realizó en el mes de octubre de 1998. Se dispusieron los ejemplares con un espaciamiento de 1,5 x 1,5 m. Esta distancia entre ejemplares fue adecuada, dado que no se observaron escurrimientos superficiales laterales en el suelo que posibilitaran la mezcla de los dos tipos de agua de riego; cada ejemplar contó con una taza bien construida y el riego fue proporcionado en cantidad y oportunidad apropiadas, por lo que, aparentemente, no debió existir crecimiento radicular de una taza hacia otra. Cada especie se agrupó en forma de rectángulo, figura que delimita cada uno de los bloques. Las plantas se situaron en un terreno cercado de 32 X 16 m.

4.3.4 Riego

Se contó con dos tipos de riego: con agua potable, el que constituye el testigo, y con agua servida tratada, el cual fue el tratamiento del presente ensayo. Para los efectos del riego, se tenía una manguera de polietileno y un estanque de 2.000 lt, en donde se depositó el agua servida tratada. Por otra parte, existía una caseta con el equipo pertinente para extraer agua de un pozo profundo, la cual era sometida a cloración para potabilizarla. El riego se llevaba a efecto una o dos veces a la semana, según las condiciones climáticas. En cada riego se aplicaron 1.000 l de agua servida y otros 1.000 l de agua potable a cada grupo correspondiente. La forma de riego era directa a la taza desde la manguera, la que fue con antelación aforada para el ulterior cálculo del tiempo de riego para obtener un monto de riego dado. Con este procedimiento se entregó un máximo de 80 l de agua y un mínimo de 40 l a cada individuo mensualmente, de acuerdo a la frecuencia semanal de riego, pero, en definitiva, el volumen y la frecuencia de riego estaba dado por la capacidad de llenado semanal del estanque que acopio del agua servida tratada. No se agregó fertilizante en ninguno de los dos tratamientos.

4.3.5 Atributos a medir

I Para cumplir con el primer objetivo específico, es decir, determinar el efecto debido al riego en el crecimiento de los ejemplares, se realizó:

4.3.5.1 Medición de diámetro y de altura

Se midió cada cuatro meses durante un año el diámetro a la altura del cuello y la altura de los ejemplares. El ensayo contempló mediciones en los meses de octubre y febrero de 1998, junio y octubre del siguiente año.

II Para determinar la concentración de nitrógeno disponible en las hojas, se procedió como sigue:

4.3.5.2 Muestreo foliar

Este consistió en la toma de muestras de las hojas al final del ensayo. Se extrajeron al azar hojas juveniles de algunos ejemplares, introduciéndolas en bolsas de papel convenientemente rotuladas por especie y tratamiento. Las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Análisis Foliar del Departamento de Producción Agrícola de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. De esta manera, se obtuvo el contenido de nitrógeno disponible en dichas hojas, principalmente en su forma de nitrato.

Para analizar comparativamente el impacto del riego con aguas servidas tratadas en cada especie, se estableció el siguiente diseño:

4.3.6 Diseño del experimento

El diseño contemplado es el denominado completamente al azar con arreglo factorial, considerando dos factores: el efecto debido a la especie y el efecto debido al tratamiento. El método estadístico aplicado es el análisis de varianza, además del empleo del test de Duncan para comparar las medias de crecimiento por especie. Se asume una probabilidad de error del 5%. Se trabajó con 150 ejemplares, 50 ejemplares por especie, de los cuales 54 fueron medidos, esto es, 18 ejemplares por especie. El resto se empleó para atenuar efectos de borde. El tratamiento y el testigo fueron asignados al azar dentro de cada grupo o bloque formado por cada especie. El testigo consistió en riego con agua potable y el tratamiento en riego con agua servida tratada. Se contó con nueve repeticiones por especie. El número de ejemplares a medir se consideró suficiente, dado que las especies elegidas presentaron escasa variabilidad. Como criterio general, un número mínimamente adecuado de muestras es igual a 5 ejemplares.¹ (Li, 1969; Scheffler, 1981; Sokal, 1979).

4.3.7 Caracterización fenológica

Se realizó durante el período de ensayo la observación y caracterización fenológica de los ejemplares. Esto consiste en la descripción por observación directa de las manifestaciones visibles del desarrollo de dichos ejemplares. Los aspectos a considerar involucran la identificación de fases como la brotación, floración y fructificación, cuando corresponda; además, se describirá la intensidad de estas fases, es decir, el inicio, la plenitud y el fin de cada etapa (Curihuinca, 1993).

Respecto del criterio empleado para decidir acerca de la periodicidad de estas observaciones y caracterizaciones, éste consiste en que el aspecto más relevante en el desarrollo vegetal, para estas especies y en estas condiciones de ensayo, es la brotación, esto es, el surgimiento de yemas folíferas; por esta razón las observaciones y mediciones se hicieron sincrónicas con este evento. Por otro

¹ Comunicación Personal: Sr. Sergio Mora O., Depto. Manejo de Rec. Forestales, Fac. de Cs. Forestales, U. de Chile.

lado, los ejemplares utilizados corresponden a especies siempreverdes con capacidad de crecimiento durante todo el año.

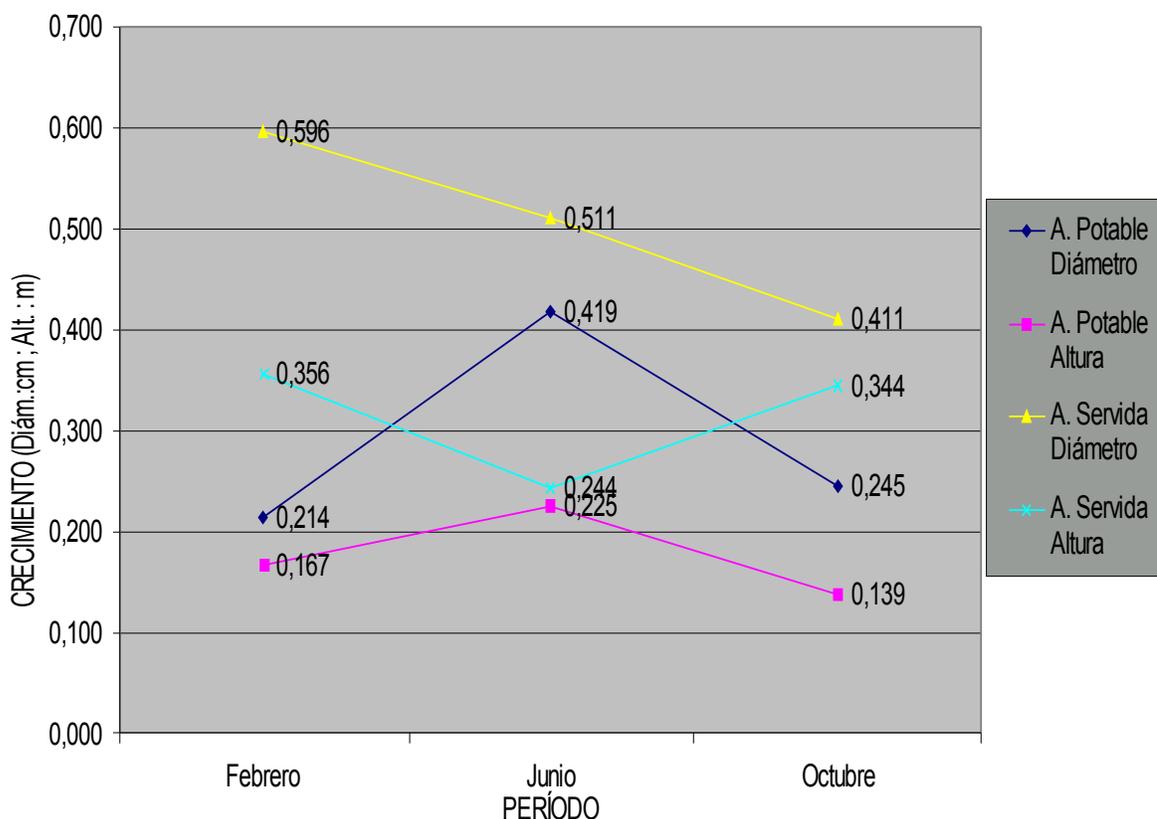
5 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

I Comparación entre el crecimiento de tres especies arbóreas y arbustivas, para determinar el efecto debido al riego con aguas servidas tratadas

En la figura 1 se observa el crecimiento de la especie *Casuarina stricta* durante los tres períodos medidos. En el gráfico se constata que el proceso usual de aceleración del crecimiento al final del invierno e inicio de la primavera, sólo se dio para la altura de los ejemplares regados con agua servida. En cambio, para las otras tres curvas se tiene un proceso inicial de aceleración del crecimiento en altura y en diámetro de los ejemplares, en ambos casos con riego con agua potable.

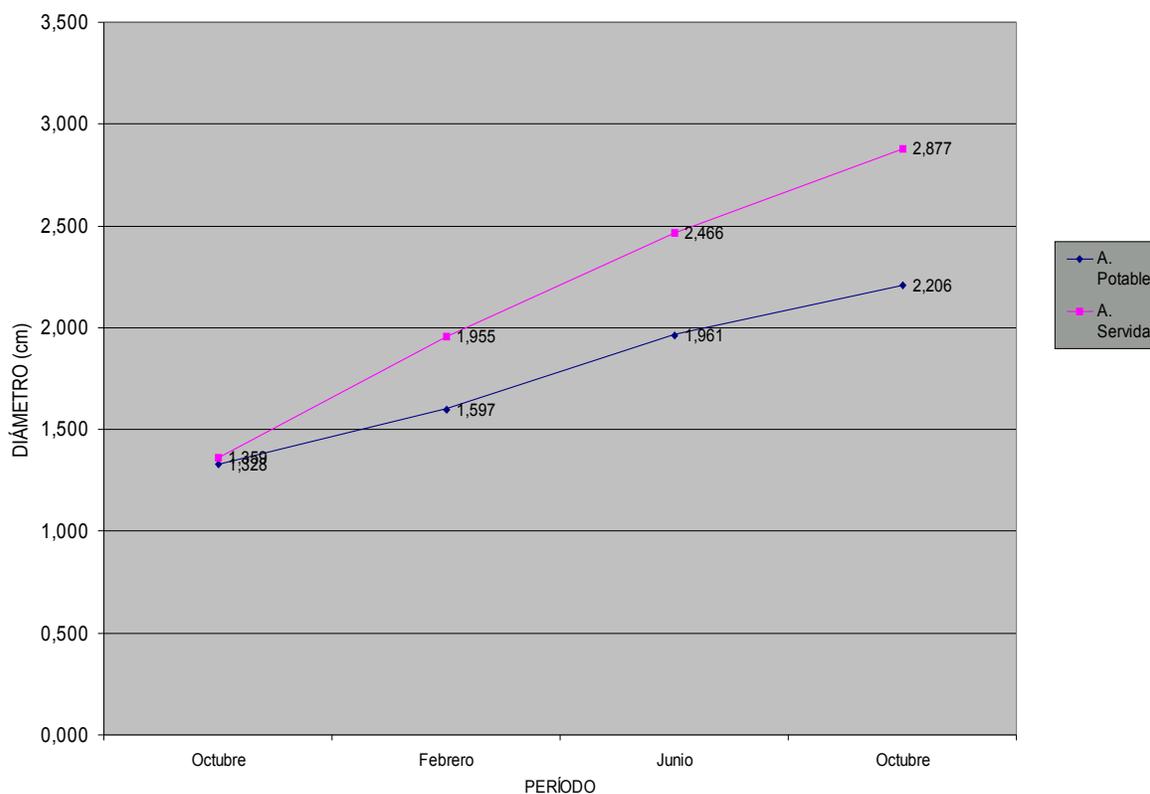
En otras palabras, las diferencias entre los tratamientos sólo se expresaron en el crecimiento en altura de los ejemplares de esta especie.

Figura 1: Crecimiento en Diámetro y en Altura de *Casuarina stricta*



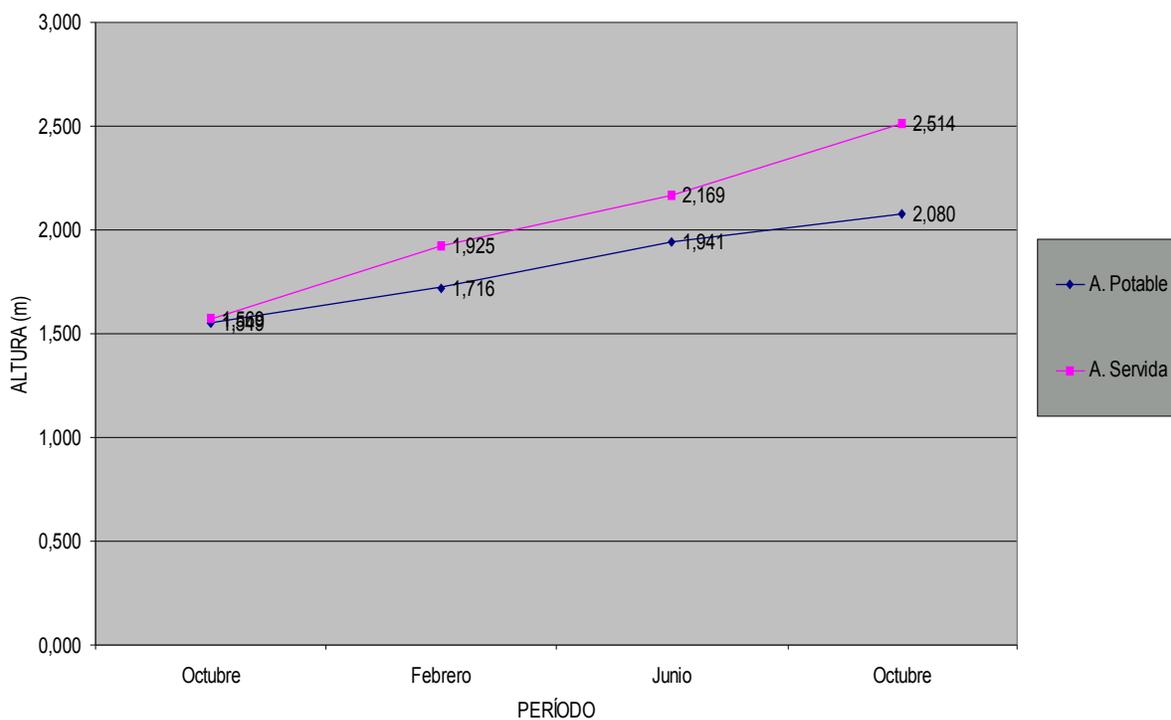
En la figura 2 se observa el crecimiento en diámetro de los ejemplares de *Casuarina stricta* sometidos a los tratamientos. Desde el primer cuatrimestre se observa una mayor pendiente en la curva de crecimiento de los ejemplares sometidos a riego con aguas servidas tratadas, condición que se mantiene durante el resto del ensayo. Sin embargo, el análisis estadístico indica, como ya se dijo, que, con una probabilidad de error del 5%, no existen diferencias significativas en el crecimiento en diámetro entre los tratamientos. Aún así, el diámetro de los ejemplares con riego con aguas servidas tratadas al final del ensayo es, en valores absolutos, mayor que los ejemplares regados con agua potable.

Figura 2: Crecimiento en Diámetro de *Casuarina stricta*



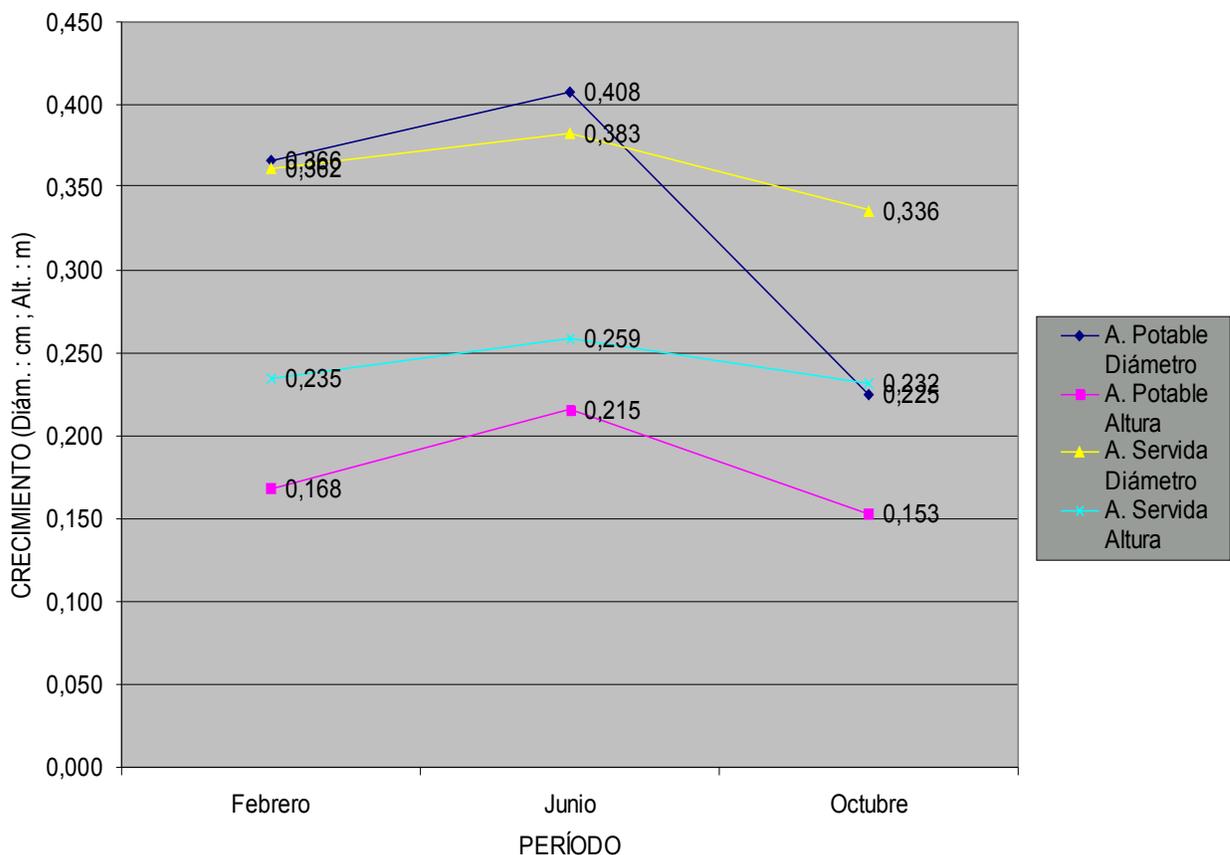
En la figura 3, donde se muestra el crecimiento en altura de los ejemplares de *Casuarina stricta*, se verifica un proceso similar al indicado para el caso del crecimiento en diámetro, es decir, los ejemplares regados con aguas servidas tratadas presentan progresivamente mayor altura durante el ensayo. Pero, en el crecimiento en altura, el análisis de varianza sí entrega una conclusión positiva en cuanto a la diferencia estadística significativa en el crecimiento entre los ejemplares.

Figura 3: Crecimiento en Altura de *Casuarina stricta*



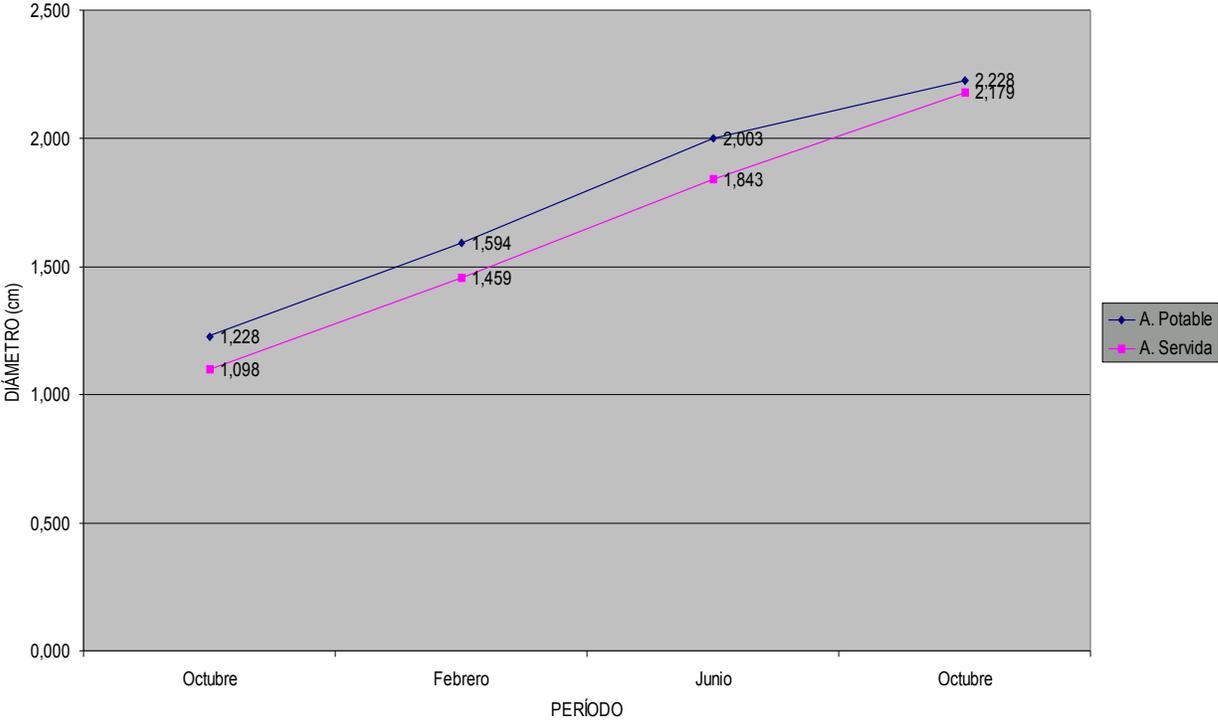
En la figura 4 se tiene el gráfico del comportamiento del crecimiento en diámetro y altura de la especie *Cassia closiana*. En las cuatro curvas existe un proceso similar entre sí, con un crecimiento acelerado entre febrero y junio, decayendo dicho crecimiento entre junio y octubre. En el caso del diámetro de los ejemplares sometidos a riego con agua potable, el descenso en la velocidad de crecimiento es mayor que en el resto. Los procesos de crecimiento, tanto de aumento como de descenso de velocidad son, en los casos estudiados, más atenuados cuando se trata de los ejemplares bajo el régimen de riego con aguas servidas tratadas.

Figura 4: Crecimiento en Diámetro y en Altura de *Cassia closiana*



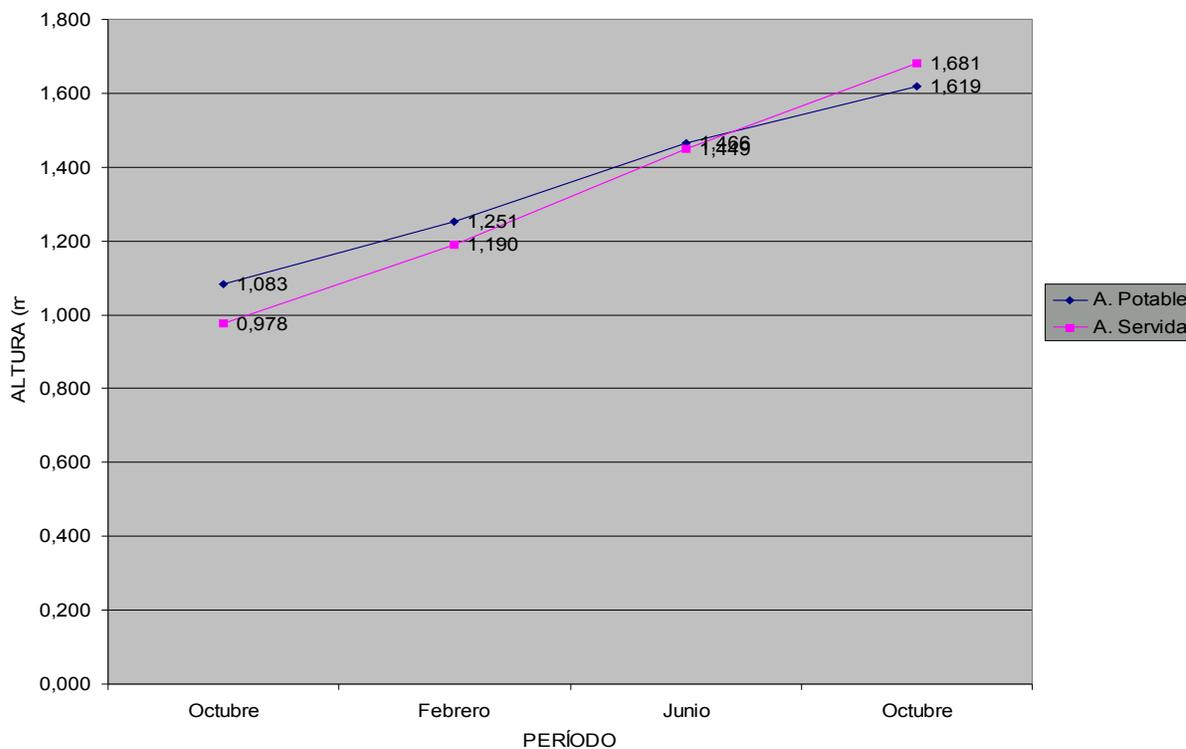
En la figura 5 se representa la información respecto del crecimiento del diámetro de los ejemplares de *Cassia closiana*. Se tiene un desarrollo parejo para los ejemplares bajo riego con agua servida tratada y con agua potable. No obstante, en este último caso, se detecta un descenso de la velocidad de crecimiento del atributo medido, justamente a inicios de la primavera. Esto nos indica, además, el alto interés que tiene realizar análisis que contemplen mayores períodos de tiempo, de manera tal que pueda observarse el desarrollo de este proceso en forma más completa. Por su parte, los ejemplares regados con aguas servidas tratadas continúan parejamente aumentando su velocidad de crecimiento en diámetro.

Figura 5: Crecimiento en diámetro de *Cassia closiana*



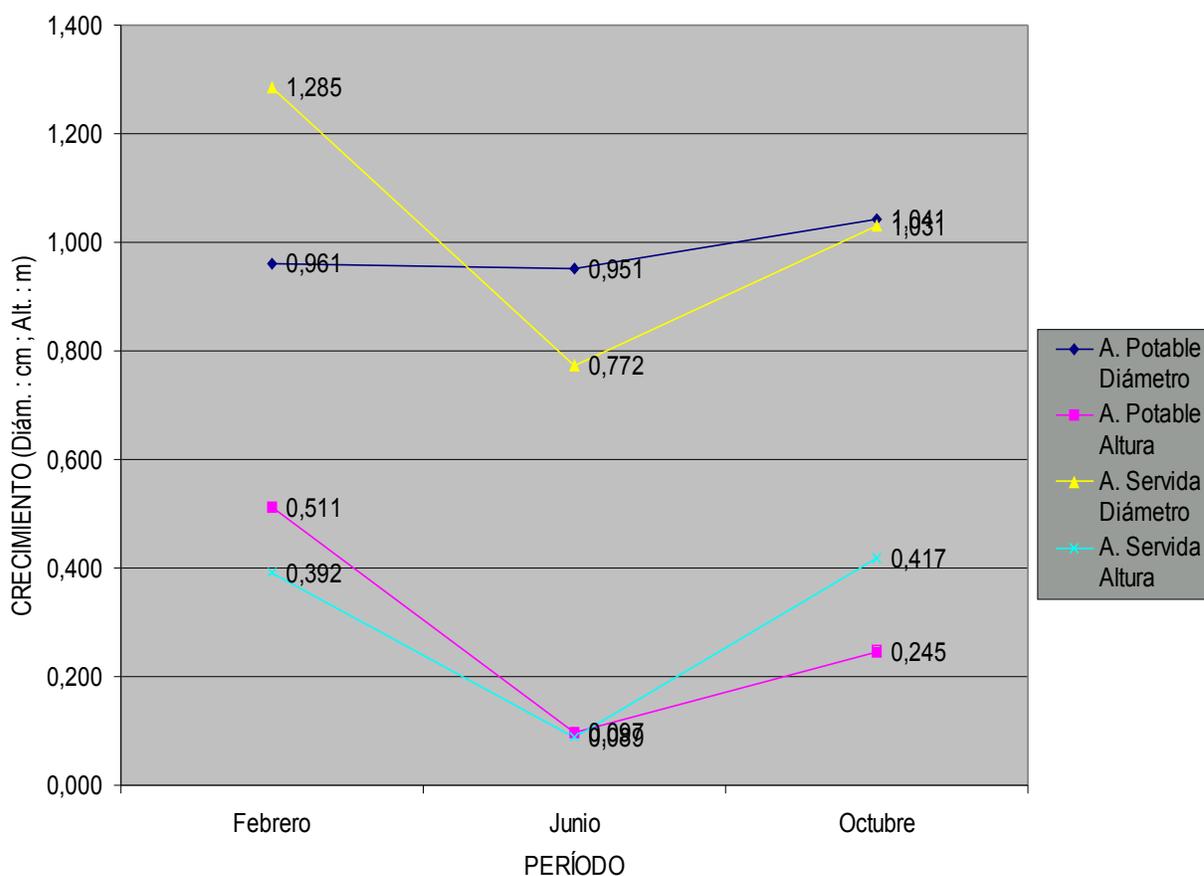
En la figura 6 se observa que el proceso anotado para el caso del diámetro es mucho más notorio. Esto es, la altura de los ejemplares regados con agua potable manifiesta una clara tendencia a reducir su velocidad de crecimiento, pasando a ser menor que la de los ejemplares sometidos al tratamiento con aguas servidas tratadas en los inicios del período de crecimiento vegetativo. Esta observación es reforzada por la conclusión a que se llega luego del análisis estadístico de los datos de altura obtenidos, pues hay diferencias estadísticamente significativas entre los crecimientos de los ejemplares correspondientes.

Figura 6: Crecimiento en altura de Cassia closiana



En la figura 7 se tiene el crecimiento en diámetro y en altura de los ejemplares de la especie *Schinus molle*. En términos generales, las curvas de velocidad de crecimiento para *Schinus molle* responden al modelo contrario respecto de lo observado en las otras dos especies, es decir, se tiene un decrecimiento en dicha velocidad en el período de finalización del verano e inicio del otoño, seguido de un incremento en la velocidad de crecimiento al finalizar el invierno e iniciarse el verano. El proceso más atenuado se verifica para el diámetro de los ejemplares regados con agua potable. Los ejemplares de esta especie regados con agua servida tratada, tanto en sus parámetros de crecimiento en altura como en diámetro, manifiestan procesos más acentuados de aceleración o de desaceleración en la velocidad de su crecimiento.

Figura 7: Crecimiento en Diámetro y en Altura de *Schinus molle*



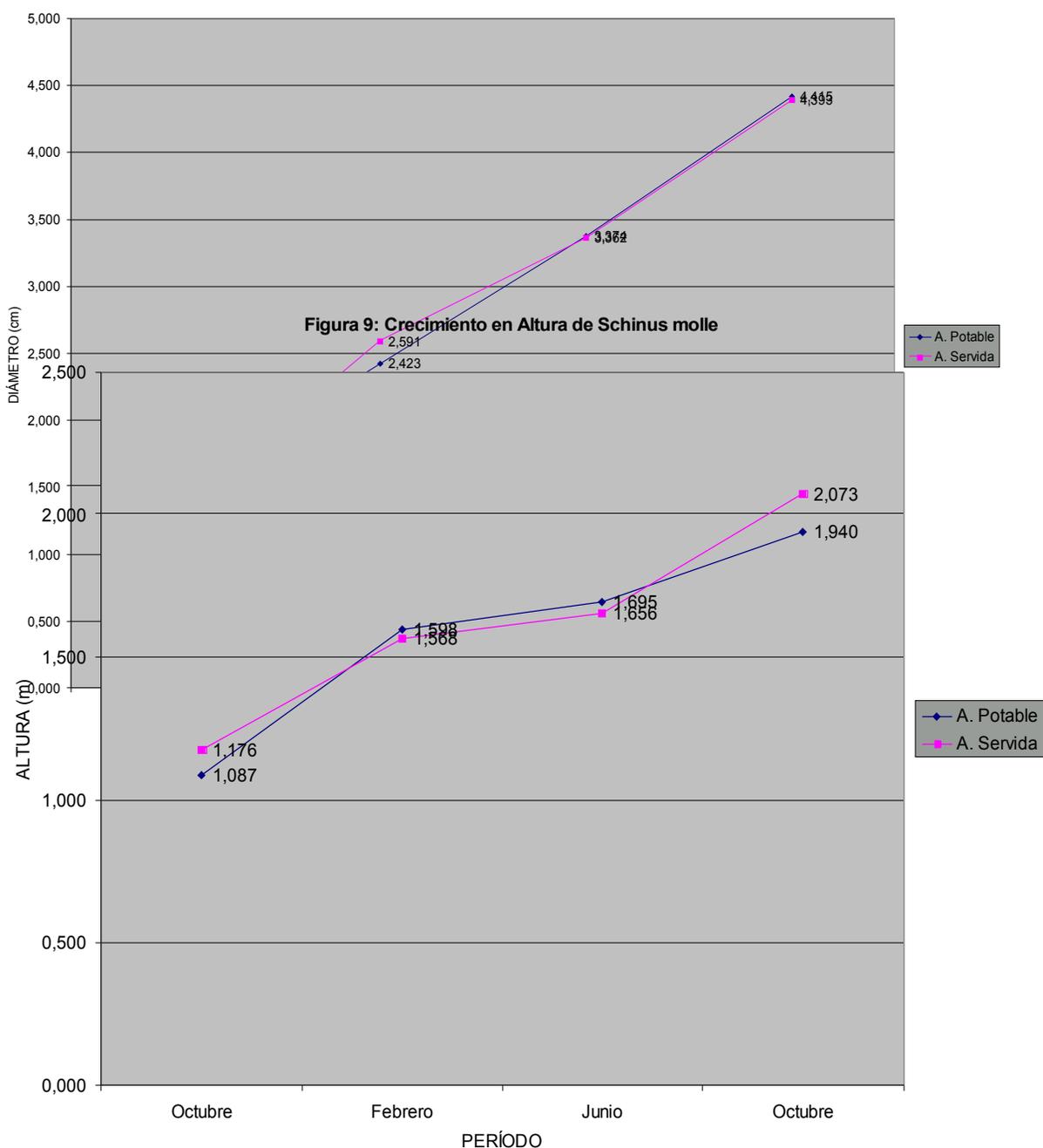
En las figuras 8 y 9 se observa que entre los procesos de crecimiento, tanto para la altura como para el diámetro de *Schinus molle*, existe mucha similitud, por lo tanto, no hay diferencia visual en terreno entre los ejemplares regados con uno u otro tipo de aguas.

El vigor evidenciado por los ejemplares de esta especie, sumado a su resistencia a grandes períodos de sequía, característica genética proveniente de una prolongada interacción natural con un

medio tan duro y extremo como es el desierto de Atacama, lo hacen bastante recomendable para ambientes rurales y urbanos como los de nuestra zona central, con largos períodos de sequía, incluso agudizados en frecuentes ciclos de uno a tres años secos, seguidos de períodos con grandes cantidades de precipitación anual.

Es probable, también, que esta especie haya sido indiferente al aporte de nitrógeno suministrado por las aguas servidas tratadas, o bien, que el espaciamiento no haya sido el apropiado.

Figura 8: Crecimiento en Diámetro de Schinus molle



Del análisis de los datos, se puede concluir que los efectos del riego con aguas servidas tratadas no son estadísticamente significativos en el crecimiento en diámetro de los ejemplares. En cambio, existe un efecto significativo de cada especie en el incremento del diámetro, es decir, cada una influye de manera diferente en dicho crecimiento, lo cual resulta en un proceso de crecimiento diverso entre las especies.

En cuanto al análisis estadístico de la altura, existen diferencias significativas en el crecimiento producidas por el riego con aguas servidas tratadas. De acuerdo a este mismo análisis, existe además un efecto significativo de la especie en el crecimiento en altura.

No obstante lo anterior, los valores promedio de los crecimientos en diámetro y en altura, experimentan aumentos relativos en el caso de los ejemplares sometidos a riego con aguas servidas tratadas.

Tanto los promedios de crecimiento en diámetro como los de altura, presentan diferencias numéricas más estrechas en *Schinus molle* que en las otras dos especies, lo que podría indicar que su comportamiento como especie adaptada a condiciones de escasez hídrica, unido al aprovechamiento de los nutrientes aportados por las aguas servidas tratadas, se expresa en un mayor crecimiento relativo de dicha especie.

Respecto a otras experiencias en esta materia, en E.E.U.U. y Europa, desde el siglo XIX, se conocen las aplicaciones de riego con aguas servidas sin tratamiento a diferentes cultivos. En la década de 1960, en Norteamérica, se comienzan a buscar soluciones integrales al problema del tratamiento y la disposición de las aguas servidas para protección del ambiente, aplicándose el concepto de riego con aguas servidas tratadas, pero sólo empleando un pre-tratamiento al efluente y almacenando las aguas en tranques, en períodos donde no era necesario regar. De esta forma se consiguió el doble objetivo de evitar

el vertido de aguas servidas a los cauces naturales y aumentar considerablemente la productividad de los cultivos agrícolas.

Nueva Zelanda ha desarrollado un sistema de riego de plantaciones forestales de *Pinus radiata* desde la década de 1980, basándose en que el 80% de las aguas servidas del país son tratadas y la especie considerada es de rápido crecimiento. El propósito de tales tratamientos es acelerar el proceso de purificación del agua, removiendo sólidos y reduciendo la carga de polución. Sin embargo, los efluentes tratados aún tienen concentraciones de nitrógeno y fósforo que pueden estimular el crecimiento de algas.

En una experiencia de terreno en Australia, se comprobó que plantaciones de *Eucalyptus grandis* y *Eucalyptus saligna*, bajo condiciones ideales de sitio y precipitación, tendrían un rendimiento muy similar a aquéllas desarrolladas bajo riego con aguas servidas (Rosales, 1998).

Por otra parte, en las regiones áridas del oeste de Estados Unidos, donde el efluente municipal ha sido usado para regar plantaciones forestales, el agua subterránea de este sistema proporciona una porción del suministro de agua potable.

Entre 1991 a 1996, el centro de investigación australiano CSIRO llevó a cabo un proyecto cuyo objetivo fue desarrollar una guía de consulta para el diseño y manejo de las plantaciones forestales regadas con efluentes, en respuesta a la creciente práctica de este sistema por los propietarios de los terrenos. Uno de los puntos considerados fue la prueba de especies de rápido crecimiento, nativas y exóticas. Se alcanzaron buenos rendimientos en *Eucalyptus grandis* y *Pinus radiata*, con la salvedad que si *Eucalyptus sp* a los 2 años es 4 veces más grande que *Pinus sp*, éstos últimos absorben más nutrientes que *Eucalyptus sp* (Rosales, 1998).

Myers (1994), citado por Rosales (1998), plantea que las plantaciones forestales no son la respuesta universal a la utilización de aguas residuales recuperadas, aunque en ciertas circunstancias son útiles. Esta salvedad se debe a que una mala aplicación del riego puede causar un enorme problema de contaminación de las aguas subterráneas por la lixiviación de nitrato. De la misma manera, si las algas en los ríos es un problema que puede durar meses, al saturar inconvenientemente el suelo con aguas residuales, la persistencia de estos organismos en él se amplía a centenares de años.

En sus ensayos de campo, este mismo autor encontró que la tasa de crecimiento para todos los ejemplares de *Pinus radiata* sometidos a los tratamientos, fue mayor que aquéllas reportadas para los mejores sitios de Nueva Zelanda y Australia. Cuando *Pinus radiata* y *Eucalyptus grandis* se riegan con efluente o agua de pozo, crecen rápidamente; en los primeros años *Eucalyptus sp* es más rápido y logra el cierre de dosel 2,5 años antes que *Pinus sp*, sin embargo, entre el cuarto a quinto año, el crecimiento de *Pinus sp* excedió al de *Eucalyptus sp*, y en la quinta temporada el volumen del fuste de pino fue mayor y la masa del follaje duplicó a *Eucalyptus sp* (Rosales, 1998).

Stewart *et al.* (1990), citado por Rosales (1998), estudiaron la respuesta de plantaciones de *Populus robusta* y *Salix alba* al riego con aguas servidas. El riego con agua residual produjo incrementos de 16% a 139% en el volumen de madera respecto del riego con agua potable.

Los inconvenientes en el ensayo de Myers consistieron en la mayor susceptibilidad de *Pinus radiata* a la caída por efecto del viento y deformaciones de fuste en *Eucaliptus grandis*, a consecuencia de fracturas por el viento. Al existir exceso de riego en la plantación, los árboles se tornaron más propensos al daño que aquellos sub-regados. Esto sugiere que el sub-riego es una estrategia de manejo preferible desde el punto de vista de la calidad y estabilidad de los árboles.

II Determinar, al final del ensayo, la concentración de nitrógeno disponible en las hojas.

El análisis de laboratorio para las hojas de los ejemplares arrojó los resultados que se muestran en la tabla N° 1.

Tabla N° 1: Porcentaje de peso seco de nitrógeno disponible en las hojas de los ejemplares al final del ensayo.

RESULTADOS ANÁLISIS FOLIAR (% Peso Seco de nitrógeno)		
Especie	Tratamiento	
	Riego Agua Potable	Riego Aguas Servidas Tratadas
<i>Cassia closiana</i>	3,57	3,86
<i>Casuarina stricta</i>	2.08	1,94
<i>Schinus molle</i>	2,7	2,96

De los datos de la tabla N° 1 se puede concluir que el nitrógeno disponible en las hojas de los ejemplares sometidos a los tratamientos presentan escasa variación entre sí. En las especies *Cassia closiana* y *Schinus molle* los valores son ligeramente más altos para los ejemplares sometidos a riego con aguas servidas tratadas, pero sucede lo contrario con la especie *Casuarina stricta*, especie con hojas aciculares. Para la primera especie de la tabla existe una variación de un 8,1% en el peso seco de nitrógeno en las hojas de los ejemplares regados con aguas servidas tratadas, respecto del contenido de nitrógeno en las hojas de los ejemplares sometidos a riego con agua potable; para la tercera especie dicha variación es de un 9,6%. En cambio, los ejemplares de *Casuarina stricta* regados con agua potable tienen en sus hojas

un 7,2% de nitrógeno por sobre el contenido de este elemento en las hojas de los ejemplares sometidos a riego con aguas servidas tratadas.

De acuerdo a lo anterior, el tratamiento consistente en riego con aguas servidas tratadas permitió un aumento en el contenido de nitrógeno en las hojas de las especies latifoliadas. Para la especie *Cassia closiana* se observa que las hojas de los ejemplares regados con agua potable tienen un mayor contenido de nitrógeno que las hojas de los árboles regados con agua servida.

En términos generales, la acumulación de nitrógeno en el árbol, ya sea en la madera o en el follaje, es un factor importante al momento de calcular el aporte de este elemento al suelo por medio del riego. Myers *et al.* (1998), citado por Rosales (1998), en su ensayo realizado en Australia no se detectaron diferencias en la cantidad de nitrógeno almacenado en los árboles entre riego con agua pura y riego con efluente, lo que demostró que el abastecimiento de nitrógeno desde las reservas del suelo, fue suficiente para soportar el crecimiento de los árboles. En este sentido, la cantidad de nutrientes acumulados por los árboles, depende del estado de desarrollo y las prácticas silvícolas que se realicen con el fin de favorecer los estados que tienen mayores tasas de uso nutrientes. Prácticas como raleo, cortas parciales a intervalos regulares (3-5 años), ayudan a equiparar la tasa de carga de nutrientes con la tasa de acumulación en los árboles (Rosales, 1998).

Para efectos de la caracterización fenológica, los procesos observados en los ejemplares fueron: brotación, floración y fructificación. En el caso de *Casuarina stricta* y *Cassia closiana* sólo se observó brotación; en cambio, en *Schinus molle* se manifestaron durante el año de ensayo las fases de brotación, floración y fructificación.

Dado que la época de plantación de los ejemplares fue en octubre, la fase de brotación ya se había iniciado en todas las especies; su plenitud fue a finales de noviembre y su fin un mes y medio más tarde.

Un proceso de alto interés fue el inicio de la floración de los ejemplares de *Schinus molle* a fines de febrero, cuya etapa de plenitud se observó en marzo, finalizando a inicios de abril. La etapa de fructificación dio comienzo en la primera semana de abril, teniendo su plenitud a fines de este mes, expresándose esta etapa en más de un ochenta por ciento (80%) de ejemplares en fructificación al final del mes de mayo, tratándose indistintamente de ejemplares sometidos a riego con aguas servidas tratadas o a riego con agua potable, mes en que esta etapa finalizó.

6 CONCLUSIONES

- ✓ El efecto del riego con aguas servidas tratadas en el crecimiento en diámetro de los ejemplares de *Casuarina stricta* (“Casuarina”), *Cassia closiana* (“Quebracho”) y *Schinus molle* (“Pimiento boliviano”), no presenta diferencias estadísticamente significativas. Sin embargo, al analizar el efecto de la especie sobre dicho crecimiento, mediante la prueba de intervalos múltiples de Duncan, se concluye que el crecimiento en diámetro de *Schinus molle* es significativamente diferente a las otras dos especies.
- ✓ Existen diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento en altura de los ejemplares de las especies utilizadas en este ensayo, debido a la utilización de agua servida tratada. Asimismo, la prueba de intervalos múltiples de Duncan permite concluir que, independientemente de los tratamientos, las tres especies presentan un crecimiento significativamente diferente entre sí.
- ✓ El crecimiento en diámetro recibe una influencia genética, es decir, de la especie, mayor que el efecto del riego con aguas servidas sobre dicho crecimiento.
- ✓ En el análisis foliar no se detectó diferencias apreciables entre el contenido de nitrógeno en las hojas de los ejemplares sometidos a las diversas condiciones del ensayo.
- ✓ Las aguas servidas tratadas poseen un interesante potencial como recuperadoras de nutrientes para las plantas y como protectoras del agua potable, pues, de esta manera, ésta sólo se podría destinar al uso exclusivo del consumo humano y animal.
- ✓ Desde el punto de vista fenológico, los ejemplares sometidos a riego con aguas servidas tratadas aceleran sus procesos de brotación. En el caso de *Schinus molle* (“Pimiento boliviano”) se pudo observar, a los seis meses desde el inicio del ensayo, brotación, floración y fructificación en gran

parte de los ejemplares de esta especie sometidos a riego con aguas servidas tratadas. Por el contrario, en *Casuarina stricta* (“Casuarina”) y *Cassia closiana* (“Quebracho”) sólo se observó brotación, tanto en los ejemplares del grupo testigo como en los que fueron regados con agua servida tratada.

- ✓ Debido al incremento continuo en la superficie de las áreas verdes en Santiago de Chile, unido al creciente número de plantas de tratamiento de aguas servidas, es necesario realizar detallados estudios acerca de los efectos de las aguas servidas tratadas, utilizadas para el riego de especies de uso frecuente en los planes de forestación de superficies urbanas. Asimismo, es necesario realizar estudios aplicados a la realidad chilena acerca de los efectos de estas aguas de riego sobre la salud pública.

7 BIBLIOGRAFÍA

Binkley, D. 1993. Nutrición forestal. Ed. Limusa. México. 340 p.

Brown, E. y Saldivia, J. 2000. Informe nacional sobre la gestión del agua en Chile. CEC U. de Chile, Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS), Santiago, Chile. 117 p.

Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS).1987. Aspectos sanitarios de la utilización de aguas residuales y excretas en la agricultura y acuicultura. Hojas de Divulgación Técnica N° 37. Organización Mundial de la Salud, Lima, Perú. 12 p.

Chile. Comisión Nacional de Riego (CNR). 1981. Estudio de Suelos del Proyecto Maipo. Santiago, Chile.

Chile. Instituto Nacional de Normalización (INN). 1978. Norma chilena oficial NCh 1333. Requisitos de calidad del agua para diferentes usos. Parte 2: Riego. Santiago, Chile. 13 p.

Chile. Instituto Nacional de Normalización (INN). 1993. Norma chilena oficial NCh 409/1 (Modificación). Requisitos de calidad del agua potable. Parte 1: Requisitos. Santiago, Chile. 7 p.

Chile. Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). 1994. Catastro de áreas verdes del área intercomunal de Santiago. Síntesis. Secretaría Ministerial Metropolitana, Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 10 p.

Chile. Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU). 1999. Antecedentes generales del programa de parques urbanos – MINVU. Minuta N° 10, fecha 18.01.99, Departamento Planes y Programas, Secretaría Ministerial Metropolitana, Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 1 p.

Curihuinca, J. 1993. Manual de observaciones fenológicas. Dirección Meteorológica de Chile, Dirección General de Aeronáutica Civil. Santiago, Chile. 62 p.

EMOS S.A. 1997. Declaración de impacto ambiental colector-interceptor de aguas servidas Maipo. Santiago, Chile. Circulación Restringida. 350 p.

EMOS S.A. 1997. Planta Santiago Poniente. Folleto de Divulgación, Unidad de Relaciones Públicas. Santiago, Chile. S/p.

EMOS S. A. 1998. Declaración de impacto ambiental proyecto planta de tratamiento de aguas servidas Paine. Consultora Ambar. Santiago, Chile. Circulación Restringida. 380 p.

EMOS S. A. 2000. EMOS-Una larga historia. [on-line]. Disponible en [www: http://www.emos.cl/unalargahistoria.html](http://www.emos.cl/unalargahistoria.html). Fecha de consulta: 27 de junio de 2000.

Global Water Partnership (GWP). 2000. Agua para el siglo XXI: De la visión a la acción. América Latina. Conferencia Ministerial del Segundo Foro Mundial del Agua. La Haya, Holanda. 81 p.

Homsí, J. 1990. Tratamiento y disposición final de aguas servidas. Cuadernos Universitarios N° 2. Serie Seminarios, Universidad Nacional Andrés Bello, Santiago, Chile. 172 p.

León, S. 1998. Resultados del Registro de Hábitats del Área Metropolitana de Santiago. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 6 p.

Li, C. 1969. Introducción a la estadística experimental. Editorial Omega, Barcelona, España. 496 p.

Lopez, M. La ley de las aguas en Chile: estudio de caso y análisis crítico. Documento inédito. 6 p.

Marcoux, A. 1994. Population and water resources. Departament of Economic and Social Affairs, UN Population Division, United Nations Population Information Network (POPIN), contrib. by Food and Agriculture Organization (FAO). 24 p.

Meyer, B. y Anderson, D. 1972. Introducción a la fisiología vegetal. Editorial Eudeba. Buenos Aires, Argentina. 579 p.

Mujeriego, R. 1990. Riego con agua residual municipal regenerada. Manual práctico. Generalitat de Catalunya. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Barcelona, España. 481 p.

Müller, L. 1961. Un aparato micro Kjeldahl simple para análisis rutinarios rápidos de materias vegetales. Turrialba. Revista Interamericana de Ciencias Agrícolas. Trimestre ene-mar 1961. Vol. 11, N° 1 p. 17-25. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. Turrialba, Costa Rica. 9 p.

National Academy of Press (NAP). 1999. Use of reclaimed water and sludge in food crop production. [on-line]. Disponible en [www: http:// www.nap.edu/ readingroom/ books/ sludge/ summary.html](http://www.nap.edu/readingroom/books/sludge/summary.html). Fecha de consulta: 17de febrero de 1999.

Navas, L. 1973. Flora de la cuenca de Santiago de Chile. Vol. 2. Ediciones de la U. de Chile. Santiago, Chile. 559 p.

Odendaal, P. E. 1992. Impacto medioambiental de la reutilización de aguas residuales. Pretoria, Sudáfrica. 7 p.

Peña, H. 1993. Caracterización de la calidad de las aguas naturales y contaminación agrícola en Chile. Prevención de la contaminación del agua por la agricultura y actividades afines. Informes sobre Temas Hídricos N° 1. Oficina Regional de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile, pp. 75-85.

Organización de Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 1997. Especies arbóreas y arbustivas para las zonas áridas y semiáridas de América Latina. Serie Zonas Áridas y Semiáridas N° 12. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile. 347 p.

Organización Mundial de la Salud (OMS). 1989. Directrices sanitarias sobre el uso de aguas residuales en Agricultura y Acuicultura. Informe de un Grupo Científico de la OMS. Serie de Informes Técnicos 778. Ginebra, Suiza. 59 p.

Programa de Naciones Unidas para el Medioambiente (PNUMA). 1988. Environmental guidelines for domestic wastewater management. Nairobi, Kenya. 29 p.

Rosales, M. 1998. Riego con aguas servidas en plantaciones de especies forestales de rápido crecimiento. Memoria de Título. Concepción, Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Departamento de Silvicultura. 57 p.

Sanhueza, G. 1998. Santiago limpia su agua. [on-line]. Disponible en el [www: http://www.tierramerica.org/agua/santiago.shtml](http://www.tierramerica.org/agua/santiago.shtml). Fecha de consulta: 17 de febrero de 1999.

Santibáñez, F.; Uribe, J.; Vicencio, M. 1990. Atlas agroclimático de Chile: Regiones V y Metropolitana. Lab. de Agroclimatología, Depto. Ingeniería y Suelos, Fac. de Cs. Agrarias y Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile. 65 p.

Scheffler, W. 1981. Bioestadística. Fondo Educativo Interamericano. México. 267 p.

Sokal, R. 1979. Biometría: principios y métodos estadísticos en la investigación biológica. Blume Ediciones. Madrid, España. 832 p.

Texas Water Resources Institute (TWRI). 1999. Health effects of wastewater reuse for public park irrigation. [on-line]. Disponible en el [www: http://twri.tamu.edu/twripubs/NewWaves/v3n4/abstract-2.html](http://twri.tamu.edu/twripubs/NewWaves/v3n4/abstract-2.html). Fecha de consulta: 17 de febrero de 1999.

Wood, W. 1994. Medición del nitrógeno potencialmente mineralizable en suelos acondicionados con diferentes dosis de guano caprino. Memoria. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 77 p.

Zapico, F. 2001. Uso de aguas residuales tratadas para el riego de un vivero de cítricos. Taller de Licenciatura. Quillota, Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Agronomía, Área de Fruticultura. 54 p.

ANEXOS

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MODELO FACTORIAL CON DOS FACTORES FIJOS Y VARIAS OBSERVACIONES POR CELDA

Factor Variación	Suma Cuadrados (SC)	Grados Libertad (GL)	Cuadrado Medio (CM)	F _o	F _{TABLA}
Renglón A	$\Sigma y^2_{i.} / bn - y^2_{...} / abn \quad i=1, \dots, a$	(a - 1)	$SC_A / (a - 1)$	CM_A / CM_E	
Renglón B	$\Sigma y^2_{.j} / an - y^2_{...} / abn \quad j=1, \dots, b$	(b - 1)	$SC_B / (b - 1)$	CM_B / CM_E	
Interacción	$SC_{AB} = SC_{Subtotales} - SC_A - SC_B$	(a - 1) (b - 1)	$SC_{AB} / (a - 1) (b - 1)$	CM_{AB} / CM_E	
Residual (SC _{res})	$SC_{res} = SC_{Tot} - (SC_{Subtotales})$	a b (n - 1)	$SC_{res} / a b (n - 1)$		
Total (SC _{Tot})	$\Sigma \Sigma \Sigma y^2_{ijk} - y^2_{...} / abn \quad i=1, \dots, a; j=1, \dots, b; k=1, \dots, n$	a b n - 1			

$$SC_{Subtotales} = \Sigma \Sigma y^2_{ij.} / n - y^2_{...} / abn \quad i=1, \dots, a; j=1, \dots, b$$

PRUEBA DE INTERVALOS MÚLTIPLES DE DUNCAN

Se calcula $S_{x.j} = (CME / n)^{1/2}$, donde CME es el cuadrado medio del error y n es el número total de muestras; luego se extrae de la tabla correspondiente los valores de $r_{\alpha}(p, f)$, con $\alpha = 0,05$; $p = 2, 3$ y $f =$ grados de libertad del error. Finalmente se emplea la fórmula:

$$R_p = r_{\alpha}(p, f) \times S_{x.j}$$

ANÁLISIS DE LA ALTURA

$$r_{\alpha}(p, f) = \begin{matrix} r_{0,05}(2, 48) = 2,83 \\ r_{0,05}(3, 48) = 2,98 \end{matrix}$$

$$S_{x.j} = (CME / n)^{1/2} = (0,058 / 54)^{1/2} = 0,033$$

De donde:

$$R_2 = 2,83 \times 0,033 = 0,093$$

$$R_3 = 2,98 \times 0,033 = 0,098$$

X	X _{.j}	X _{.j} - X ₁	X _{.j} - X ₂	R _p
X ₃	0,875	0,244 *	0,137 *	0,098
X ₂	0,738	0,107*		0,093
X ₁	0,631			

Donde X₁ : promedio de crecimiento en altura de la especie *Casuarina stricta*.
 X₂ : promedio de crecimiento en altura de la especie *Cassia closiana*.
 X₃ : promedio de crecimiento en altura de la especie *Schinus molle*.
 * : existe significativa diferencia

Por lo tanto los promedios X₁, X₂ y X₃ no son similares en el crecimiento en altura.

ANÁLISIS DEL DIÁMETRO

$$r_{\alpha}(p, f) = \begin{matrix} r_{0,05}(2, 48) = 2,83 \\ r_{0,05}(3, 48) = 2,98 \end{matrix}$$

$$S_{x.j} = (CME / n)^{1/2} = (0,444 / 54)^{1/2} = 0,091$$

De donde:

$$R_2 = 2,83 \times 0,091 = 0,257$$

$$R_3 = 2,98 \times 0,091 = 0,271$$

X	X _{.j}	X _{.j} - X ₁	X _{.j} - X ₂	R _p
X ₃	3,020	1,980 *	1,822 *	0,271
X ₂	1,198	0,158		0,257
X ₁	1,040			

Donde X₁ : promedio de crecimiento en diámetro de la especie *Casuarina stricta*.
 X₂ : promedio de crecimiento en diámetro de la especie *Cassia closiana*.
 X₃ : promedio de crecimiento en diámetro de la especie *Schinus molle*.

* : existe significativa diferencia

Por lo tanto los promedios X_1 y X_2 son similares en el crecimiento en diámetro.

APÉNDICE

1 ANTECEDENTES GENERALES DEL MATERIAL EMPLEADO

1.1 Ubicación Geográfica de la Comuna de Maipú

Maipú forma parte de la Región Metropolitana, sus coordenadas geográficas son 33° 32' lat. Sur y 70° 46' long. Oeste. Tiene 488 m. s. n. m. y se encuentra a 18 Km. de la Plaza de Armas de Santiago. Maipú forma parte de la cuenca del río Mapocho y los principales cursos de agua que lo cruzan son el propio Mapocho y el Zanjón de la Aguada, afluente del anterior. La comuna limita al norte con Pudahuel, al nororiente con Estación Central y Cerrillos, al sur con San Bernardo y Calera de Tango, al poniente con Padre Hurtado y Curacaví. Su territorio cubre una superficie de 135,5 Km.², de la cual 32,1 Km.² corresponden a terrenos urbanizados, 85,2 Km.² a terrenos de uso agrícola y 18,2 Km.² a cerros.

1.2 Clima

Según la clasificación propuesta por Santibáñez y Uribe (1990), corresponde al Distrito Agroclimático 65.2.

1.2.1 Tipo: templado mesotermal estenotérmico, mediterráneo semiárido.

1.2.2 Posición: valle central y valles costero.

1.2.3 Descripción: el régimen térmico se caracteriza por temperaturas que varían, en promedio, entre una máxima en enero de 28,2° C y mínima de julio de 4,4° C. El período libre de heladas es de 231 días, con promedio de 11 heladas por año. Registra 1.621 días-grado y 1.147 horas de frío. El régimen hídrico observa una precipitación media anual de 419 mm., un déficit hídrico de 997 mm. y un período seco de 8 meses. Por la ubicación del distrito, el régimen térmico se caracteriza por veranos calurosos y secos e inviernos fríos, correspondiendo al clima del valle central.

1.2.4 Localidades: Santiago, Calera de Tango, Buin, Paine, Hospital, Maipo, El Monte, Pirque, Padre Hurtado, Talagante, Melipilla y Malloco.

1.2.5 Fórmula Agroclimática: $C_s g_2 - 15.8 \frac{2}{H}$

H 0 10

Tabla 1'. Simbología Climática.

Parámetro	Símbolo	Interpretación	Observaciones
Tipo Climático	C	Clima templado	
Régimen de precipitaciones	s	verano seco	
Régimen de heladas	g ₂	200-299 días libres de heladas	Régimen mesotermal
Régimen térmico global	15	1.500-1.999 días °-año (base 10° C)	Régimen mesotermal
Temp. máx. mes más cálido	8	25,0 – 29,9° C	Estacionalidad térmica
Temp. mín. mes más frío	2	3,0 – 4,9° C	Estacionalidad térmica
Régimen hídrico global	H	8 meses secos	Mediterráneo semiárido
Índice humedad verano	0	0 – 0,099	Extremadamente seco
Índice humedad invierno	10	>= 1,0	Extremadamente húmedo

$$\text{Índice de humedad} = \frac{\text{Precipitación}}{\text{Evapotranspiración Potencial}}$$

1.3 Suelos

1.3.1 Descripción de la Serie de Suelos: corresponden a la Serie Mapocho, con textura franca arcillo limosa. Esta serie es de origen aluvial, con suelos profundos, ocupan la posición de terrazas antiguas y planas del río Mapocho. El horizonte A es pardo oscuro en la superficie y pardo grisáceo oscuro en profundidad, en matices del 10 YR, textura franco arcillo limosa o arcillo limosa, bien estructurado, generalmente con bloques angulares finos y medios moderados, de muy buen arraigamiento y muy buena profundidad. Los horizontes B1 y B2 son pardo rojizo oscuros en matiz del 5 YR, textura arcillo limosa, estructura de bloques medios que pasan de moderados a fuertes en profundidad, de buen arraigamiento y porosidad abundante. Entre el horizonte B2 y B3 se presenta corrientemente una estructura franco arenosa o arenosa de 5 a 10 cm. de espesor, de color pardo oscuro en matices del 7,5 YR, de grano simple, suelto, de buen arraigamiento. El horizonte B3 es de color pardo oscuro con pardo rojizo oscuro (50% cada uno), textura franco arcillo limosa o arcillo limosa, estructura de bloques subangulares finos moderados y de buen arraigamiento. El pedón no presenta indicios de mal drenaje a pesar de hallarse drenado artificialmente.

1.3.2 Posición: la Serie Mapocho es un suelo de topografía de terraza aluvial plana con pendientes dominantes de 1-2%, en riberas del río Mapocho. Están en climas xéricos, precipitación media anual de 330 mm. y temperatura media anual de 14,2° C.

1.3.3 Drenaje: el drenaje es bueno a moderadamente bueno, permeabilidad lenta y escurrimiento superficial moderado. Todos estos sectores tienen nivel freático de alrededor de 1 m o menos.

1.3.4 Uso: su aptitud agrícola es para todo cultivo: frutales, chacras, cereales y pasto de arraigamiento profundo (CNR, 1981).

1.4 Especies Vegetales

1.4.1 *Schinus molle* L. (n. v. “pimiento boliviano”), fam. Anacardiaceae

- **Origen:** típicamente americano, se presenta en valles interandinos del centro de Perú. Gran difusión como ornamental en zonas áridas y semiáridas a nivel mundial. En Perú es una especie forestal de estepas espinosas y bosques montanos bajos.
- **Distribución geográfica:** antiguamente, el pimiento se encontraba en cercanía del agua, ocupando extensas zonas de Centro y Sudamérica, llegando hasta el norte de Argentina. Actualmente se ha extendido por cultivo y asilvestramiento. En Chile crece desde la región de Tarapacá hasta la Región Metropolitana, aunque se ha extendido más al sur por cultivo. No forma asociaciones puras, hallándose ejemplares aislados a lo largo de toda su distribución natural.
- **Variables climáticas:** crece en zonas de alta insolación y muy resistente a la sequía. Su mejor desarrollo lo alcanza con precipitaciones entre 250-600 mm; aunque en el norte de Chile puede crecer en ambientes en extremo áridos, pero con acuíferos subterráneos. Moderadamente resistente al frío, prefiere temperaturas cercanas a 12,8° C o entre 8 y 16,4° C. Las temperaturas máximas promedio son de 26,1° C; es muy tolerante a altas temperaturas, pudiendo resistir largos períodos sobre 34° C.
- **Variables edáficas:** tiene escasas exigencias el pimiento. Es considerada especie vaga en cuanto a requerimientos de suelos, ya que crece en suelos pesados arcillosos a livianos arenosos profundos. Prefiere suelos bien drenados, aunque resiste anegamientos estacionales. Habita en suelos neutros a alcalinos, muy resistente a la salinidad, como lo demuestra su presencia en la pampa del tamarugal.
- **Variables topográficas:** se encuentra en altitudes que varían entre los 10 y 3.500 m. s. n. m. En Perú es frecuente en los valles interandinos del sur, centro y norte, creciendo en hondonadas, quebradas y parte del monte ribereño, encontrándose prácticamente en toda la cordillera de Los Andes del Perú. Puede crecer en la costa en terrenos desérticos, médanos y quebradas secas.

- **Importancia y Usos:** las ventajas de su cultivo se basan en la gran plasticidad edáfica y climática y a su rápido crecimiento, lo que permite su aplicación en diversos usos. Se asocia con cultivos agrícolas en linderos, cortinas cortavientos, protección de riberas, conservación de cuencas, etc. Por su fácil y económica propagación, es una importante especie ornamental para terrenos urbanos y rurales. Se usa frecuentemente como árbol urbano y en bordes de carreteras, destacándose por su resistencia a la contaminación y a la escasa demanda de riego.

1.4.2 *Cassia closiana* Phil. (n. v. “quebracho”), subfam. Cesalpinioideae, fam Leguminosae

- **Descripción taxonómica:** árbol o arbusto de 2-6 m. de altura, glabro. Hojas coriáceas, ligeramente pubescentes, de hasta 10 cm. de longitud, pecíolos de 1,5-2 cm. de longitud; folíolos 6-7 pares, oblongo-elípticos, de 2,5-4 cm. de longitud; ápice más o menos escotado, base asimétrica, sólo los dos folíolos inferiores llevan entre ellos una glándula cilíndrica, ápice agudo, de 3 mm. de longitud. Estípulas lineal lanceoladas. Inflorescencia corimboso-racimosa, igual o mayor que las hojas. Flores amarillas. Sépalos 5, glabros o escabros en la base. Corola con los 5 pétalos subyúgales. Estambres fértiles 6-7, largos 2-3, cortos 3-4; estaminodios 3-4. Ovarios ligeramente pubescentes casi hasta el ápice. Legumbre arqueada, indehiscente, con tabiques transversales, de 6-9 cm. de longitud por 0,5 cm. de ancho.
- **Distribución geográfica:** especie chilena que habita en la provincia de Santiago y litoral de Aconcagua, Valparaíso, Colchagua, etc. Su área de preferencia es la Quebrada de la Plata en Rinconada de Lo Cerda, comuna de Maipú.

2 EL AGUA SERVIDA Y SU CARACTERIZACIÓN

2.1 Contaminación de las aguas

Las actividades y fuentes de contaminación acuática de mayor importancia son: las aguas residuales urbanas, los efluentes industriales, las aguas de escorrentía generadas por las actividades terrestres (por ejemplo, las explotaciones agrarias), la deposición de la contaminación atmosférica, los lixiviados generados por los vertederos y por las explotaciones mineras.

Las fuentes de contaminación pueden clasificarse en dos tipos principales:

a) Fuentes puntuales o localizadas

Son aquellas fuentes que vierten sustancias contaminantes en el interior de un sistema acuático a través de puntos concretos. Estos puntos pueden ser conducciones, acequias, colectores y otros. Las

fuentes puntuales suelen estar asociadas a un único emisor (fábricas, industrias, estaciones de depuración de aguas residuales, etc.), por lo que son fácilmente identificables y controlables.

b) Fuentes no puntuales o dispersas

Son aquellas fuentes que vierten sustancias contaminantes en el interior de un sistema acuático de forma no conducida, a través de un área considerable. Dentro de este grupo se engloban las aguas de escorrentía o las que fluyen a través de filtraciones del terreno. Entre los ejemplos más comunes encontramos granjas, cultivos, jardines, solares en construcción, vías terrestres de comunicación, vertederos, etc. Estos efluentes procedentes de las aguas de lluvia y de riego, suelen contener restos de productos fitosanitarios, fertilizantes, aceites, gomas, metales pesados, etc. La polución que originan es de difícil control, ya que su descarga no está localizada en un punto. Una de las mayores dificultades que entraña su identificación, es el hecho de que la polución se puede manifestar en lugares alejados de la fuente no puntual; por otra parte, los efectos negativos se pueden manifestar al cabo de varios años de haberse producido el vertido, ya que el suelo retiene los elementos contaminantes y retarda su detección.

2.2 Definición de tratamiento de aguas servidas

Consiste en remover las sustancias o elementos contaminantes del afluente a la planta, de acuerdo a las características deseadas en el efluente. Esta remoción puede llevarse a cabo mediante procesos de tipo físico, biológico y químico (EMOS S.A., 1998; Homsí, 1990).

El objetivo de los tratamientos de depuración del agua servida o residual es el de separar y concentrar o transformar los diferentes tipos de contaminación presentes, para garantizar la calidad que exige la legislación para poder verter agua depurada al cauce final receptor. Esta depuración se lleva a cabo a través de una serie de etapas u operaciones unitarias secuenciadas, las cuales pueden desarrollarse, todas o algunas de ellas, en el mismo lugar de producción del agua residual o en plantas centralizadas al servicio de varios usuarios, por ejemplo, depuradoras donde se tratan conjuntamente aguas residuales de origen urbano y de origen industrial (EMOS S.A., 1998; Homsí, 1990).

2.3 Tipos de tratamiento

El tratamiento de los residuos en general, se puede hacer según tres métodos diferentes:

a) Dilución o eliminación

Su objetivo es conseguir que la concentración final de contaminante sea la correcta para el ambiente, lo cual se logra diluyendo los contaminantes en las mismas aguas de la corriente receptora. Un ejemplo típico son los emisarios submarinos que conducen los contaminantes hasta corrientes profundas y alejadas, en donde se diluyen.

b) Acumulación o inyección en el terreno

Los contaminantes son inyectados en cajas sedimentarias del terreno, entre capas totalmente impermeables. Este método no se debe practicar si existen aguas subterráneas.

c) Concentración o tratamiento específico

Consiste en la aplicación de un tratamiento físico, químico o biológico, según sea la caracterización de las sustancias contaminantes a eliminar, de forma que se produzca una concentración de los contaminantes. El ejemplo más claro de este sistema es el tratamiento de las aguas residuales.

Desde el punto de vista de los mecanismos aplicados a la descontaminación del agua, existen dos tipos básicos de sistemas que pueden usarse: tratamiento natural y tratamiento convencional. En el primero se aprovechan elementos naturales como la temperatura, acción solar y vientos, empleando un mínimo de mecanización. Ejemplos son las lagunas facultativas y las lagunas anaeróbicas; también se acostumbra incluir en esta categoría a las lagunas aireadas, debido a su bajo grado de mecanización. Las plantas que usan estos sistemas consumen relativamente poca energía, sin embargo, son difíciles de controlar y ocupan grandes extensiones de terreno (EMOS S.A., 1998; Homsí, 1990).

En el tratamiento convencional se cuenta con procesos unitarios mecanizados. Las tecnologías más conocidas de este tipo son los lodos activados y los filtros biológicos. En ellos se requiere una menor superficie y es posible ejercer un mayor grado de control, pero se consume mucha energía (EMOS S.A., 1998; Homsí, 1990).

Los tratamientos también se distinguen por su intensidad. Existe un tratamiento preliminar, en donde se eliminan las basuras y material particulado grueso a través de cribas o rejillas; con esto se evita el deterioro de bombas, cañerías, estanques y otros dispositivos. Luego sigue un tratamiento primario de sedimentación aeróbica y/o anaeróbica del material particulado. A continuación se tiene el tratamiento secundario, el que incluye sedimentación secundaria y tratamiento biológico; en esta etapa se tienen alternativas tales como filtros percoladores, lodos activados, zanjas de oxidación y lagunas de estabilización. Finalmente, puede aplicarse un tratamiento terciario consistente en desinfección con hipoclorito de sodio (Homsí, 1990).

2.4 Caracterización de las aguas servidas

Las etapas de depuración a aplicar dependen de las características del agua a tratar y del grado de depuración que se quiere conseguir, el cual será función del destino del agua tratada (consumo, vertido,

etc.). Para poder determinar cuál es el proceso más adecuado y efectivo, se deben caracterizar las aguas residuales. Los parámetros a utilizar son los siguientes:

a) Variación del caudal de las aguas respecto del tiempo

Constituye un parámetro fundamental para dimensionar la planta depuradora y seleccionar la maquinaria adecuada.

b) Parámetros organolépticos: sabor, olor, turbidez y color

Pueden dar una indicación sobre el origen de las aguas y, en algunos casos, nos pueden ahorrar muchos análisis intermedios. Ejemplos: un color amarillo-rojizo delata un alto contenido de hierro en el agua; el olor a huevos podridos indica que el agua contiene ácido sulfhídrico (H_2S) proveniente de agua industrial o urbana; el agua salada nos señala la presencia de agua marina en un acuífero o de una disolución de sales procedentes de una mina cercana; el agua turbia, esto es, con alto contenido de sólidos en suspensión, puede deberse al paso de esta agua por un terreno arcilloso.

c) Sólidos totales

Analíticamente, se definen como la materia que se obtiene como residuo tras someter un volumen conocido de agua a un proceso de evaporación a 103-105°C. Dentro de los sólidos totales se distinguen dos fracciones:

c.i) Sólidos filtrables: son partículas de diámetro menor a 0,1 mm. Es el conjunto de sólidos en disolución y partículas en dispersión coloidal. Los sólidos en disolución se caracterizan por precipitar al ser sometidos a una reacción química y pueden tener un origen natural (sales disueltas y aniones), o bien artificial (originados por la acción humana). Por su parte, los coloides son muy livianos, por lo que se mantienen suspendidos por las corrientes convectivas y tienen carga eléctrica asociada que les impide unirse para sedimentar.

c.ii) Sólidos no filtrables: son partículas de diámetro mayor a 0,1 mm. Constituyen los sólidos en suspensión que tienen tendencia a sedimentar, pero no lo pueden hacer debido a la velocidad y turbulencias del agua. Este concepto se relaciona con los sólidos sedimentables, los cuales son los que sedimentan en un recipiente de forma cónica (“Cono de Imhoff”) en el transcurso de un período de 60 minutos. Constituye una medida aproximada de la cantidad de lodo que se obtendrá en la decantación primaria del agua residual y, por lo tanto, es de gran ayuda para dimensionar dicho tratamiento.

A su vez, los sólidos pueden clasificarse en:

c.iii) Sólidos volátiles: son sólidos orgánicos que a 550°C se oxidan y desaparecen como gas.

c.iv) Sólidos fijos: forman los sólidos que a 550°C quedan en forma de cenizas.

d) Contenido de materia orgánica

Se mide, en la mayoría de los casos, en función de la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y de la Demanda Química de Oxígeno (DQO).

d.i) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): es la cantidad de oxígeno disuelto, expresado en mg/l o ppm, en una muestra de agua, que es utilizado por los microorganismos para realizar la oxidación bioquímica de la materia orgánica biodegradable contenida en la muestra. Frecuentemente se mide el oxígeno disuelto en la muestra después de una incubación de cinco días, de lo que se obtiene el parámetro llamado DBO⁵, período en el cual se estima que un 60-70% de la materia orgánica se ha disuelto. Este parámetro permite, entre otras posibilidades: determinar la cantidad aproximada de oxígeno necesario para la estabilidad biológica de la materia orgánica; dimensionar las instalaciones de tratamiento de aguas servidas; medir la eficacia de algunos procesos y comparar los índices obtenidos con los valores de descarga permitidos.

d.ii) Demanda Química de Oxígeno: este método se basa en realizar la oxidación de la materia orgánica, biodegradable y no biodegradable, mediante un reactivo químico oxidante, como el dicromato de potasio, en medio ácido, a elevada temperatura y en presencia de un catalizador, por ejemplo el sulfato de plata, para facilitar la oxidación de ciertos compuestos orgánicos. Esta determinación es más rápida que la DBO⁵, sólo tres horas, y se puede aplicar en aguas que contienen compuestos tóxicos para los microorganismos, en cuyo caso la DBO⁵ daría valores mucho menores a los reales (OMS, 1989).

La tabla 2' muestra una clasificación empírica del grado de contaminación del agua servida. En el agua servida de origen doméstico la DBO⁵ fluctúa entre 200-400 mg/l, en tanto que el mismo parámetro en el agua residual de una industria alimentaria supera los 1.000 mg/l.

Tabla 2'. Grado de contaminación de las aguas de acuerdo a DBO⁵ Y DQO.

Parámetro	Contaminación del Agua			
	Débil	Media	Fuerte	Muy Fuerte
DBO ⁵ (mg/l)	<200	350	500	>750
DQO (mg/l)	<400	700	1.000	>1.500

Fuente: OMS, 1989.

2.5 Normas de calidad de las aguas

Parte del trabajo de la Comisión Nacional del Medio Ambiente CONAMA, ha estado centrada en la determinación de estándares de calidad de las aguas para lograr una calidad deseada para los usos a que se asignen los cauces y cuerpos de agua. La principal norma en torno a los recursos hídricos es la Norma Chilena Oficial N° 1.333, denominada “Requisitos de calidad del agua para diferentes usos”. En ella se establecen requisitos para los siguientes usos de las aguas:

- Agua para consumo humano
- Agua para bebida de animales
- Riego
- Recreación y estética
- Vida acuática

Las normas para agua de consumo humano y de bebida para animales están remitidas a la Norma N.º 409 que se refiere a los requisitos de agua potable. Los requisitos que establece son de orden físico, químico, radiactivo y bacteriológico y se aplica al agua potable de cualquier fuente de abastecimiento. Se destacan los requerimientos de ausencia de olor y sabor, la ausencia de coliformes fecales, el control de la turbiedad, color y contenido de sales, y los límites permitidos para el cloro y flúor.

Para el riego, los requisitos químicos se refieren a los siguientes aspectos:

- pH, el que debe estar entre 5,5 y 9,0;
- Restricción a varios elementos químicos;
- Pesticidas, incluyendo herbicidas e insecticidas;
- Conductividad específica y sólidos disueltos totales;
- Razón de adsorción de sodio.

Asimismo, los requisitos bacteriológicos para riego establecen un máximo de 1.000 coliformes fecales en 100 ml, en cultivos a ras de suelo y que habitualmente se consumen crudos.

Para el agua de uso estético, se establecen las sustancias de que debe estar exenta el agua:

- Materias que sedimenten formando depósitos objetables;
- Desechos flotantes, aceites, espuma u otros sólidos;
- Materias en concentraciones o combinaciones que sean tóxicas o que produzcan reacciones indeseables en personas, animales y plantas;
- Sustancias y condiciones que produzcan vida acuática indeseable.

En el caso de agua para recreación con contacto directo, se establecen los siguientes valores:

- Sólidos flotantes visibles y espumas no naturales: ausentes;
- Aceites flotantes y grasas: 5 mg/l como máximo;
- Aceites y grasas emulsificadas: 10 mg/l como máximo;

- Sustancias que produzcan olor o sabor inconvenientes: ausentes.

Para los usos recreacionales con contacto directo, se agregan a los anteriores los siguientes requisitos:

- pH: 6,5 a 8,3 (pudiendo variar entre 5,0 y 9,0 si hay variaciones en condiciones naturales);
- Temperatura: 30 °C como máximo;
- Claridad: visualización de discos Secchi a 1,20 m de profundidad;
- Color: 100 unidades Escala Pt-Co como máximo y ausencia de colorantes artificiales;
- Turbiedad: 50 unidades Escala Sílice como máximo;
- Coliformes fecales: 1.000/ml como máximo;

Con respecto al agua dulce para la vida acuática, se disponen los siguientes requisitos:

- Oxígeno disuelto: 5 mg/l como mínimo;
- pH: 6,0 a 9,0
- Alcalinidad total: 20 mg/l de CaCO₃ como mínimo;
- Turbiedad debido a descargas: no debe aumentar el valor natural en más de 30 unidades Escala Sílice;
- Temperatura: no debe aumentar el valor natural en más de 3 °C;
- Ausencia de colores filtrantes
- Ausencia de sólidos flotantes visibles y espumas no naturales,
- Sólidos sedimentables: no deben exceder el valor natural;
- Ausencia de petróleo o cualquier tipo de hidrocarburo

Además, existen otros límites de naturaleza toxicológica para pesticidas, metales pesados, cianuros, tóxicos acumulativos y detergentes (Brown et al., 2000).

Aparte de los estándares de calidad, sólo se han promulgado Normas de Emisión que apuntan a controlar la calidad de los vertidos industriales o aguas servidas domiciliarias sobre cuerpos superficiales. Sin embargo, hacen falta Normas de Calidad Primarias y Secundarias, las cuales definirán los valores máximos o mínimos permisibles de elementos, compuestos, radiaciones, vibraciones o combinaciones de éstos que constituyan un riesgo para la población (Normas Primarias) o para la protección y conservación del medio ambiente y la naturaleza (Normas Secundarias).

La calidad del agua superficial está condicionada por algunas características de los sistemas hidrográficos, tales como:

- Las condiciones de aridez o semiaridez de una porción significativa del territorio, elevando los niveles de salinidad de las aguas naturales, lo que restringe o anula la posibilidad de dilución de contaminantes.

- El corto recorrido de los ríos, producto de la escasa extensión transversal del territorio nacional, impidiendo la acumulación en un cauce único de los contaminantes originados en áreas extensas.
- La heterogénea distribución espacial de la población y actividad industrial, concentrada principalmente en la Región Metropolitana, Valparaíso - Viña del Mar y Concepción.
- Importancia de actividades mineras, agrícolas y forestales en el desarrollo nacional.

En el aspecto de aguas superficiales, los factores que deterioran la calidad del agua son las descargas de aguas servidas y los residuos industriales. Los primeros están conectados con las zonas de mayor crecimiento demográfico (cuencas de ríos como Elqui, Aconcagua, Maipo, Mapocho, Rapel, Maule, Biobío y Valdivia, entre otros), en tanto que las descargas industriales están ligadas a actividades económicas como la minería del cobre, fábricas de celulosa y papel y las industrias pesqueras (cuencas de los ríos Maipo, Aconcagua, Andalién y Biobío, principalmente).

Con respecto a las aguas subterráneas, la calidad de los recursos se ha determinado a nivel de provincias y subprovincias, según la división indicada. La tabla 3' indica los niveles de concentración de sólidos disueltos totales (SDT). Según esta tabla, la calidad del agua sufre gran deterioro en el Norte del país, por efecto de la salinidad y la aridez de la zona.

Las cuencas afectadas por la contaminación se detallan en la tabla 4', señalando indicadores estándar de calidad de agua de estos cauces.

El deterioro de la calidad de las aguas está siendo cada vez más importante en el país, lo que ha generado gran preocupación por lo que significa compatibilizar el desarrollo y el cuidado del medio ambiente, unidos desde el punto de vista del desarrollo sustentable (Brown et al., 2000).

Tabla 3'. Calidad de aguas subterráneas en principales acuíferos.

Provincia Hidrogeológica	Subprovincia	Calidad del Agua [mg/l SDT]	Observaciones
Altiplánica	-	aprox. 500	En general buena, excepto en sus terminales (salares)
Andina Vertiente Pacífico	Norte Grande (18° - 19° S)	600 - 2.400	Desde buena a regular
	Norte Grande (19° - 22° S)	2.000 - 10.000	En deterioro en dirección NE-SW, alcanzando los salares
	Norte Grande (22° - 27° S)	800 - 2.000	Desde buena a regular
	Valles Transversales	< 500 - 2000	Buena en la cabecera de los ríos, y en gradual deterioro hacia el sector costero
	Central - Sur	< 500	Excelente
	Zona de los Canales	-	Buena calidad para uso doméstico
	Pampa Magallánica	< 700	Buena calidad para fines domésticos y bebida para el ganado
Cuencas Costeras	Costeras Arreicas	-	No hay recursos
	Costeras Exorreicas	500 - 1.000	Regular por intrusión salina, solo para uso doméstico

Fuente: Brown, E. et al., 2000.

Tabla 4'. Calidad de aguas superficiales en cuencas más importantes.

Sistema Hidrográfico	Nombre de Cuenca	DBO ₅ [ton/mes]	Sól. Suspendidos [ton/mes]	Col. Fecales (x 10 ¹⁷ coll/)
Pacífico Seco	Río Salado	43,1	66,3	0,49
	Cuencas costeras entre Ríos Salado y Copiapó	273,8	306,4	0,06
	Río Copiapó	127,4	8,4	1,30
	Río Huasco	68,2	3,3	0,20
	Río Elqui	83,0	40,6	0,30
	Cuencas costeras entre Ríos Elqui y Limarí	200,5	-	1,50
	Río Limarí	99,4	54,1	1,48
Chile Central	Río Choapa	33,9	16,4	0,50
	Río La Ligua	21,6	-	0,05
	Cuencas costeras entre Ríos La Ligua y Aconcagua	405,9	92,6	2,90
	Río Aconcagua	2.018,0	1.151,9	6,15
	Cuencas costeras entre Ríos Aconcagua y Maipo	1.552,3	369,9	4,01
	Río Maipo	4.239,5	2.488,6	1,50
	Río Rapel	471,2	89,4	10,16
	Río Mataquito	188,6	57,7	1,23
	Río Maule	1.284,3	1.140,5	2,90
	Río Itata	1.022,7	807,6	0,58
	Cuencas costeras entre Ríos Itata y Biobío	1.696,3	908,4	-
	Río Biobío	2.237,3	2.157,0	0,24
	Cuencas costeras entre Ríos Biobío y Carampangue	1.415,5	1.214,5	-
Río Carampangue	1.207,9	696,8	0,03	
Pacífico Sur	Río Imperial	346,1	7,0	1,10
	Río Toltén	40,1	2,9	0,14
	Río Valdivia	154,4	42,5	8,90
	Río Bueno	512,8	485,9	0,75
	Cuencas costeras entre Ríos Bueno y Puelo	191,6	34,0	1,37
	Cuencas costeras entre Ríos Puelo y Yelcho	2,7	-	0,02
	Aysén	45,6	1,7	0,37
	Península e Isla entre Fiordo Peel y Estero Sarmiento hasta Golfo A.M.	19,1	8,1	-
	Península entre Seno Otway y Estrecho de Magallanes	219,2	43,5	0,47
	Isla de Tierra del Fuego	13,2	6,3	-

Fuente: Brown, E. et al., 2000.

2.6 Análisis rutinarios rápidos de materias vegetales. Medición de nitrógeno en las hojas

El método más frecuentemente utilizado para la determinación de nitrógeno es el de Kjeldahl. Si la muestra a analizar es grande, en el ámbito de gramos, se habla de un *macro Kjeldahl*, mientras que si se trata de muestras mucho más pequeñas, se denomina *micro Kjeldahl*. Son innumerables las variaciones y modificaciones que se han sugerido a partir del método original; éstas se refieren al aspecto químico –ya sea la composición de la solución digestiva, o la recolección y titulación del amoníaco destilado- como a la construcción del aparato mismo. Para análisis de rutina de nitrógeno es esencial que el procedimiento utilizado sea lo más rápido posible, sin sacrificar la exactitud necesaria (Müller, 1961).

2.6.1 Descripción del aparato de Kjeldahl

Éste consta de un aparato de digestión y uno destilador. El primero está formado de dos componentes: un calentador eléctrico y un sistema de extracción de gases. El calentador está confeccionado gracias a la inclusión, mediante presión, de un trozo de arcilla refractaria sobre un molde simple de madera antes de calcinarla. Las dimensiones interiores de la abertura del cuerpo son de 36,5 X 6 cm en la parte superior y de 34,5 X 4,5 cm en el fondo. La inclinación hacia adentro, que se obtiene de esta manera, facilita la colocación de los frascos. En el fondo del cuerpo del calentador hay tres surcos o canales a todo lo largo, de unos 9 mm de profundidad y 6 mm de ancho, los que proveen espacio para la resistencia eléctrica, la que está colocada en los dos surcos exteriores. Cada calentador tiene capacidad para ocho frascos Kjeldahl Pyrex de 30 ml. Si se desea, la cantidad de calor puede ser regulada mediante un transformador o resistencia variable. El sistema extractor de gases está confeccionado en base a una lámina de plomo. Antes de enrollarla para formar el tubo, se hacen huecos a intervalos de 4 cm con un perforador de corchos de 20 mm de diámetro. Un surco, que se hace por presión, sirve como colector de los líquidos de condensación que se eliminan a través de un orificio. El extractor forma una “T” con otro tubo que contiene en su interior un cono, cuya concentración en diámetro provoca la succión de aire. Este tubo transversal y el cono también están hechos de una lámina de plomo. Para un manejo fácil y seguro de un número grande de frascos Kjeldahl simultáneamente, han demostrado ser muy satisfactorios unos soportes de madera con capacidad para sujetar ocho frascos de 30 ml cada uno. Estos soportes son hechos de dos tablas unidas formando una “L”. El filo interior y superior de la tabla vertical de la “L” tiene unos bloques separadores de madera entre las muescas para colocar el cuello del frasco Kjeldahl.

Por su parte, la destilación con arrastre se produce en un frasco para filtración al vacío de un litro. La cantidad de vapor producida puede ser fácilmente regulada con la ayuda de un transformador variable. El frasco de filtración está rodeado de un material aislador dentro de una caja de madera. El aparato de destilación completo está agrupado alrededor de un soporte de metal grande colocado enfrente de una unidad de generación de vapor, la cual descansa sobre un soporte de madera separado (Müller, 1961).

2.6.2 Parte experimental

Todos los reactivos son de grado analítico. Se emplean los siguientes: solución de digestión, solución de hidróxido de sodio, solución indicadora de ácido bórico y ácido sulfúrico valorado 0,0025 N.

El procedimiento comienza con la colocación de una cantidad adecuada de material vegetal seco y molido (preferentemente 100 mg), en un disco de papel. Este disco se dobla con el contenido y se introduce dentro del frasco Kjeldahl de 30 ml. Se agregan 2 ml de la solución digestiva agitada. Se deja digerir el material al menos una hora. Se enfría completamente y se diluye con agua destilada a más o menos la mitad del bulbo del frasco y se agita bien. La muestra dentro del frasco se somete al proceso de destilación en el aparato pertinente. Una vez completado el proceso, se van poniendo todos los frascos Kjeldahl que contengan muestras. En seguida, se titula con la solución indicadora del ácido bórico con el ácido sulfúrico hasta que se obtenga el mismo color (generalmente gris azulado) que aquél de una muestra en blanco que se prepara, diluyendo la misma cantidad de solución indicadora de ácido bórico, con agua destilada a aproximadamente el volumen promedio por muestra después de la titulación. Generalmente se requiere una muestra en blanco para todas las titulaciones. El cálculo de la cantidad de nitrógeno es como sigue:

$$\text{Nitrógeno en mg} = V \times 0,35 \times \frac{N}{0,025}$$

V = volumen usado del ácido

N = normalidad del ácido usado

Para acelerar los cálculos, después de la titulación del ácido puede calcularse un factor (f) de esta ecuación, el que, cuando se multiplica por la cantidad en ml de ácido usado en titular la muestra, dará la cantidad de nitrógeno en mg.

$$f = 0,35 \times \frac{N}{0,025}$$

Los mejores resultados con el aparato de Kjeldahl han sido obtenidos con material vegetal que contenía entre 0 y 6 por ciento o más (0-6%) de nitrógeno. Aunque el aparato fue diseñado principalmente para análisis foliares de rutina, ha sido ampliamente usado para otros materiales vegetales, tales como raíces, tubérculos, frutos, etc., asimismo, para análisis de proteínas en forrajes y concentrados mezclados. Su exactitud es excelente y suficiente para la mayor parte del trabajo de rutina. Es importante analizar las muestras en duplicado, especialmente si el material de la muestra no es uniforme en composición.

La mayoría de las plantas contienen poco o nada de nitrógeno en forma de nitrato. Así, el método es satisfactorio. Si tiene que ser incluido el nitrógeno en forma de nitrato, serán necesarias modificaciones en el procedimiento de digestión, usando ya sea ácido o-thiol benzoico, ácido salicílico o algún otro agente reductor, tal como el hierro metálico (Müller, 1961).