

FITORREMEDIACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE  
LIXIVIADOS PRODUCIDOS EN EL COMPOSTAJE DE  
BIOSÓLIDOS MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES  
DE VETIVER [*Chrysopogon zizanioides* (L.) Roberty]

Azcona, Cristian Darío

Proyecto Final Integrador

Ingeniería Ambiental

Junio 2015





FITORREMEDIACIÓN Y REUTILIZACIÓN DE LIXIVIADOS  
PRODUCIDOS EN EL COMPOSTAJE DE BIOSÓLIDOS  
MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES DE VETIVER  
[*Chrysopogon zizanioides (L.) Roberty*]

**Proyecto Final Integrador**

**Ingeniería Ambiental**

Autor: Azcona, Cristian Darío

Directora: Ing. Silvia Dutrús

Requisito para optar al título de Ingeniero Ambiental

UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO NEGRO

SEDE ANDINA

SAN CARLOS DE BARILOCHE

JUNIO 2015



## Resumen

La fitorremediación es el conjunto de técnicas en las que se utilizan plantas para degradar, extraer, contener o inmovilizar contaminantes del suelo y el agua. En el caso de efluentes cloacales y de agroindustrias, los humedales artificiales son los diseños más comunes para el tratamiento por fitorremediación, diseñados con el propósito de emular las condiciones naturales de los ecosistemas de humedales, y aprovechar de forma controlada su capacidad intrínseca de autodepuración.

Actualmente en la ciudad de San Carlos de Bariloche los lodos de la planta depuradora de aguas residuales son transportados a un predio alejado del casco urbano y tratados mediante compostaje a cielo abierto en pilas con volteo. En el proceso se producen lixiviados que son captados y almacenados en tanques hasta que son transportados nuevamente a la planta depuradora para su tratamiento, lo que resulta costoso y no está exento de riesgos ambientales.

En este trabajo se propone una alternativa de tratamiento para estos lixiviados, mediante humedales artificiales con reutilización del efluente tratado. Se ha elegido la especie *Chrysopogon zizanioides*, comúnmente conocida como *Vetiver*. Si bien en nuestro país existen pocos antecedentes, esta gramínea exótica no invasiva es ampliamente utilizada en proyectos de fitorremediación y bioingeniería a escala mundial, debido a sus características morfológicas y fisiológicas.

Inicialmente se caracterizaron los lixiviados mediante análisis físicos, fisicoquímicos, químicos y microbiológicos, y se encontró que los volúmenes generados y la concentración de contaminantes varían a lo largo del año, principalmente debido a las precipitaciones. Luego se analizó la tolerancia de la especie al contaminante mediante ensayos de crecimiento vegetal bajo riego con diferentes concentraciones, analizando los sustratos de crecimiento y tejido vegetal en cada caso. Las plantas utilizadas se desarrollaron normalmente aun siendo regadas con los lixiviados más concentrados.

Teniendo en cuenta estos resultados y los parámetros de vuelco para riego forestal con efluentes tratados, se diseñó el sistema de tratamiento utilizando modelos matemáticos basados en las eficiencias de remoción teóricas para los diferentes contaminantes en los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal. El diseño propuesto, adecuado a la infraestructura y el espacio disponible, consta de dos humedales en serie y un estanque de almacenamiento del líquido tratado a fin de poder utilizarlo en los meses de déficit hídrico.

Finalmente se realizó la evaluación del proyecto propuesto en términos del impacto ambiental previsto y la conveniencia económica en comparación al tratamiento actual, para lo cual se definió el marco legal vigente, la caracterización ambiental del sitio y el presupuesto estimado para la obra.



## *Agradecimientos*

En primer lugar quiero agradecer a mi familia, su apoyo y acompañamiento constantes fueron fundamentales para alcanzar esta meta; y a mis amigos, por todos los momentos compartidos y todos los que vendrán. También agradezco a todo personal de la Universidad Nacional de Río Negro, docentes y no docentes, a quienes tuve el agrado de conocer estos años de mi formación académica.

Quiero expresar mi agradecimiento a todas las personas que han colaborado con este trabajo, especialmente a:

- Silvia Dutrús, mi directora, por el tiempo y el esfuerzo dedicado, por confiarme sus Vetiver para el ensayo de crecimiento vegetal y por sus aportes para la culminación de este trabajo.
- Francis Laos, coordinadora de la carrera de Ingeniería Ambiental, por sus valiosos consejos, su colaboración en el laboratorio y su determinación para solucionar todos los problemas que fueron surgiendo durante el desarrollo del trabajo.
- Fernando Martín y Marcelo Tomasello, de la Planta de Tratamiento de Líquidos Cloacales de Bariloche (CEB), por la información suministrada, la confianza y excelente predisposición.
- Gabriela Perren y Luciano Álvarez Soria, de la Universidad Nacional de Río Negro, por su paciencia ante las incontables inquietudes que me surgieron mientras trabajaba en el laboratorio de la universidad.
- Patricia Satti, María Paula Crego y Marina González Polo, del Centro Regional Universitario Bariloche, por su enorme ayuda en la determinación de los cationes en el tejido vegetal.
- Alejandro Murcia, del Laboratorio de Bromatología de Villa La Angostura, por su aporte en la caracterización microbiológica de los lixiviados.
- Martín Nini, del Departamento Provincial de Aguas, por su valiosa contribución con los datos de precipitaciones de Bariloche.

Finalmente, quiero mencionar mi sincero agradecimiento al Estado Nacional Argentino por darme la posibilidad de acceder a la educación pública y brindarme prácticamente de forma constante apoyo económico para lograr este objetivo que me llena de orgullo y satisfacción.



# Índice general

1. Introducción	1
<hr/>	
2. El compostaje de lodos cloacales	5
<hr/>	
2.1. El proceso de compostaje	7
2.1.1. Etapas del proceso de compostaje	7
2.1.2. Condiciones óptimas	9
2.1.3. Modificaciones del material durante el proceso	10
2.1.4. Estabilidad y madurez del compost	11
2.1.5. Sistemas de compostaje	11
2.2. Los lodos cloacales	12
2.2.1. El compostaje como sistema de tratamiento de lodos	13
2.2.2. El marco regulatorio para el compostaje de lodos	14
2.2.3. La generación de lixiviados durante el compostaje	15
2.3. El caso de San Carlos de Bariloche	17
<hr/>	
3. Fitorremediación por medio de humedales artificiales	23
<hr/>	
3.1. La fitorremediación	25
3.2. Humedales naturales y artificiales	25
3.3. Componentes de un humedal artificial	26
3.3.1. Efluente	26
3.3.2. Sustrato	27
3.3.3. Vegetación	28
3.3.4. Microorganismos	31
3.3.5. Animales	31
3.4. Clasificación de los humedales artificiales	32
3.4.1. Humedales de flujo libre	32
3.4.2. Humedales de flujo subsuperficial horizontal	33
3.4.3. Humedales de flujo subsuperficial vertical	34
3.5. Mecanismos de remoción de contaminantes	35

3.5.1. Sólidos suspendidos totales	36
3.5.2. Carbono	37
3.5.3. Nitrógeno	40
3.5.4. Fósforo	43
3.5.5. Patógenos	45
3.5.6. Metales pesados	47
<hr/>	
4. El sistema Vetiver	49
<hr/>	
4.1. Antecedentes del sistema Vetiver	51
4.2. Características de la especie	52
4.3. Adaptabilidad y tolerancia de la especie	53
4.3.1. Condiciones climáticas	53
4.3.2. Condiciones edáficas	54
4.3.3. Tolerancia a contaminantes	55
4.4. El sistema Vetiver para el tratamiento de efluentes	56
<hr/>	
5. Reutilización de efluentes tratados para riego	59
<hr/>	
5.1. La reutilización planificada	61
5.2. Normativas de calidad para los diferentes usos	62
<hr/>	
6. Objetivos e hipótesis	67
<hr/>	
6.1. Objetivo general	69
6.2. Objetivos específicos	69
6.3. Hipótesis	69
<hr/>	
7. Metodología	71
<hr/>	
7.1. Características del trabajo	73
7.2. Investigación	73
7.2.1. Caracterización de lixiviados	73
7.2.2. Ensayo de crecimiento vegetal	77
7.2.3. Caracterización del sustrato de crecimiento	80

7.2.4. Caracterización del tejido vegetal	83
7.2.5. Análisis estadístico	83
7.3. Diseño	85
7.4. Evaluación del proyecto	85
<b>8. Análisis de resultados experimentales</b>	<b>87</b>
8.1. Caracterización de lixiviados	89
8.2. Ensayo de crecimiento vegetal	93
8.3. Caracterización del sustrato de crecimiento	97
8.4. Caracterización del tejido vegetal	101
<b>9. Diseño del sistema de tratamiento</b>	<b>105</b>
9.1. Dimensionamiento de humedales	107
9.2. Aspectos hidráulicos	107
9.2.1. Tasa de carga hidráulica	108
9.2.2. Volumen efectivo y tiempo de retención hidráulica	109
9.2.3. Fricción y conductividad hidráulica	110
9.3. Modelos de remoción de contaminantes	110
9.4. Modelo hidráulico de tanques en serie	112
9.5. Modelo P-k-C* de remoción de contaminantes	113
9.6. Diseño del sistema de tratamiento	115
9.6.1. Propuesta de diseño	116
9.6.2. Diseño de los humedales	116
9.6.3. Diseño del estanque de almacenamiento	123
9.6.4. Riego con lixiviados tratados	125
9.6.5. Distribución en planta	127
9.6.6. Consideraciones finales sobre el diseño	127
9.7. Operación, mantenimiento y monitoreo del sistema de tratamiento	131
9.7.1. Operación	131
9.7.2. Mantenimiento	134
9.7.3. Monitoreo	138

10. Evaluación del proyecto	143
10.1. Generalidades	145
10.2. Marco legal	146
10.2.1. Marco internacional	146
10.2.2. Marco nacional	147
10.2.3. Marco provincial	149
10.2.4. Marco municipal	150
10.3. Diagnóstico ambiental	152
10.3.1. Determinación del área de influencia	152
10.3.2. Determinación del área de sensibilidad	153
10.3.3. Línea de base ambiental	153
10.4. Etapas del proyecto	160
10.4.1. Etapa de construcción	160
10.4.2. Etapa de operación	162
10.4.3. Etapa de cierre	163
10.5. Análisis de riesgos	163
10.5.1. Riesgos naturales	164
10.5.2. Riesgos antrópicos	164
10.5.3. Evaluación de riesgos	165
10.6. Impacto ambiental	167
10.6.1. Identificación de los impactos ambientales	167
10.6.2. Evaluación de impacto ambiental	168
10.7. Análisis económico	182
11. Conclusiones	185
12. Bibliografía	189

## Índice de tablas

Tabla 2.1 – Valores límites para los productos derivados de biosólidos según la normativa estadounidense	15
Tabla 2.2 – Características fisicoquímicas y microbiológicas de biosólidos y compost	19
Tabla 2.3 – Rango del contenido de metales pesados en biosólidos y compost (1998-1999) y concentraciones máximas admitidas en biosólidos a nivel internacional y nacional	20
Tabla 3.1 – Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de efluentes	27
Tabla 4.1 – Valores umbrales de tolerancia para diversos metales pesados	56
Tabla 4.2 – Ejemplos de usos del sistema Vetiver en tratamiento de efluentes	57
Tabla 4.3 – Resultados obtenidos en ensayos de humedales para diferentes efluentes	57
Tabla 5.1 – Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de los efluentes tratados aplicados en agricultura según la OMS	62
Tabla 5.2 – Normativa de la USEPA para el riego con efluentes tratados	63
Tabla 5.3 – Parámetros de calidad para la reutilización de aguas residuales tratadas según la Ordenanza Municipal Nº6301 de Puerto Madryn	65
Tabla 8.1 – Lixiviados transportados desde el sitio de generación hasta la planta depuradora y precipitaciones mensuales	89
Tabla 8.2 – Resultados de los análisis realizados a los lixiviados en el laboratorio de la CEB	90
Tabla 8.3 – Resultados de los análisis realizados a los lixiviados en el laboratorio del CRUB	90
Tabla 8.4 – Medias y desvíos estándar por tratamiento para el crecimiento y hojas nuevas en las semanas 3, 7, 10, 12 y 15. Medias y desvío estándar por tratamiento para la biomasa aérea recuperada en los cortes de las semanas 7 y 15	94
Tabla 8.5 – Parámetros medidos sobre el suelo, el compost y la mezcla suelo:compost 2:1 que fue colocada en las macetas del ensayo de crecimiento vegetal	97
Tabla 8.6 – Medias y desvíos estándar por tratamiento para los parámetros medidos en el sustrato de crecimiento de las macetas en los tiempos $t_1$ y $t_2$	98
Tabla 8.7 – Parámetros medidos en el tejido vegetal de los ejemplares de Vetiver antes de iniciar el experimento, y valores de referencia aproximados según la literatura consultada	101
Tabla 8.8 – Medias y desvíos estándar por tratamiento para los parámetros medidos en el tejido vegetal en los tiempos $t_1$ y $t_2$	101
Tabla 9.1 – Parámetros de referencia utilizados para el modelo P-k-C*	116
Tabla 9.2 – Datos meteorológicos utilizados para el modelo P-k-C*, periodo 1982-2004	117
Tabla 9.3 – Resultados del modelo P-k-C* para $H_1=150m^2$ y $H_2=180m^2$	119
Tabla 9.4 – Características de diseño de los humedales	120
Tabla 9.5 – Características del estanque de almacenamiento	123
Tabla 9.6 – Balance de volúmenes estimado para el estanque de almacenamiento	123
Tabla 9.7 – Superficie estimada de riego y cantidad aproximada de plantas para cada mes de déficit hídrico según los requerimientos de la vegetación, agua útil y déficit hídrico mensual	126
Tabla 9.8 – Recomendaciones para la preservación y almacenamiento de muestra líquidas	141
Tabla 9.9 – Análisis recomendados para el sistema de tratamiento	142
Tabla 10.1 – Sensibilidad de los diversos componentes del ambiente considerados	153
Tabla 10.2 – Resumen de datos meteorológicos de S. C. de Bariloche (1982-2004)	157

Tabla 10.3 – Resumen de datos meteorológicos de S. C. de Bariloche (1982-2004)	157
Tabla 10.4 – Resumen de datos meteorológicos de S. C. de Bariloche (1982-2004), excepto Radiación Solar (7 años)	158
Tabla 10.5 – Probabilidad de ocurrencia de riesgos estimada para el proyecto	165
Tabla 10.6 – Propuestas de manejo de riesgos del proyecto	166
Tabla 10.7 – Factores ambientales identificados	167
Tabla 10.8 – Valores asignados a los parámetros del método CRI	169
Tabla 10.9 – Criterio de clasificación de los impactos ambientales	170
Tabla 10.10 – Matriz de identificación de impactos negativos e impactos positivos	171
Tabla 10.11 – Matriz de intensidad de impactos negativos e impactos positivos	172
Tabla 10.12 – Matriz de extensión de impactos negativos e impactos positivos	173
Tabla 10.13 – Matriz de duración de impactos negativos e impactos positivos	174
Tabla 10.14 – Matriz de reversibilidad de impactos negativos e impactos positivos	175
Tabla 10.15 – Matriz de probabilidad de impactos negativos e impactos positivos	176
Tabla 10.16 – Matriz de valores de impacto: positivos, negativos no significativos, negativos significativos y negativos altamente significativos	177
Tabla 10.17 – Propuestas de manejo ambiental del proyecto	180
Tabla 10.18 – Presupuesto estimado de la obra, según cotización de materiales y mano de obra en abril 2015	183

## Índice de figuras

Figura 2.1 – Etapas típicas del compostaje, con énfasis en la temperatura	8
Figura 2.2 – Factores determinantes del compostaje	10
Figura 2.3 – Organización típica de una planta de compostaje	12
Figura 2.4 – Reducción de patógenos en función del tiempo y de la temperatura durante el compostaje de biosólidos mediante pilas con volteo	14
Figura 2.5 – Planta depuradora de líquidos cloacales de S. C. de Bariloche	18
Figura 2.6 – Volquete con lodos deshidratados en la planta depuradora	18
Figura 2.7 – Mezclado de los biosólidos con viruta de madera en la planta de compostaje	19
Figura 2.8 – Plateas de concreto sobre las que se realiza el compostaje	21
Figura 2.9 – Tanque de almacenamiento de lixiviados	21
Figura 2.10 – Ubicación de la planta de compostaje de biosólidos en relación a la planta depuradora de líquidos cloacales y el Centro Cívico de la ciudad	22
Figura 3.1 – Flujo de aire en el carrizo ( <i>Phragmites australis</i> )	29
Figura 3.2 – Esquema básico de un humedal construido de flujo libre	33
Figura 3.3 – Esquema básico de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal	34
Figura 3.4 – Esquema básico de un humedal construido de flujo subsuperficial	35
Figura 3.5 – Procesos de remoción y generación de materia particulada	37
Figura 3.6 – Etapas del fenómeno de <i>clogging</i> en un HSSF	38
Figura 3.7 – Procesos de remoción de nitrógeno	41
Figura 3.8 – Procesos de remoción de fósforo	44
Figura 3.9 – Procesos de remoción de patógenos	46
Figura 4.1 – Pasto vetiver utilizado en la conservación de suelos agrícolas	51
Figura 4.2 – Pasto Vetiver, parte aérea con panículas florecidas y sistema radicular	52
Figura 4.3 – Tolerancia de la planta a incendios forestales	53
Figura 4.4 – Vetiver creciendo en suelo salino (CE 46 mS/cm, pH 7,1 - 7,7)	54
Figura 4.5 – Tolerancia del Vetiver a altas concentraciones de nitrógeno y fósforo	55
Figura 4.6 – Sector de irrigación de Vetiver con aguas residuales de un edificio	58
Figura 4.7 – Sector de irrigación de Vetiver con residuales de una comunidad	58
Figura 7.1 – Determinación de sólidos totales en lixiviados	74
Figura 7.2 – Determinación de nitrógeno total en lixiviados	75
Figura 7.3 – Determinación de amonio en lixiviados	75
Figura 7.4 – Determinación de fósforo reactivo en lixiviados	76
Figura 7.5 – Recuento de coliformes totales	77
Figura 7.6 – Espectrofotómetro DR/2000 utilizado en las determinaciones colorimétricas	78
Figura 7.7 – Ejemplares de Vetiver en $t_0$	79
Figura 7.8 – Ejemplares de Vetiver en $t_2$ , previo al último corte	79
Figura 7.9 – Determinación de conductividad eléctrica en suspensión del sustrato	80
Figura 7.10 – Determinación de fósforo extraíble en suspensión del sustrato de crecimiento	81
Figura 7.11 – Determinación de carbono orgánico en sustrato de crecimiento	82
Figura 7.12 – Respirometría en sustrato de crecimiento	82

Figura 7.13 – Extracción con HCl concentrado calentado hasta evaporación total en cenizas de tejido vegetal	84
Figura 7.14 – Espectrómetro de absorción atómica PerkinElmer AAnalyst 100	84
Figura 8.1 – Lixiviados transportados desde el sitio de generación hasta la planta depuradora y precipitaciones mensuales, datos correspondientes al año 2014	89
Figura 8.2 – Resultados de los análisis realizados a los lixiviados en el laboratorio de la CEB y semana en la que fueron aplicados en el riego de las plantas	92
Figura 8.3 – Medias semanales por tratamiento para el largo máximo alcanzado y las hojas nuevas totales de cada planta	93
Figura 8.4 – Biomasa aérea obtenida por tratamiento en las semanas 7 y 15	94
Figura 8.5 – Crecimiento semanal por tratamiento en las semanas 3, 7, 10, 12 y 15	95
Figura 8.6 – Hojas nuevas por semana por tratamiento en las semanas 3, 7, 10, 12 y 15	96
Figura 8.7 – Parámetros medidos en los sustratos de crecimiento para los diferentes tratamientos en la semana 7	99
Figura 8.8 – Parámetros medidos en los sustratos de crecimiento para los diferentes tratamientos en la semana 15	100
Figura 8.9 – Parámetros medidos en el tejido vegetal para los diferentes tratamientos en la semana 7	102
Figura 8.10 – Parámetros medidos en el tejido vegetal para los diferentes tratamientos en la semana 15	103
Figura 9.1 – Componentes del balance de masas de un humedal	108
Figura 9.2 – El modelo hidráulico de tanques en serie (TIS)	112
Figura 9.3 – Valores estimados de N, P y DBO anuales para diferentes superficies de los humedales, obtenidos del modelo P-k-C*	118
Figura 9.4 – Diseño propuesto para el Humedal 1	121
Figura 9.5 – Diseño propuesto para el Humedal 2	122
Figura 9.6 – Diseño propuesto para el estanque de almacenamiento de lixiviados tratados	124
Figura 9.7 – Distribución en planta recomendada para el sistema de tratamiento	129
Figura 9.8 – Detalle del sistema de tratamiento propuesto	130
Figura 9.9 – Esquema del sistema propuesto y sentido de circulación de los lixiviados	131
Figura 9.10 – Configuración 1, condiciones normales de operación	132
Figura 9.11 – Configuración 2, mínima generación de lixiviados	133
Figura 9.12 – Configuración 3, tareas de mantenimiento	133
Figura 9.13 - Ubicación de los puntos de muestreo	139
Figura 10.1 – Metodología utilizada para la evaluación del proyecto	145
Figura 10.2 – Área de influencia directa del proyecto	154
Figura 10.3 – Área de influencia indirecta del proyecto	154
Figura 10.4 – Detalle del área de influencia del proyecto propuesto	155
Figura 10.5 – Red de drenaje del área	158
Figura 10.6 – Líneas de nivel topográfico del área	159
Figura 10.7 – Catastro municipal	161
Figura 10.8 – Valor de impacto total sobre cada factor ambiental	179
Figura 10.9 – Valor de impacto total de cada actividad	179
Figura 10.10 – Costo mensual para el transporte de los lixiviados desde el sitio de generación hacia la planta depuradora en el año 2014, según datos de la empresa	183

# 1. Introducción



Se define como lixiviado al líquido que percola a través de una masa de residuos, proveniente del contenido de agua del material, de los fluidos generados durante la descomposición de la fracción orgánica y de las precipitaciones caídas en el sitio. Es un contaminante complejo debido a que, a medida que se genera y se desplaza por la masa de residuo, arrastra consigo nutrientes, materia orgánica, metales, sales, ácidos orgánicos y otros compuestos productos de la descomposición, además de ser un medio de cultivo propicio para el desarrollo de microorganismos patógenos (Chatterjee et al, 2013).

En los sitios cercanos a plantas de compostaje y rellenos sanitarios, los lixiviados constituyen uno de los principales problemas de contaminación de aguas subterráneas por infiltración (Arvizu y González, 2005) y también de cursos de agua debido al escurrimientos superficial (Colomer, 2008), por lo que es habitual encontrar sistemas de tratamiento para estos líquidos en los sitios de generación.

Por otro lado, los lodos cloacales constituyen un residuo sólido de las estaciones depuradoras de aguas residuales. Si bien poseen características muy variables dependiendo de la naturaleza del agua residual a tratar y del sistema de tratamiento utilizado, en general se caracterizan por poseer un alto contenido de humedad, de materia orgánica y nutrientes, aunque también pueden poseer altas concentraciones de metales pesados, compuestos orgánicos tóxicos, iones disueltos y microorganismos patógenos (Turovskiy y Mathai, 2006). Debido a estas características, los lodos cloacales son un residuo inestable que necesita de tratamientos posteriores para reducir su potencial contaminante. En los últimos años se ha extendido el uso del compostaje para la estabilización de los lodos, debido en parte a la revalorización del residuo como materia prima susceptible de ser aprovechada con fines agrícolas (Nilsson y Dahlström, 2005).

Sin embargo, dado los altos porcentajes de humedad de los lodos cloacales y de las grandes cantidades que habitualmente se generan en una estación depuradora de aguas residuales, las plantas de compostaje de lodos también producen grandes volúmenes de lixiviados que deben ser tratados. Por su naturaleza, muchos de los sistemas de tratamiento de aguas residuales son aplicables a los lixiviados, siendo importante conocer sus características fisicoquímicas y microbiológicas, las cantidades generadas y los parámetros de vuelco según la normativa ambiental vigente, para determinar qué método es el más apropiado para cada caso particular (Stegmann et al, 2005).

La fitorremediación consiste en el uso de plantas para extraer, degradar o inmovilizar contaminantes del ambiente. Cuando es aplicable, representa una solución relativamente simple y de bajo costo en comparación a otros sistemas de tratamiento (USEPA, 2000). Entre los métodos más generalizados de fitorremediación se encuentran los humedales artificiales o construidos, en los que se

emula la capacidad de autodepuración de los ecosistemas de humedales, mediante el crecimiento de macrófitas sobre un lecho de grava impermeabilizado. Estas plantas hacen posible una serie de complejas interacciones físicas, químicas y biológicas, gracias a las cuales el efluente es depurado lenta y progresivamente (Delgadillo et al, 2010).

En la ciudad de San Carlos de Bariloche (Río Negro, Argentina), desde diciembre de 1997 se tratan mediante compostaje los lodos de la estación depuradora de aguas residuales. No obstante, el aumento de los costos y la inminente ampliación de la capacidad operativa de la planta depuradora, aumentan la problemática de la generación de lixiviados, cuyo tratamiento actual es costoso e ineficiente.

En este trabajo se propone la fitorremediación para el tratamiento *in situ* de los lixiviados producidos en el compostaje de los lodos cloacales en la ciudad de S. C. de Bariloche, utilizando la tecnología de humedales artificiales de flujo subsuperficial con la especie *Chrysopogon zizanioides*, también conocida como pasto Vetiver. Asimismo se propone la reutilización de los lixiviados tratados para riego forestal con acceso restringido, con el propósito de aprovechar los volúmenes generados en los períodos de déficit hídrico.

Estructurado en tres partes, el trabajo consiste inicialmente en la caracterización de los lixiviados y los ensayos de tolerancia y adaptabilidad de la especie al contaminante, con el fin de determinar la factibilidad de su uso en el sistema de tratamiento. En la segunda parte, se presentan los cálculos de diseño del sistema de tratamiento, en función de las características del contaminante, de los rendimientos esperados y de la normativa ambiental vigente para los parámetros de vuelco. Finalmente, en la tercera parte, se realiza un análisis del proyecto propuesto en función de los riesgos previstos, el impacto ambiental que podrían provocar las diferentes etapas, y el análisis económico, de acuerdo al presupuesto estimado de la obra en comparación al sistema actual de tratamiento.

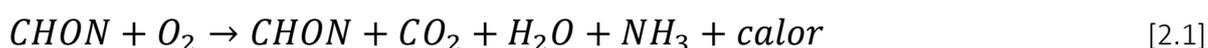
## 2. El compostaje de lodos cloacales



## 2.1. El proceso de compostaje

El compostaje es un proceso biooxidativo controlado que: (i) incluye un sustrato heterogéneo en estado sólido, (ii) evoluciona pasando a través de una fase termofílica y una liberación temporal de fitotoxinas y (iii) se produce CO<sub>2</sub>, agua, minerales y materia orgánica estabilizada. Comparándolo con otros procesos, el compostaje es más efectivo en la reducción de patógenos, elimina olores desagradables y reduce los tiempos necesarios para la estabilización del material (Zucconi et al, 1987). El compost, en consecuencia, es el producto resultante de la transformación de la materia orgánica procedente de diversas fuentes por acción de los microorganismos.

Si bien el material que se compostea posee moléculas orgánicas con diferentes grados de complejidad (y con ello, diferentes velocidades de biodegradación), usualmente el proceso de compostaje puede ser simplificado de acuerdo a la siguiente ecuación (Zucconi et al, 1987):



en donde la cinética de evolución del carbono puede ser considerada como de primer orden:

$$C = C_0 \times e^{-kt} \quad [2.2]$$

donde

$C$       porcentaje peso seco de carbono

$t$       tiempo en días

### 2.1.1. Etapas del proceso de compostaje

El proceso de compostaje se suele dividir en cinco etapas principales, representadas en la Figura 2.1 (Lavado, 2012):

1. *Etapas inicial:* desde la conformación de la pila hasta que se registran incrementos de temperatura con respecto a la temperatura del material inicial, lo cual se debe a la presencia de compuestos carbonados de bajo peso molecular fácilmente biodegradables.
2. *Etapas mesófila o mesotérmica:* la oxidación aeróbica de compuestos carbonados por la microflora mesófila (bacterias y hongos), la nitrificación y la oxidación de compuestos reducidos de azufre, sumados a la falta de disipación de calor aumentan paulatinamente la temperatura hasta 45°C, lo que incrementa a su vez la microflora termófila.

3. *Etapa termófila o termogénica*: la microflora mesófila es reemplazada por la microflora termófila, al elevarse la temperatura en el rango de 45-75 °C. Por lo general, esto basta para eliminar los patógenos mesófilos, hongos, esporas, semillas, larvas de insectos y otros microorganismos no deseados. Sin embargo, a medida que aumenta la concentración de CO<sub>2</sub> y se reducen los compuestos degradables, se produce la disminución de la microflora termófila.
4. *Segunda etapa mesófila*: a continuación se produce un aumento de la microflora mesófila nuevamente, por el descenso de la actividad metabólica y el consecuente descenso de la temperatura. Estos microorganismos utilizan los compuestos más resistentes a la biodegradación, como restos de celulosa y lignina.
5. *Etapa de maduración*: finalmente la temperatura desciende hasta valores cercanos a la ambiente, debido al descenso de la actividad metabólica y a la estabilización desde el punto de vista microbiológico. Se producen reacciones secundarias de condensación y polimerización que conducen a la formación de sustancias más complejas (como los compuestos húmicos) a la vez que se degradan las sustancias fitotóxicas.

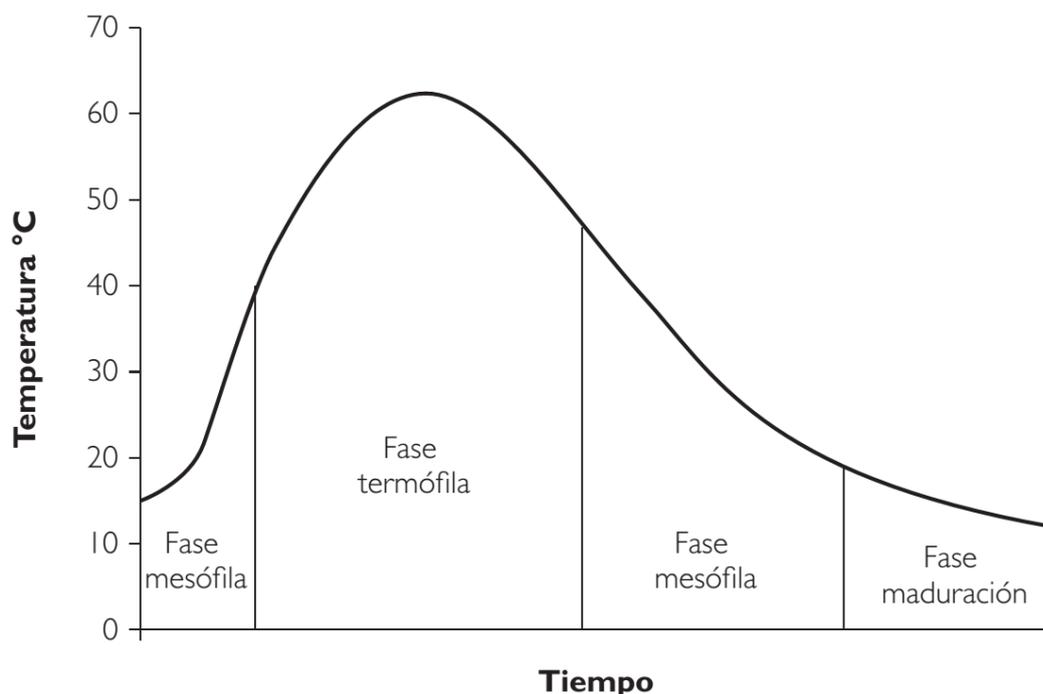


Figura 2.1 – Etapas típicas del compostaje, con énfasis en la temperatura (de Lavado 2012, p7)

### 2.1.2. Condiciones óptimas

Los factores determinantes del proceso de compostaje (Figura 2.2) que garantizan una adecuada calidad del producto final se describen a continuación (Seyedbagheri, 2010):

- *Sustrato*: debe proveer los nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos, siendo la relación C:N uno de los factores más importantes. Los valores óptimos son de 25:1 a 30:1. También son importantes las características físicas del sustrato, como la porosidad, la estructura y la granulometría, que afectan directamente a la capacidad de oxigenación del material y la superficie disponible para el desarrollo de los microorganismos.
- *Oxigenación*: el compostaje es un proceso de bioxidación aeróbica que depende de la concentración de oxígeno disponible en el material. Normalmente, el contenido de oxígeno debe ser cercano al 5% para asegurar un adecuado desarrollo de los microorganismos intervinientes, si por el contrario se dan condiciones de anaerobiosis, se desarrolla una comunidad de microorganismos diferentes, lo que reduce la eficiencia del proceso y da lugar a la formación de compuestos químicos no deseados.
- *Humedad*: el contenido de agua debe mantenerse entre 40 y 65%, lo que resulta suficiente para el normal desarrollo de los microorganismos pero no restringe el movimiento del aire en los poros del material.
- *Temperatura*: por lo general la temperatura del material compostado se autoregula por la actividad metabólica, entre 15-75°C. Sin embargo, en algunas ocasiones las temperaturas pueden ser menores (debido a las pérdidas de calor de la masa) o mayores (por déficit de humedad o falta de aireación), lo que perjudica a las comunidades de microorganismos y con ello la eficiencia del proceso.
- *Microorganismos*: dependiendo del material original, puede ser necesario inocular microorganismos activadores para acelerar la actividad biológica y dar lugar a la sucesión normal del proceso de compostaje.

En algunos casos es necesario el agregado de un agente estructurante, como aserrín o chips de madera, con el fin de mejorar la aireación y la humedad del material. En general se utilizan materiales fibrosos orgánicos con bajo contenido de humedad (Iqbal et al, 2010).

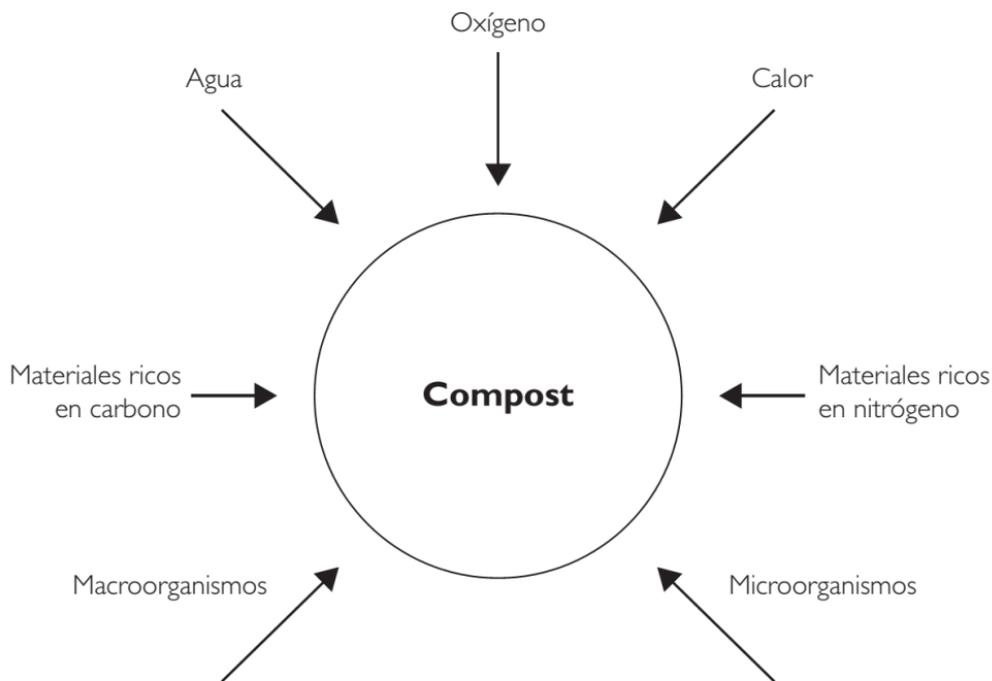


Figura 2.2 – Factores determinantes del compostaje (de Lavado 2012, p4)

### 2.1.3. Modificaciones del material durante el proceso

Inicialmente los compuestos más sencillos, como azúcares, aminoácidos o péptidos, son rápidamente atacados por los microorganismos, lo que da lugar a la elevación de la temperatura y la liberación de ácidos orgánicos (que pueden producir olores y un ligero descenso del pH). A continuación, durante las etapas intermedias, domina la despolimerización (descomposición de los compuestos orgánicos de alto peso molecular) y posteriormente la mineralización. Hacia el final del proceso, las sustancias fácilmente biodegradables se agotan y se ralentiza la actividad de los microorganismos. En estas condiciones tiene lugar la polimerización de los compuestos orgánicos más resistentes.

A medida que transcurre el proceso se puede observar una disminución de la humedad debido al calor generado, un oscurecimiento del color (por el mayor grado de humificación), la desaparición del olor desagradable de los residuos y la aparición de un olor semejante a hojarasca, la disminución del contenido total de materia orgánica, una tendencia del pH a la neutralidad y un aumento de la capacidad de intercambio catiónico (debido a la producción de ácidos húmicos).

#### 2.1.4. Estabilidad y madurez del compost

Para evaluar la eficiencia del proceso por lo general se evalúan la estabilidad y la madurez del compost. La estabilidad, por un lado, está relacionada con la disminución del carbono degradable y de la actividad de los microorganismos; mientras que la madurez hace referencia a la finalización efectiva del proceso de compostaje, que da lugar a un producto sin sustancias fitotóxicas que pueden afectar al crecimiento vegetal (Mazzarino et al, 2012a).

Los indicadores de estabilidad están relacionados con determinaciones de materia orgánica lábil, materia orgánica estable o intensidad de la actividad de los microorganismos. Entre las determinaciones más comunes están: la producción de CO<sub>2</sub>, el consumo de O<sub>2</sub>, la mineralización de N y/o C, la biomasa microbiana, la actividad enzimática, el grado de humificación, la concentración de carbono soluble en agua (CSA), la concentración de amonio y la relación amonio/nitratos. También se suelen utilizar otros parámetros indirectos de la estabilidad, como el descenso de la temperatura, el cambio de olor y de color.

Por su parte, los indicadores de madurez se basan en análisis de fitotoxicidad, algunos directos con plantas (índice de germinación, desarrollo de radículas, crecimiento vegetal en mezclas de turba o arena y compost, entre otros) o indirectos a través de la determinación de productos potencialmente fitotóxicos (como amonio, fenoles, ácidos grasos volátiles).

#### 2.1.5. Sistemas de compostaje

Esencialmente los sistemas de compostaje se pueden clasificar en abiertos y cerrados. En los abiertos, los materiales se disponen en grandes pilas o montículos no confinados por ningún tipo de barrera, mientras que en los cerrados el proceso se realiza en contenedores o cámaras de reacción. Los sistemas cerrados, pese a su rapidez y limpieza, no son tan difundidos debido a su elevado coste económico y los problemas derivados de la variabilidad de los residuos y la agresividad con la maquinaria (Canet Castelló, 2005).

De los sistemas abiertos, los más comunes consisten en pilas aireadas (Figura 2.3) mediante volteos mecánicos o ventilación forzada (que puede realizarse insuflando aire o extrayéndolo a presión). Las dimensiones de las pilas vienen dadas por la superficie disponible en el sitio de tratamiento y del volumen de residuos a procesar, aunque se deben satisfacer ciertas condiciones para garantizar la correcta aireación del material y una buena conservación del calor generado. Usualmente, una anchura

entre 2 y 5 metros y una altura entre 1,5 y 3 metros son adecuadas, aunque depende de la compactación del material.

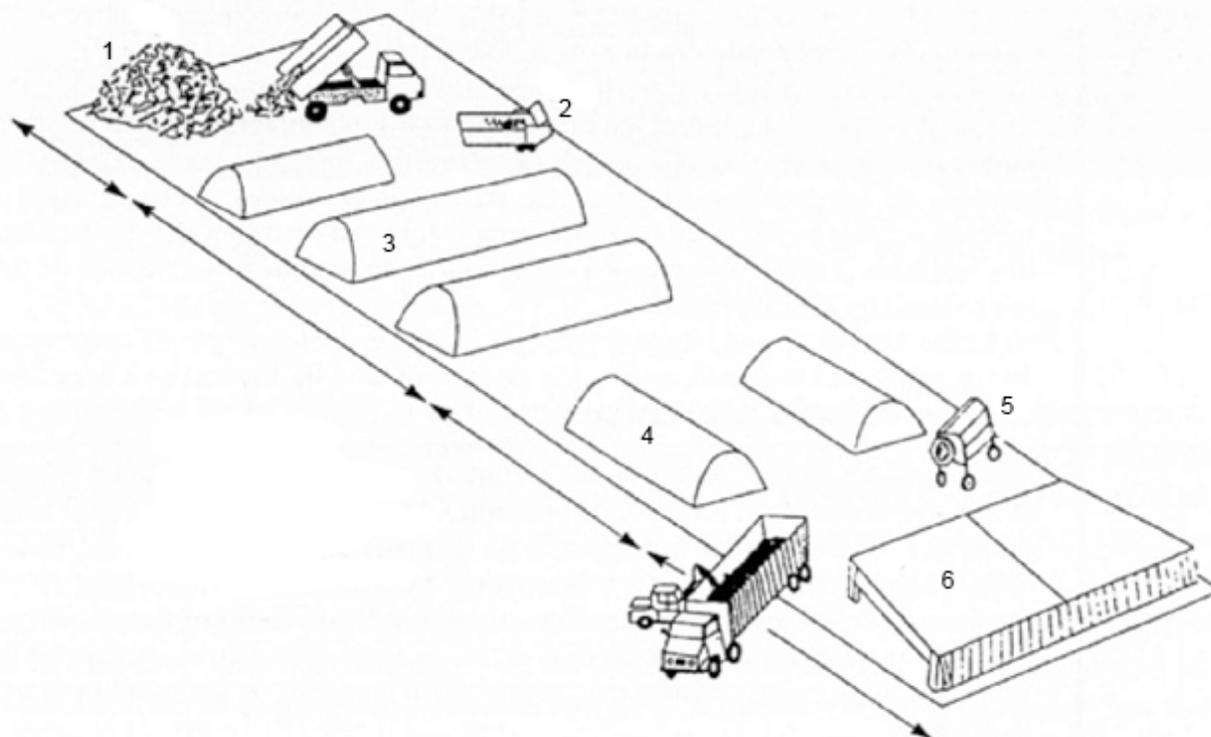


Figura 2.3 – Organización típica de una planta de compostaje: (1) Recepción, (2) Trituración, (3) Estabilización, (4) Maduración, (5) Cribado y (6) Almacenamiento (de Canet Castelló 2005, p8)

## 2.2. Los lodos cloacales

Los lodos cloacales son un producto secundario de los sistemas de tratamiento de aguas residuales. Con un alto contenido de humedad y de nutrientes, típicamente contienen de 0,25 a 7% de sólidos. Luego de ser procesados adecuadamente, el producto resultante, conocido como biosólido, posee un valor intrínseco debido al alto contenido de nutrientes y materia orgánica que pueden ser reutilizados con varios fines (Turovskiy & Mathai, 2006).

Por sus características, los biosólidos pueden utilizarse en suelos como enmiendas y como fertilizantes. Como enmiendas al aportar materia orgánica lo que a su vez mejora algunas características de los suelos, como la capacidad de retener humedad, la estructura, la porosidad, la capacidad de intercambio catiónico, entre otros. Y como fertilizantes al aportar micro (como hierro, zinc y cobre) y macronutrientes (como nitrógeno, fósforo y potasio), lo que beneficia el crecimiento vegetal y la productividad. Los biosólidos pueden ser utilizados directamente para la recuperación de suelos, la

agricultura, la fertilización de forestaciones, el control de erosión, la estabilización de pendientes, la horticultura; o también indirectamente para la producción de compost, lo que le aporta un valor agregado (USEPA, 1994).

La cantidad de lodos producida por una típica planta de tratamiento de aguas residuales es aproximadamente un 1% de la cantidad tratada de líquido. Mientras que el tratamiento de las aguas lleva varias horas, procesar los lodos generados y prepararlos para su disposición o utilización puede demorar varios días o incluso semanas. Por esta razón, el manejo de los lodos representa entre el 40 y el 50% de los costos de tratamiento de las aguas residuales. Para el tratamiento y la posterior reutilización o disposición de los lodos, se deben tener en cuenta opciones costo-eficientes que además satisfagan la normativa local, regional y nacional (Turovskiy & Mathai, 2006).

### *2.2.1. El compostaje como sistema de tratamiento de lodos*

El compostaje de biosólidos a gran escala comenzó en la década de 1960 en Francia, Alemania, Hungría y Japón, continuando luego en algunos países de climas más fríos, como Finlandia, Suecia, Holanda y Rusia. Tiempo después comenzaron a aparecer las normativas que regulaban la aplicación del compost de biosólidos con fines agrícolas.

Según la USEPA el compostaje es una opción viable para el tratamiento biosólidos ya que se ha demostrado su eficiencia a la hora de reducir patógenos y es considerado un método aprobado por la normativa estadounidense y canadiense<sup>1</sup> (Figura 2.4), además de que el producto final es fácil de manejar, almacenar y aplicar (USEPA 2002). Si bien el compost de biosólidos es seguro de utilizar, la percepción de la comunidad sigue siendo una de las mayores trabas para su completa aceptación, lo que en ocasiones se suma a la falta de normativa asociada.

Desde el punto de vista ambiental, el compostaje de biosólidos posee varios beneficios (Shammas & Wang, 2009):

- Se reciclan valiosos nutrientes que pueden ser devueltos al suelo
- Se reduce la necesidad de agroquímicos para mejorar la fertilidad de los suelos
- Se integran en el proceso otros residuos, como restos de poda o de aserraderos
- Se reduce la necesidad de espacio disponible en los rellenos sanitarios municipales

---

<sup>1</sup> PFRP Method, *Process to Further Reduce Pathogens*

- Se genera un producto que es a la vez enmienda y fertilizante para el suelo

De todos modos, el compostaje de biosólidos no está exento de algunos problemas, como la generación de olores y de lixiviados que deben ser tratados.

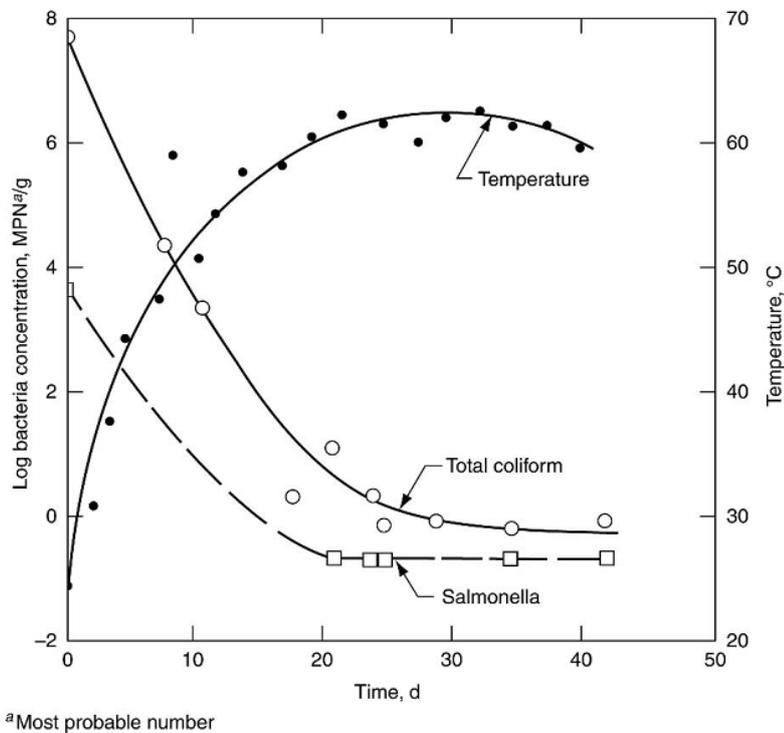


Figura 2.4 – Reducción de patógenos en función del tiempo y de la temperatura durante el compostaje de biosólidos mediante pilas con volteo (de Shamma & Wang 2009, p688)

### 2.2.2. El marco regulatorio para el compostaje de biosólidos

La persistencia de algunos compuestos orgánicos, microorganismos patógenos o metales pesados en el compost de biosólidos puede restringir su aplicación para algunos fines. Según la norma de la USEPA (1993b) se definen dos tipos de compost en función de la reducción de patógenos (en pilas con volteo):

- *Compost Clase A*: la temperatura debe alcanzar o superar los 55°C durante 15 días o más, con un mínimo de 5 volteos en ese período, con coliformes fecales <1.000 NMP/g de sólidos totales en el producto final. Puede ser aplicado sin restricciones al público.
- *Compost Clase B*: la temperatura debe alcanzar o superar los 40°C durante 5 días consecutivos, y durante ese período debe superar los 55°C durante 4 horas o el número de coliformes fecales debe ser <2.000.000 NMP/g de sólidos totales en el producto final. Puede ser aplicado en sitios con restricción al público.

La norma también incluye valores límites para nueve metales que no pueden excederse en los productos derivados de biosólidos, incluyendo el compost (Tabla 2.1). Cuando el producto final no

excede estas concentraciones límites, alcanza la Clase A en la reducción de patógenos y el proceso incluye medidas para reducir el potencial de atracción de vectores, la norma lo define como de Calidad Excepcional (EQ). Por lo general, los productos Clase A y de Calidad Excepcional tienen mayor éxito en el mercado que los de Clase B.

<b>Metal</b>	<b>Valores límites</b>
	<b>mg/kg</b>
<b>Arsénico</b>	75
<b>Cadmio</b>	85
<b>Cobre</b>	4300
<b>Plomo</b>	840
<b>Mercurio</b>	57
<b>Molibdeno</b>	75
<b>Níquel</b>	420
<b>Selenio</b>	100
<b>Zinc</b>	7500

Tabla 2.1 – Valores límites para los productos derivados de biosólidos según la normativa estadounidense (de USEPA, 1993b)

Cuando el producto final no cumple con los requerimientos de Clase A, la norma provisoria del Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria de Argentina (SENASA) establece que el producto debe estacionarse al menos durante un año, efectuando volteos periódicos.

### 2.2.3 La generación de lixiviados durante el compostaje

El lixiviado de compostaje es el líquido que percola a través de un compost, originado por las precipitaciones, la escorrentía o la irrigación que pasa a través del mismo. También, durante el proceso de compostaje, una fracción del contenido de humedad original del residuo puede desprenderse en forma de lixiviado. Es un contaminante complejo dado que el líquido arrastra consigo compuestos disueltos y partículas en suspensión a su paso por la masa de residuos. En general se caracterizan por ser concentrados en nutrientes, materia orgánica, contaminantes orgánicos y metales pesados, dependiendo del material original (Chatterjee et al, 2013)

El lixiviado inicial de una pila fresca de compost generalmente es de color amarillento a marrón oscuro debido a la materia orgánica disuelta. El proceso de compostaje convierte parte de la materia orgánica original en huminas, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos, que pueden estar presentes en el lixiviado tanto en formas disueltas como coloidales. La estructura química de los compuestos orgánicos depende de las características del material a compostar, de las condiciones en las que se desarrolle el

proceso y de la edad del compost. En el caso de biosólidos, se han encontrado diferentes fases en la conversión de la materia orgánica, desde la degradación de los compuestos orgánicos fácilmente biodegradables, hasta la formación de complejos húmicos de mayor estabilidad en cuestión de semanas (Zbytniewski & Buszewski, 2005). Tras años de estudios sobre pilas de compost de biosólidos y residuos orgánicos urbanos, Christensen et al (1983-1984) han encontrado que las concentraciones de nutrientes, materia orgánica, iones inorgánicos y metales pesados dependen también del material compostado, de la edad del compost y del tamaño de la pila. Los resultados concluyen que las mayores concentraciones se dan en los primeros días de lixiviación y que incluso estos lixiviados pueden ser más concentrados en algunos compuestos que aquellos originados por el material sin compostar.

Debido al elevado porcentaje de humedad de los biosólidos la generación de lixiviados durante el compostaje puede representar un problema aun con escasas precipitaciones. Si no se controlan, los volúmenes generados pueden ocasionar problemas de contaminación en suelos y agua. Además estos lixiviados son propensos a producir olores (debido a su alto contenido de materia orgánica y nutrientes) y pueden representar un riesgo para los operarios de las plantas de compostaje. Durante el invierno, el congelamiento de estos líquidos puede crear dificultades operativas para el manejo de la maquinaria (Spellman, 1997).

Según Peralta et al (2012), en un trabajo de investigación realizado en la ciudad de Mar del Plata, la generación de lixiviados en el compostaje de biosólidos depende de la cantidad de estructurante utilizado, siendo mayor cuando menor es la proporción (debido a que el estructurante retiene humedad). Se ha observado además que los lixiviados generados en las primeras 48 horas fueron consecuencia del drenaje propio del compost, y posteriormente sólo se produjeron tras episodios de precipitaciones.

### 2.3. El caso de San Carlos de Bariloche

La ciudad de San Carlos de Bariloche cuenta con una planta de lodos activados para tratar las aguas residuales (Figura 2.5). Con una población servida de 90.000 habitantes, la planta procesa cerca de 25.000m<sup>3</sup> por día, con marcadas variaciones según las temporadas turísticas. En el proceso una parte de los lodos son purgados del sistema y deshidratados hasta que alcanzan una humedad cercana al 85%, para lo cual se les agrega un agente floculante polielectrolito y se los pasa por un sistema de filtros banda. Mensualmente se extraen del sistema entre 200 y 300 m<sup>3</sup> de lodo deshidratado (Figura 2.6).

En base a los estudios de factibilidad realizados por el Centro Regional Universitario Bariloche (CRUB) durante el verano de 1996 e invierno de 1997, se decidió optar por el compostaje para el tratamiento de estos lodos. Los estudios fueron realizados en conjunto con el Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias de España (INIA-Madrid), la Universidad de Maryland (Wye-Research Center), el Laboratorio de Parasitología del CRUB y la empresa SURBASA (Saneamiento Urbano de Bariloche S.A. del Grupo Cooperativa de Electricidad Bariloche) (Laos et al, 2000).

Desde 1997 y hasta el año 2005 la planta de compostaje funcionó en un predio de 2 hectáreas a 8 km al sur del centro de la ciudad, sobre la margen derecha del Arroyo Ñireco. Posteriormente, la planta fue trasladada a otro predio distante unos 6 km del centro de la ciudad y cercano al Cañadón de los Loros, en donde ocupa 2 hectáreas de las 10 que son propiedad de la Provincia de Río Negro e identificadas como de uso agrícola-forestal (según la identificación catastral 19-2-M-M10, Lote 10B).

El proceso de compostaje se realiza en hileras al aire libre (10-15 m de largo, 3-4 m de ancho y 1,6 m de altura) con volteos periódicos. Los biosólidos son mezclados con estructurante (virutas de madera y chips de poda) sobre plateas de concreto con un sistema de captación de lixiviados (Figura 2.7). La proporción biosólidos:estructurante varía en el año, de 1:1 a 1:2 en volumen, según sea verano o invierno, respectivamente. El proceso total dura entre 8 y 12 meses y se producen aproximadamente 3.000 m<sup>3</sup> de compost sin tamizar. La reducción de patógenos se realiza siguiendo las directivas de la USEPA para Compost Clase A. Esta misma normativa es utilizada para establecer los límites de As, Mo y Se, en tanto que para Cr, Cd, Zn, Cu, Hg, Ni y Pb se utilizan los límites de la Unión Europea (Mazzarino et al, 2012b). En la Tabla 2.2 se presentan algunas características fisicoquímicas y microbiológicas de los biosólidos y del compost. En la Tabla 2.3 se presenta el rango del contenido de metales pesados y las concentraciones máximas admitidas según la normativa internacional y nacional (Laos et al, 2000).



Figura 2.5 – Planta depuradora de líquidos cloacales de S. C. de Bariloche



Figura 2.6 – Volquete con lodos deshidratados en la planta depuradora



Figura 2.7 – Mezclado de los biosólidos con viruta de madera en la planta de compostaje

		Biosólidos	Compost
Humedad	%	85	45
pH		7,6	6,5
Conductividad eléctrica	mS/cm	-	1,1
Carbono orgánico total (COT)	%	43	23
Carbono soluble en agua (CSA)	g/kg	-	0,7
Nitrógeno total (NT)	g/kg	59	19
Fósforo	g/kg	23	14
Potasio	g/kg	-	4,8
Calcio	g/kg	25	15
Magnesio	g/kg	4,9	7,7
Hierro	g/kg	8,3	14
COT:NT		8,6	12
CSA:NT		-	0,4
Coliformes fecales	NMP/g	$2 \times 10^6$	<100

Tabla 2.2 – Características fisicoquímicas y microbiológicas de biosólidos y compost (de Laos et al, 2000)

Elemento (mg/kg)	Biosólidos	Compost	USEPA 1993	Unión Europea 1986	SENASA 1999
Arsénico	0,6-24	3,5-3,8	41-75	-	-
Cadmio	1-11	<10	39-85	20-40	20
Cromo	13-24	20-30	1200-3000	1000-1750	1000
Cobre	27-208	40-85	1500-4300	1000-1750	1000
Mercurio	0,7-23	<7	17-57	16-25	16
Molibdeno	-	-	75	-	-
Níquel	10-27	15-20	420	300-400	300
Plomo	90-177	53-59	300-840	750-1200	750
Selenio	0,9-12,5	<15	36-100	-	-
Zinc	115-755	80-330	2800-7500	2500-4000	2500

Tabla 2.3 – Rango del contenido de metales pesados en biosólidos y compost (1998-1999) y concentraciones máximas admitidas en biosólidos a nivel internacional y nacional (de Laos et al, 2000)

Los lixiviados generados en el proceso son conducidos hasta dos tanques de almacenamiento conectados entre sí, mediante una canaleta que los recolecta desde las plateas de concreto en las que se desarrolla el compostaje. Estos tanques tienen una capacidad de 56 m<sup>3</sup> cada uno, y se encuentran ubicados al borde de un desnivel topográfico al Norte de las plateas (Figuras 2.8 y 2.9). El desnivel ha sido estabilizado con cuatro filas de gaviones de 1m x 1m x 2m. En el sector de maduración, al Sur de la playa de mezclado, los lixiviados producidos por estas pilas son recolectados por una zanja rellena con aserrín que se usa luego en el proceso de compostaje. En la Figura 2.10 se muestra la ubicación del predio con respecto al centro urbano de la ciudad, y la distribución dentro del mismo de los diferentes sectores destinados a las etapas del proceso de compostaje.

Los tanques de almacenamiento tienen un sistema de descarga y de limpieza mediante válvulas. Cuando se llenan, o cuando pasan algunas semanas sin ser descargados, un camión cisterna privado los vacía y transporta los lixiviados hasta la planta depuradora. Si bien la metodología funciona normalmente sin problemas, esta forma de abordar el problema de los lixiviados resulta muy costosa para la empresa. Además al no tener control sobre los caudales se pueden presentar episodios de desbordes de los tanques, particularmente en días lluviosos. Por otro lado, aun cuando no se han registrado casos, siempre existe un riesgo asociado al transporte de un residuo considerado peligroso<sup>2</sup> a través de la ciudad.

<sup>2</sup> De acuerdo a la Ley Provincial de Residuos Especiales Nº 3.250 Anexo IV, los lixiviados pueden considerarse peligrosos por poseer las características de: (i) Infecciosos (H6.2), sustancias o desechos que contienen microorganismos viables o sus toxinas, agentes conocidos o supuestos de enfermedades en los animales o el hombre, y (ii) Ecotóxicos (H12), sustancias o desechos que, si se liberan, tienen o pueden tener efectos adversos inmediatos o retardados en el medio ambiente debido a la bioacumulación o los efectos tóxicos en los sistemas bióticos



Figura 2.8 – Plateas de concreto sobre las que se realiza el compostaje, al fondo se observan los tanques de almacenamiento de lixiviados



Figura 2.9 – Tanque de almacenamiento de lixiviados



Figura 2.10 – (Arriba) Ubicación de la planta de compostaje de biosólidos en relación a la planta depuradora de líquidos cloacales y el Centro Cívico de la ciudad. (Abajo) Detalle de la planta de compostaje de biosólidos (imágenes de Google Earth)



### 3. Fitorremediación por medio de humedales artificiales



### 3.1. La fitorremediación

Se define como fitorremediación al conjunto de técnicas en las que se usan plantas para degradar, extraer, contener o inmovilizar contaminantes del suelo y el agua (USEPA, 2000). Si bien se trata de un término acuñado en 1991, en la fitorremediación se utilizan muchos conocimientos que se aplican desde hace tiempo en agricultura, silvicultura y horticultura. Sin embargo, en los últimos años, los resultados obtenidos en aplicaciones concretas han demostrado un ahorro significativo en los costos comparados a otros métodos de tratamiento, además de un menor impacto en los ecosistemas naturales, con lo que la fitorremediación ha ganado una creciente atención internacional.

### 3.2. Humedales naturales y artificiales

Por definición los humedales son áreas que se encuentran anegadas el tiempo suficiente como para permitir únicamente el desarrollo de plantas capaces de tolerar las condiciones de bajas concentraciones de oxígeno en el sustrato. Típicamente son áreas de transición entre ecosistemas terrestres y acuáticos, actuando como enlace entre ambos. Dependiendo de la flora, de la topografía y de las condiciones de humedad, los humedales son conocidos como pantanos, lodazales, marismas, esteros, mallines, entre otros nombres.

Los humedales artificiales son sistemas que han sido diseñados y construidos para el tratamiento de efluentes utilizando muchas de las ventajas de los humedales naturales. En efecto, son diseñados para hacer uso de los procesos naturales que involucran a la vegetación, el sustrato y los microorganismos de un humedal natural, pero en condiciones más controladas.

Todos los humedales, tanto naturales como construidos, tienen en común el anegamiento completo o parcial, al menos periódicamente. El sustrato se encuentra saturado el tiempo suficiente como para generar condiciones de bajas concentraciones de oxígeno, lo que permite el desarrollo de ciertas plantas vasculares adaptadas.

El exceso de agua, sin embargo, hace que los humedales se encuentren entre los ecosistemas de mayor productividad del planeta, siendo además los hábitats de multitud de especies de animales que no se encuentran en otros ecosistemas. Debido a la intensa actividad biológica los humedales pueden transformar muchos contaminantes comunes de efluentes líquidos en subproductos

inofensivos o nutrientes esenciales para su propio funcionamiento, de una forma relativamente barata y sencilla en comparación a otros sistemas de tratamiento (Kadlec & Wallace, 2009).

### 3.3. Componentes de un humedal artificial

Los humedales artificiales están conformados esencialmente por cinco elementos: el efluente, el sustrato, la vegetación, los microorganismos y los animales (Delgadillo et al, 2010):

#### 3.3.1. Efluente

En el diseño de los humedales artificiales la naturaleza del efluente a tratar es uno de los principales aspectos que se tienen en cuenta. Las dimensiones, los sistemas de captación, la vegetación, el tipo de sustrato, entre otros parámetros, dependen tanto de los características fisicoquímicas y microbiológicas del efluente, como de los aspectos hidrológicos del sistema (caudales de entrada y de salida, ganancias por precipitaciones o escorrentías, pérdidas por evapotranspiración). De hecho, de acuerdo a USEPA (1995), la hidrología es el factor de diseño más importante en un humedal artificial, siendo a menudo el factor decisivo en el éxito o fracaso del sistema de tratamiento.

Los contaminantes más importantes de interés en el tratamiento de efluentes se resumen en la Tabla 3.1 (Metcalf & Eddy, 1994):

Contaminantes	Razón de la importancia
Sólidos suspendidos	Los sólidos en suspensión pueden conducir al desarrollo de depósitos de lodos y de condiciones anaerobias cuando se vierte efluente sin tratar al entorno acuático
Materia orgánica biodegradable	Compuesta principalmente por proteínas, carbohidratos, grasas animales, la materia orgánica biodegradable se mide, la mayoría de las veces, en términos de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) y de DQO (demanda química de oxígeno). Si se descargan al entorno sin tratar, su estabilización biológica puede llevar al agotamiento de los recursos naturales de oxígeno y al desarrollo de condiciones sépticas
Patógenos	Pueden transmitir enfermedades contagiosas patógenas presentes en el efluente

Nutrientes	Tanto el nitrógeno como el fósforo, junto con el carbono, son nutrientes esenciales para el crecimiento. Cuando se vierten al entorno acuático, estos nutrientes pueden llevar al crecimiento de una vida acuática no deseada. Cuando se vierten al terreno en cantidades excesivas, también pueden conducir a la contaminación del agua subterránea
Materia orgánica refractaria	Esta materia orgánica tiende a resistir los métodos convencionales de tratamiento (agentes tensoactivos, fenoles, pesticidas)
Metales pesados	Los metales pesados son añadidos frecuentemente a los efluentes en el curso de ciertas actividades comerciales e industriales, tienen una alta persistencia en el ambiente, lo que incrementa su posibilidad de acumulación y toxicidad
Sólidos inorgánicos disueltos	Los constituyentes inorgánicos tales como el calcio, sodio y los sulfatos deben ser removidos si se va a reutilizar el efluente, debido a que son potenciales degradadores del suelo

Tabla 3.1. Contaminantes importantes de interés en el tratamiento de efluentes (adaptado de Metcalf & Eddy 1994, p63)

### 3.3.2. *Sustrato*

En los humedales, es común utilizar suelo, arena, grava, rocas, sedimentos, restos de vegetación e incluso compost, como sustrato en el que se establecen los microorganismos y la vegetación. La principal característica del medio es que debe tener la permeabilidad adecuada para permitir el paso del agua, ya que el tamaño del medio granular afecta directamente a la conductividad hidráulica del humedal, y con ello el caudal de efluente que se puede tratar.

Por otra parte, el sustrato sirve de soporte de crecimiento de la vegetación y de los microorganismos (formación de biofilms), por lo que juega un papel clave en la biodegradación de muchos contaminantes. Además, mediante interacciones físicas y químicas, como la precipitación, la formación de complejos o la adsorción, el sustrato también participa de la degradación e inmovilización de ciertos contaminantes presentes en los efluentes.

Es importante elegir correctamente el tamaño efectivo del material a utilizar, ya que una granulometría muy fina (como arcillas y limos) provee de una elevada superficie de contacto para las interacciones fisicoquímicas del sustrato y el efluente, pero disminuye la conductividad hidráulica y con ello el caudal que se puede tratar. Por el contrario, una granulometría más gruesa, como grava y arena,

disminuye la capacidad de adsorción del sustrato, pero aumenta la conductividad hidráulica y reduce los tiempos que el efluente permanece en el sistema.

### 3.3.3. Vegetación

En los humedales artificiales se utilizan una variedad de plantas similares a las encontradas en los humedales naturales. Normalmente, el diseño contempla el uso de plantas superiores o macrófitas, lo que abarca plantas vasculares, musgos, algas y helechos. En general, el rol más significativo de la vegetación en relación al tratamiento del efluente se debe al mejoramiento de las características físicas del sustrato. Sin embargo, algunas especies debido a sus características morfológicas también juegan un papel importante en la captura de nutrientes, en la degradación de compuestos tóxicos y en la inmovilización de metales pesados en la biomasa.

Las funciones de la vegetación en los humedales artificiales pueden dividirse en siete categorías (Brix, 1994):

- *Alteraciones físicas del sustrato*: las macrófitas mejoran la infiltración del sustrato y proveen de una gran superficie para el establecimiento de los microorganismos. El desarrollo radicular reduce la velocidad del líquido en el sustrato, lo que facilita la sedimentación y favorece algunas reacciones que dependen del tiempo de contacto entre el sustrato y el efluente. Además, estabilizan la conductividad hidráulica al reducir la formación de canales erosivos y evitando la compactación por el constante movimiento de la vegetación.
- *Liberación de compuestos orgánicos*: a través de sus raíces, las plantas liberan una gran variedad de compuestos orgánicos, incluso en cantidades cercanas al 25% del carbono fijado por fotosíntesis. La liberación de estos compuestos, sumado a la descomposición de la biomasa muerta, representan una fuente de carbono importante y fácilmente biodegradable por los microorganismos.
- *Desarrollo de microorganismos*: las plantas proveen de una importante superficie para el desarrollo de microorganismos y la formación de biofilms, que son responsables de la mayoría de los procesos biológicos en un humedal artificial. Además, el aporte de biomasa muerta mejora la conductividad hidráulica, representa una fuente de carbono para los microorganismos y reduce la amplitud térmica entre el sustrato y el ambiente.

- *Oxigenación del sustrato*: la mayoría de las plantas vasculares utilizadas en humedales artificiales poseen adaptaciones para el transporte de aire desde los tallos y las hojas, hacia el sistema radicular (Figura 3.1). Esto aumenta las concentraciones de oxígeno en la rizósfera, lo que a su vez permite la degradación aeróbica de la materia orgánica y la nitrificación.
- *Captura de nutrientes e inmovilización de contaminantes*: debido a la alta productividad de los humedales artificiales, una considerable cantidad de nutrientes (como N y P) pueden ser absorbidos por las plantas y retenidos en la biomasa. Algunas especies también han demostrado la capacidad de absorber e inmovilizar metales pesados en sus tejidos.
- *Generación de microclima*: el desarrollo aéreo de la vegetación reduce la velocidad del viento (y con ello la resuspensión y la erosión), produce sombra (lo que evita el desarrollo excesivo de algas) y provee de un aislamiento térmico para reducir la amplitud térmica entre el sustrato y el ambiente (por ejemplo, reduciendo el riesgo de heladas durante el invierno).
- *Mejoramiento estético del sistema*: la utilización de vegetación en los humedales artificiales reduce el impacto visual del sistema de tratamiento y provee de hábitats para vida salvaje.

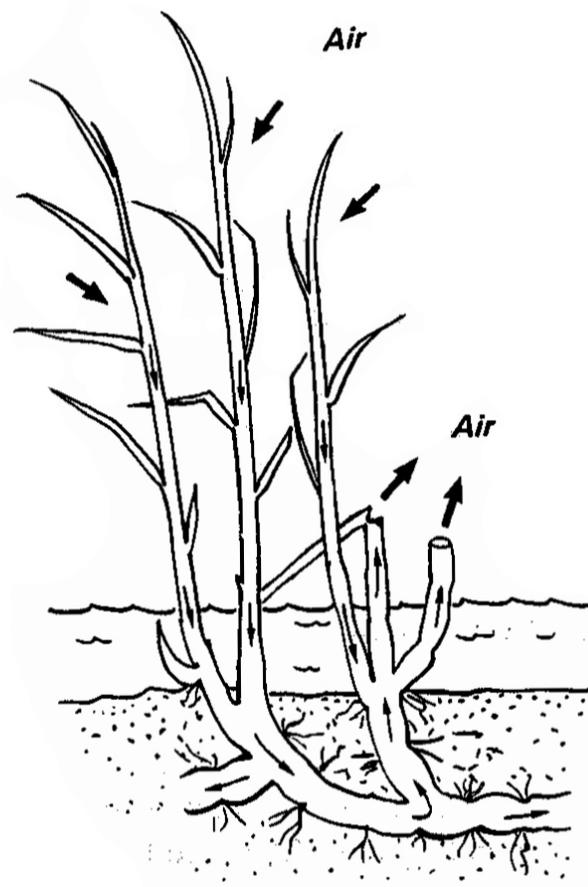


Figura 3.1 – Flujo de aire en el carrizo (*Phragmites australis*), el aire ingresa a las hojas debido al gradiente de presiones generado por la diferencia de humedades relativas y sale luego a la atmósfera por los tallos dañados (de Brix 1994, p72)

Cuando se diseña un humedal artificial se deben tener en cuenta diversos factores a la hora de elegir la especie vegetal predominante (USEPA, 1999):

- *Tolerancia a las altas cargas de nutrientes*: a diferencia de los humedales naturales, en los humedales artificiales se prevén altas concentraciones de nutrientes. Las especies vegetales que no estén adaptadas para tolerar estas concentraciones no pueden ser utilizadas.
- *Tolerancia al anegamiento*: en los humedales naturales se pueden experimentar períodos secos de forma frecuente u ocasional. Los humedales artificiales, en cambio, típicamente se diseñan para recibir efluentes todo el tiempo, por lo que las especies vegetales que no toleran un anegamiento constante no pueden ser utilizadas.
- *Estacionalidad*: se recomienda el uso de especies que permanezcan vivas todo el año (aun cuando la biomasa aérea muera durante los meses fríos), debido a que se logra mantener la capacidad depuradora del humedal artificial a lo largo del año.
- *Velocidad de crecimiento*: cuando se utilizan especies vegetales de crecimiento lento, se necesita un mayor número de plantas (y más densamente plantadas) para alcanzar la densidad adecuada en el humedal artificial.
- *Disponibilidad*: es preferible el uso de especies vegetales que se puedan conseguir con relativa facilidad y que no sean costosas (debido al número de plantas que se suele necesitar en los humedales).
- *Beneficios para la fauna*: en la medida de lo posible, se deben elegir especies vegetales que provean de alimento, refugio o sitios de nidificación para la fauna silvestre.
- *Diversidad*: en proyectos de gran escala, es recomendable utilizar varias especies vegetales a fin de reducir la vulnerabilidad propia de los sistemas de monocultivos (plagas, enfermedades)
- *Especies nativas*: el uso de especies nativas asegura una mayor supervivencia de las plantas ante las condiciones ambientales.
- *Especies no invasivas*: el uso de especies vegetales de rápido crecimiento (tanto nativas como exóticas), sin competidores naturales, con gran capacidad reproductiva o que presentan alelopatía (liberación de compuestos que influyen en el crecimiento, supervivencia o reproducción de otras especies) deben ser evitadas ante el riesgo de degradación ecológica del ambiente.

#### 3.3.4. *Microorganismos*

Los microorganismos (bacterias, levaduras, hongos, protozoos y algas unicelulares) regulan prácticamente todas las funciones depuradoras de los humedales artificiales, siendo un componente fundamental del sistema. Los microorganismos son importantes porque: (i) transforman un gran número de compuestos orgánicos e inorgánicos en sustancias inocuas o insolubles, (ii) cambian las condiciones de óxido-reducción del sustrato, y (iii) participan del reciclaje de nutrientes dentro del sistema (USEPA, 1995).

La actividad de los microorganismos es particularmente importante en la transformación de los compuestos nitrogenados en formas que pueden ser asimiladas por las plantas o liberadas a la atmósfera. Por otro lado, la utilización de fósforo por parte de la vegetación también depende en parte de la actividad microbiana, ya que estos convierten formas insolubles del fósforo en formas solubles que pueden ser asimiladas por las raíces. Los microorganismos también procesan compuestos orgánicos liberando dióxido de carbono, metano, ácido sulfhídrico y otros compuestos volátiles.

Algunas comunidades de microorganismos son estrictamente aeróbicas, mientras que otras son anaeróbicas o pueden sobrevivir en presencia o ausencia de oxígeno (facultativas). Esto se debe tener en cuenta en el diseño de los humedales artificiales, garantizando las condiciones para todas las comunidades de microorganismos presentes y necesarias para el tratamiento (USEPA, 1999).

#### 3.3.5. *Animales*

Los humedales artificiales son el hábitat de numerosas especies de invertebrados y vertebrados. Los primeros (como insectos, arácnidos y anélidos) contribuyen en la fragmentación de los restos orgánicos (detritos), consumen materia orgánica y tienen roles ecológicos, como la depredación de larvas de mosquito que pueden gestarse en los humedales construidos. Asimismo, también son comunes los anfibios, aves y algunos mamíferos.

En algunas ocasiones la proliferación de algunas especies de animales puede ser un problema que se debe considerar al momento de diseñar un humedal, a fin de minimizar la posibilidad de generar vectores de enfermedades (zoonosis)

### 3.4. Clasificación de los humedales artificiales

Los humedales artificiales pueden diseñarse según una variedad de planteos hidrológicos. Los esquemas básicos son: (i) humedales de flujo libre, (ii) humedales de flujo subsuperficial horizontal y (iii) humedales de flujo subsuperficial vertical.

#### 3.4.1. Humedales de flujo libre (FWS, Free Water Surface)

Se caracterizan por la exposición del efluente a la atmósfera, y consisten básicamente en un estanque o canal, con alguna barrera para evitar la infiltración, suelo u otro sustrato para permitir el establecimiento de la vegetación y estructuras apropiadas para la entrada y salida del líquido (Figura 3.2). Las profundidades en estos sistemas son relativamente bajas (de 0,1 a 0,6 m) y pueden procesar un amplio rango de caudales (de 4 a 75.000 m<sup>3</sup> diarios) (Reed, 2006). Para el caso de aguas residuales domésticas, por ejemplo, se han informado remociones elevadas (96% de sólidos suspendidos totales, 96% de DBO, 87% de DQO, 40% Nitrógeno Total Kjeldahl y 30% de Fósforo Total), utilizando unos 20 m<sup>2</sup> de superficie por persona equivalente (Brix, 1994).

Las condiciones biológicas en estos humedales son semejantes, en algunos aspectos, a las de las lagunas facultativas. La concentración de oxígeno varía según la profundidad, desde condiciones anóxicas en el fondo a condiciones aeróbicas cerca de la superficie. La oxigenación proviene de la difusión gaseosa con la atmósfera, de la aireación a través de las estructuras vegetales de las plantas emergentes y de la generación, cuando es posible, por parte de algas.

Los humedales de flujo libre atraen una gran variedad de especies de animales, lo que implica, en algunos casos, la necesidad de implementar medidas para controlar la propagación de especies vectores de enfermedades (como mosquitos o roedores). Por otro lado, la exposición de efluente a la atmósfera también representa una amenaza para la salud pública, por lo que en general estos sistemas no son utilizados para sistemas secundarios de tratamiento, sino más bien para tratamientos terciarios o avanzados.

Estos humedales son aplicables a todos los climas, incluso en los fríos. Sin embargo, la formación de hielo puede afectar los procesos que dependen de la oxigenación, como la remoción de nitrógeno. Otros procesos, en cambio, se ven favorecidos por la ausencia de resuspensión producto del viento, como la remoción de sólidos totales. No obstante, en general es más eficiente almacenar líquido durante el invierno y tratarlo durante el verano (Reed, 2006). Los sistemas de flujo libre son

relativamente flexibles a las variaciones de caudal, por lo que son ampliamente utilizados para los casos de generación discontinua o picos de caudal (como en la generación de lixiviados, o el tratamiento de aguas pluviales).

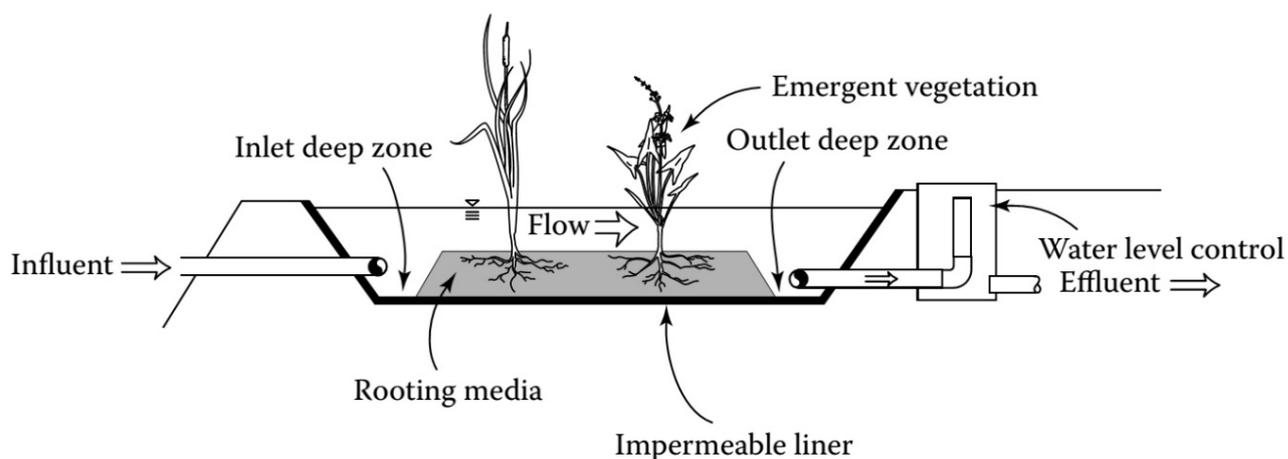


Figura 3.2 – Esquema básico de un humedal construido de flujo libre (FWS) (de Kadlec & Wallace 2009, p5)

#### 3.4.2. Humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF, Horizontal Subsurface Flow)

Los humedales de este tipo consisten en estanques o canales con un sustrato poroso (mezcla de suelo, grava y rocas) que se diseña de modo que el líquido siempre permanezca por debajo de las capas superiores (Figura 3.3). Poseen estructuras para el ingreso del efluente y egreso del líquido tratado, con una zona de amortiguación en el inicio para distribuir uniformemente el líquido y un sistema en la salida para el control del nivel. Las profundidades típicas van de 0,3 a 0,9 m, y el caudal que pueden tratar es menor al de los humedales de flujo libre, debido a la menor conductividad hidráulica del lecho (normalmente, van de 189 a 13.000 m<sup>3</sup> diarios) (Reed, 2006).

Son comúnmente utilizados para el tratamiento secundario de aguas residuales de viviendas unifamiliares o bien de pequeños barrios, aunque también se diseñan para efluentes específicos de algunas industrias. Para el caso de efluentes domésticos, estos humedales presentan eficiencias de remoción muy semejantes a los filtros FWS, con 91% de sólidos suspendidos totales, 89% de DBO, 33% de Nitrógeno Total Kjeldahl y 32% de Fósforo Total, utilizando 10 m<sup>2</sup> por persona equivalente (Brix, 1994).

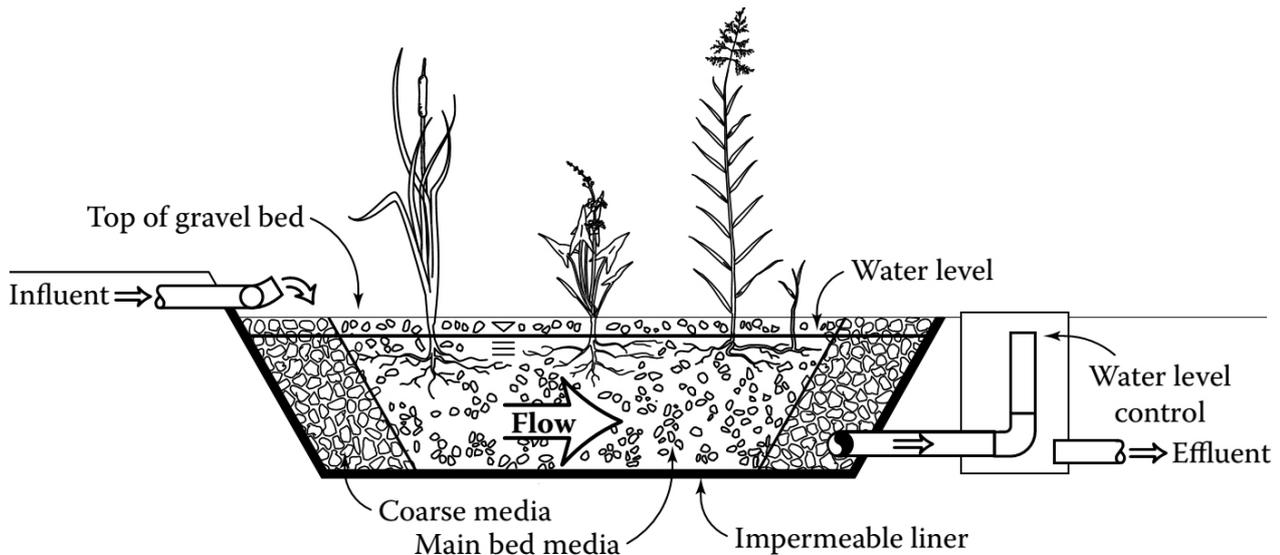


Figura 3.3 – Esquema básico de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) (de Kadlec & Wallace 2009, p6)

Debido a que el líquido pasa a través del sustrato, con una conductividad hidráulica que depende de la granulometría, la estructura y la porosidad del medio, las velocidades son menores y el tiempo que permanece el efluente es mayor. En general, por esta razón, estos humedales no son recomendables para efluentes con una alta carga de sólidos suspendidos, por el riesgo de obstrucción de los poros. Sin embargo, estos sistemas son más tolerantes a los climas fríos, minimizan el riesgo de pestes y la producción de olores. Además, debido a que el medio poroso provee de una mayor superficie de contacto para el tratamiento, los humedales HSSF son en general más pequeños que los FWS para el mismo volumen de efluente tratado, aunque su construcción y mantenimiento resultan más costosos.

### 3.4.3. Humedales de flujo subsuperficial vertical (VF, Vertical Flow)

También denominados humedales intermitentes, el efluente ingresa al sistema cada un determinado tiempo. De esta manera, las condiciones de saturación son seguidas por períodos de insaturación, lo que mejora el suministro de oxígeno en el sustrato. Éste está constituido por grava de diferente granulometría, en la que se establece la vegetación. El sistema es cargado por la parte superior y el efluente lo recorre verticalmente, hasta ser captado por una red de drenaje situada en el fondo del humedal. Habitualmente se coloca un sistema de aireación que consiste en tuberías cribadas con salida al exterior (Figura 3.4) (Delgadillo et al, 2010).

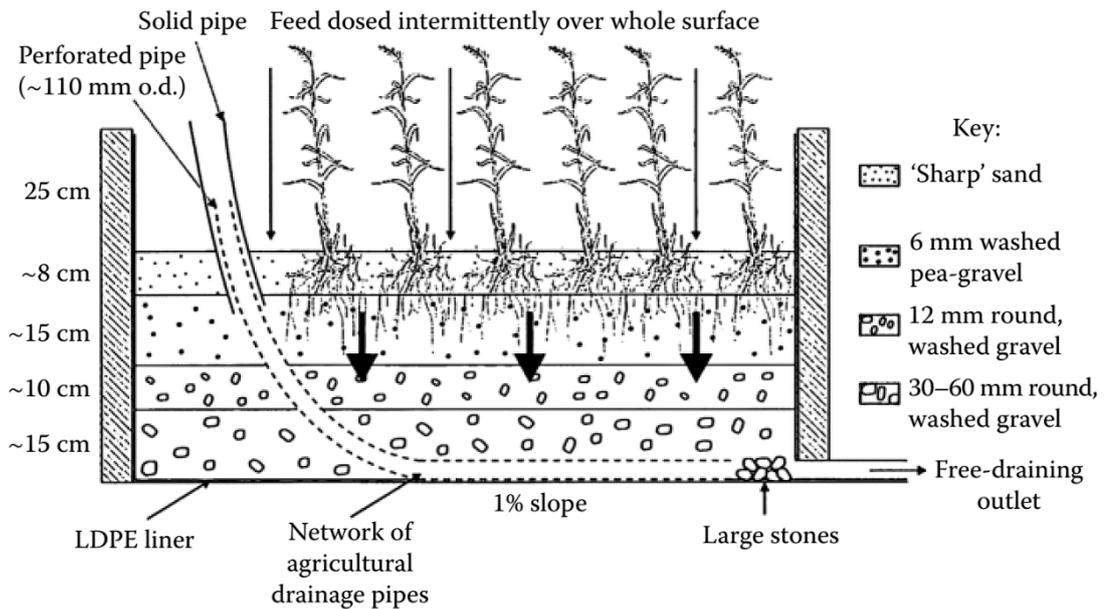


Figura 3.4 – Esquema básico de un humedal construido de flujo subsuperficial vertical (VF) (de Kadlec & Wallace 2009, p7)

Los humedales de flujo horizontal (HSSF) tienen una capacidad limitada de oxidar amonio, debido a la baja transferencia de oxígeno. Los humedales de flujo vertical, en cambio, fueron diseñados inicialmente para proveer mayores niveles de oxígeno, produciendo un efluente de salida nitrificado. Por esta razón, son generalmente utilizados para efluentes con altos niveles de amonio, como los lixiviados de rellenos sanitarios o las aguas residuales de la industria alimenticia. También es común utilizar estos humedales para deshidratar lodos estabilizados de plantas depuradoras o en serie con humedales de flujo horizontal para crear un sistema con nitrificación-desnitrificación (Kadlec, 2009)

### 3.5. Mecanismos de remoción de contaminantes

Los humedales artificiales son sistemas muy complejos que separan y transforman los contaminantes mediante mecanismos físicos, químicos y biológicos que pueden ocurrir simultánea o secuencialmente a medida que son atravesados por el efluente. Los dos principales mecanismos de remoción presentes en la mayoría de los humedales construidos son las separaciones de fases líquido/sólido y las transformaciones de los constituyentes. Las separaciones incluyen, típicamente, la sedimentación, la filtración, la absorción, la adsorción y el intercambio iónico. Las transformaciones pueden ser químicas, como las reacciones rédox, la floculación, la precipitación, las reacciones

ácido/base, o bien ser mediadas por microorganismos en condiciones aeróbicas, anóxicas o anaeróbicas. Estos procesos de remoción pueden tener lugar en la columna de agua, en la superficie de las plantas, en los detritos o en la rizósfera de la vegetación (USEPA, 1999)

### 3.5.1. *Sólidos suspendidos totales*

Se define como sólidos suspendidos totales (SST) a la fracción de los sólidos totales que son retenidos por un filtro de 1,2  $\mu\text{m}$ , para diferenciarlos de los sólidos filtrables. Los sólidos suspendidos incluyen a los sedimentables (que se depositan en el fondo de un cono Imhoff en sesenta minutos) y dan una idea de la fracción que puede ser removida por sedimentación. Los sólidos totales, por su parte, se determinan por método gravimétrico, secando un volumen conocido de muestra hasta peso constante. Además de los suspendidos, los sólidos totales incluyen a los sólidos filtrables, constituidos por la fracción coloidal y la fracción disuelta que atraviesa el filtro (Metcalf & Eddy, 1994).

Los sólidos suspendidos de aguas domésticas en general están constituidos por partículas orgánicas, en tanto que aguas de escorrentía o pluviales pueden poseer un alto porcentaje de material mineral. Otros efluentes más específicos pueden tener fracciones menores de sólidos suspendidos, y una mayor proporción de fracción coloidal (como establecimientos lácteos) (Kadlec & Wallace 2009). Además los sólidos suspendidos no sólo ingresan al sistema con el efluente, sino que también puede haber un ingreso neto desde la atmósfera, la escorrentía o la fauna. Por otro lado, los sólidos pueden resuspenderse dentro del sistema o ser formados por los microorganismos o la vegetación, habiendo un flujo inverso desde el humedal al líquido (Figura 3.5).

Las bajas velocidades desarrolladas dentro de un humedal aumentan la sedimentación y la intercepción de las partículas, lo cual no sólo reduce la cantidad de sólidos suspendidos, sino también la de otros contaminantes que están asociados al material que ingresa, como metales o materia orgánica. En el caso de los FSW, los principales mecanismos de remoción son la sedimentación debido al rozamiento con el fluido y la intercepción de los biofilms producidos por los microorganismos. En los HSSF, en cambio, la filtración por parte del sustrato y la precipitación de las sustancias coloidales y disueltas, son los mecanismos predominantes.

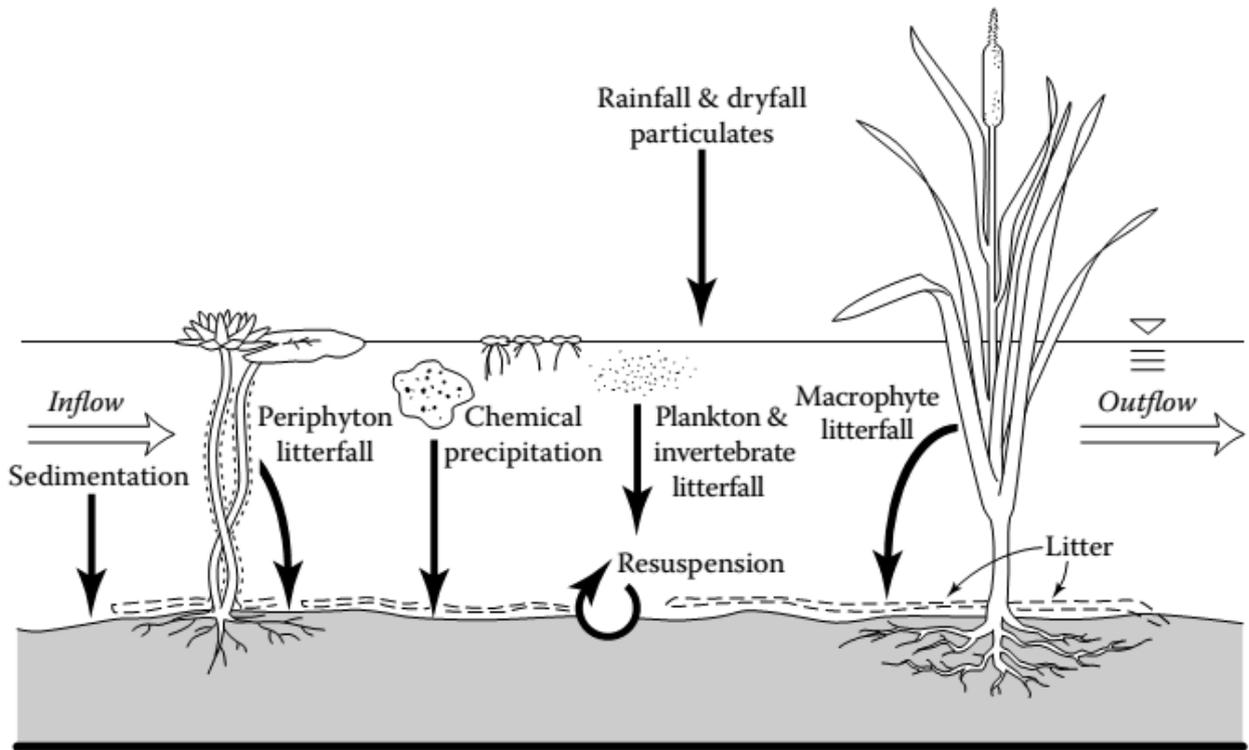


Figura 3.5 – Procesos de remoción y generación de materia particulada (de Kadlec & Wallace, p207)

Los SST pueden generar dificultades operativas en los humedales artificiales, aún con un correcto diseño del sistema de tratamiento. En los FWS, la resuspensión de las partículas sedimentadas puede aumentar la turbidez del agua. En los HSSF, la obstrucción de los poros del sustrato por acumulación de partículas sólidas, sumado a la formación de biofilms que también interceptan a los sólidos suspendidos, es un fenómeno que se denomina *clogging* y que puede alterar las características hidráulicas de estos sistemas (Figura 3.6).

### 3.5.2. Carbono

En un efluente el carbono puede hallarse en diversas formas, y su composición relativa dependerá de la naturaleza del mismo. Normalmente se encuentra como carbono disuelto o suspendido, tanto en formas orgánicas como inorgánicas. Estos compuestos pueden ser desde fácilmente biodegradables hasta altamente refractarios (Wallace & Knight, 2006).

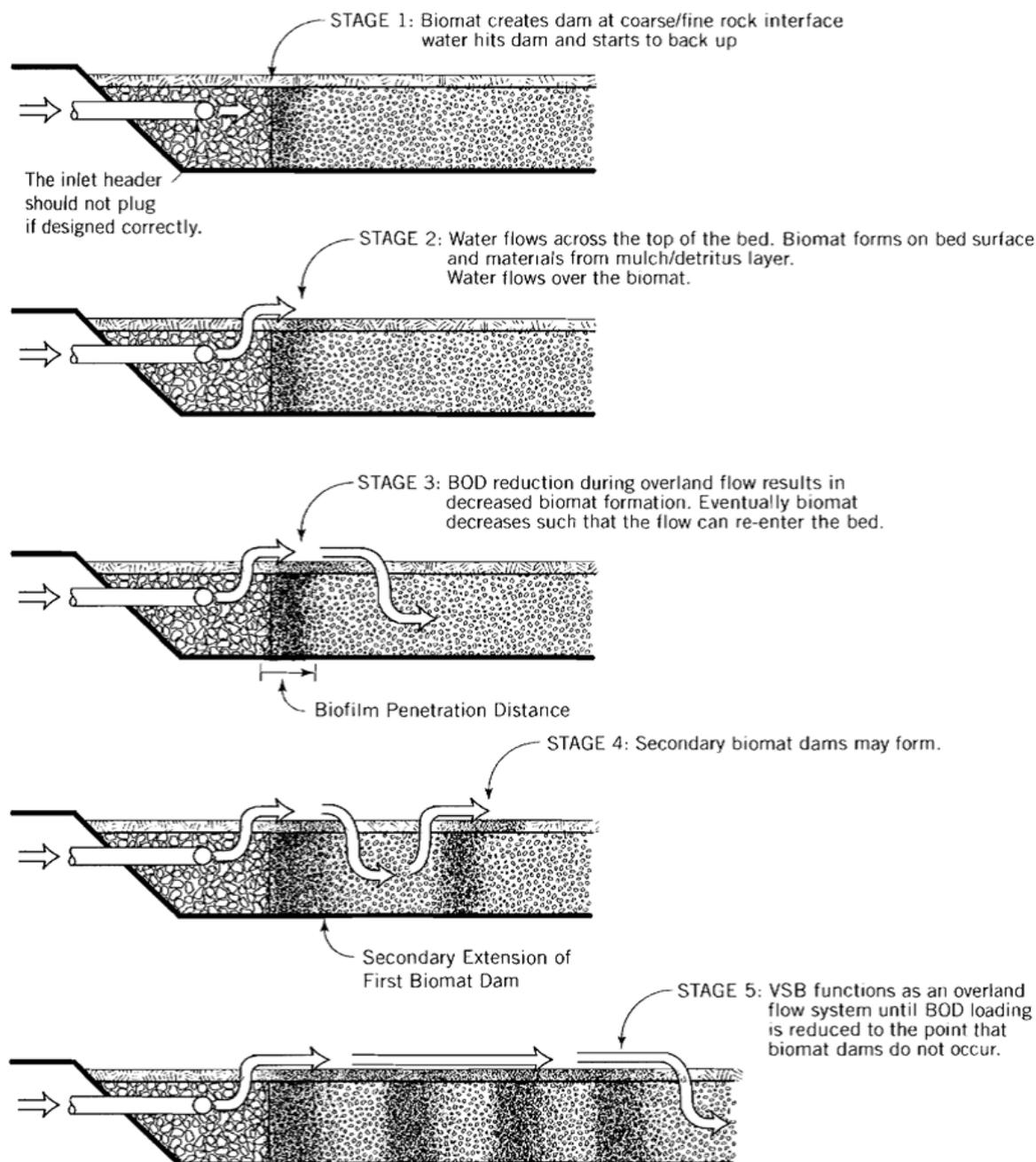


Figura 3.6 – Etapas del fenómeno de *clogging* en un HSSF (de Wallace & Knight 2006)

En general, los compuestos de carbono se estiman en función de la demanda de oxígeno necesaria para su degradación. La demanda química de oxígeno (DQO) mide la cantidad de sustancias susceptibles de ser oxidadas por medios químicos y se expresa como la cantidad equivalente necesaria de oxígeno. En principio se utiliza para medir los compuestos orgánicos de carbono, aunque también tiene interferencias con otros compuestos, como sulfuros o yoduros. La demanda biológica de oxígeno (DBO), por su parte, se utiliza para medir la cantidad de materia orgánica susceptible de ser degradada

u oxidada por medios biológicos, y también se expresa como la cantidad equivalente de oxígeno requerido. Típicamente se mide a los cinco días (DBO<sub>5</sub>), aunque también puede estimarse la demanda necesaria para oxidar toda la materia orgánica disponible (DBO<sub>U</sub>). Si bien se utiliza para estimar la cantidad de carbono orgánico biodegradable, parte del oxígeno puede ser utilizado para los procesos de nitrificación. Desde el punto de vista ambiental, la DQO y la DBO son los parámetros más utilizados para caracterizar un efluente, debido a que brindan una idea del impacto que tendría sobre el oxígeno disuelto de un cuerpo receptor si el efluente no es tratado.

En un humedal artificial, los compuestos orgánicos pueden ser removidos por procesos físicos (como la filtración por el sustrato, la sedimentación de las partículas suspendidas o la volatilización) y biológicos. Éstos últimos pueden darse tanto en condiciones aeróbicas como anaeróbicas. Dado que cada compuesto es degradado a velocidades diferentes, en función de los enlaces moleculares y el tamaño de las partículas, a medida que el efluente atraviesa el humedal la composición relativa varía, aumentando la proporción de los compuestos más complejos y con enlaces más estables.

Si la transferencia de oxígeno desde la atmósfera, tanto por difusión directa como facilitada por la vegetación, es suficiente para satisfacer la demanda biológica, prevalecen las condiciones aeróbicas. La degradación aeróbica es llevada a cabo por bacterias heterotróficas y puede ser resumida según la ecuación de respiración:



Cuando el suministro de oxígeno no es suficiente, como suele suceder en los sectores más profundos o estancados de los FWS o en el sustrato de los HSSF, predominan las condiciones anaeróbicas. La degradación anaeróbica es un proceso de múltiples etapas, llevado a cabo por bacterias anaeróbicas o facultativas. En las primeras etapas, la materia orgánica original es transformada en ácido acético, ácido láctico o etanol:



En una segunda etapa, las bacterias anaeróbicas que reducen sulfatos y las bacterias metanogénicas utilizan estos compuestos para producir sulfuros y metano, respectivamente:



Las bacterias que producen ácidos orgánicos (Ecuaciones [3.2] y [3.3]) pueden sobrevivir en un amplio rango de acidez del medio, en tanto que las bacterias metanogénicas sólo operan en pH comprendidos entre 6,5 y 7,5. Un aumento en la producción de ácidos orgánicos puede disminuir el pH por debajo de estos valores, permitiendo sólo la acción de las bacterias reductoras de sulfatos para utilizar el lactato y el acetato. En estas condiciones, es esperable la aparición de olores desagradables por la sobreproducción de sulfuros.

En cuanto a la fracción recalcitrante de la materia orgánica, mejor representada por la DQO, los procesos de remoción en los humedales son casi tan eficientes como en la DBO, debido en parte a las altas eficiencias en la remoción de sólidos totales. Las remociones de DBO y de DQO en los HSSF varían del 75-93% y del 64-82%, respectivamente (Vymazal & Kröpfelová, 2009)

### 3.5.3. Nitrógeno

Por lo general la remoción de los compuestos de nitrógeno es clave en el funcionamiento de un sistema de tratamiento de efluentes, debido a su papel en la eutrofización de los cuerpos de agua y la toxicidad de algunas de sus formas para los invertebrados y vertebrados acuáticos. Generalmente, el nitrógeno se encuentra en formas inorgánicas como amonio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y nitrógeno diatómico ( $\text{N}_2$ ). También puede presentarse en compuestos orgánicos como aminoácidos, urea, ácido úrico, purinas y pirimidinas, tanto en forma disuelta como particulada. En algunos efluentes industriales más específicos el nitrógeno puede estar presente en otras formas, como aminas, imidas, cianuro, piridinas, entre otros. Entre las determinaciones de laboratorio para cuantificar el nitrógeno de los efluentes, las más comunes son: nitrógeno de amonio, nitrógeno de nitratos, nitrógeno de nitritos, nitrógeno total Kjeldahl (NTK = nitrógeno orgánico + nitrógeno de amonio) y nitrógeno total (NT= NTK + nitratos + nitritos).

En un humedal artificial los compuestos de nitrógeno pueden desplazarse de un lugar a otro sin transformaciones moleculares, a través de procesos tales como la sedimentación, la resuspensión, la difusión, la translocación entre partes de la vegetación, la volatilización a la atmósfera, y la adsorción en el sustrato. Por otro lado, los compuestos de nitrógeno pueden sufrir transformaciones mediante cinco principales procesos: la amonificación, la nitrificación, la denitrificación, la asimilación y la descomposición, Figura 3.7 (Kadlec & Wallace, 2009).

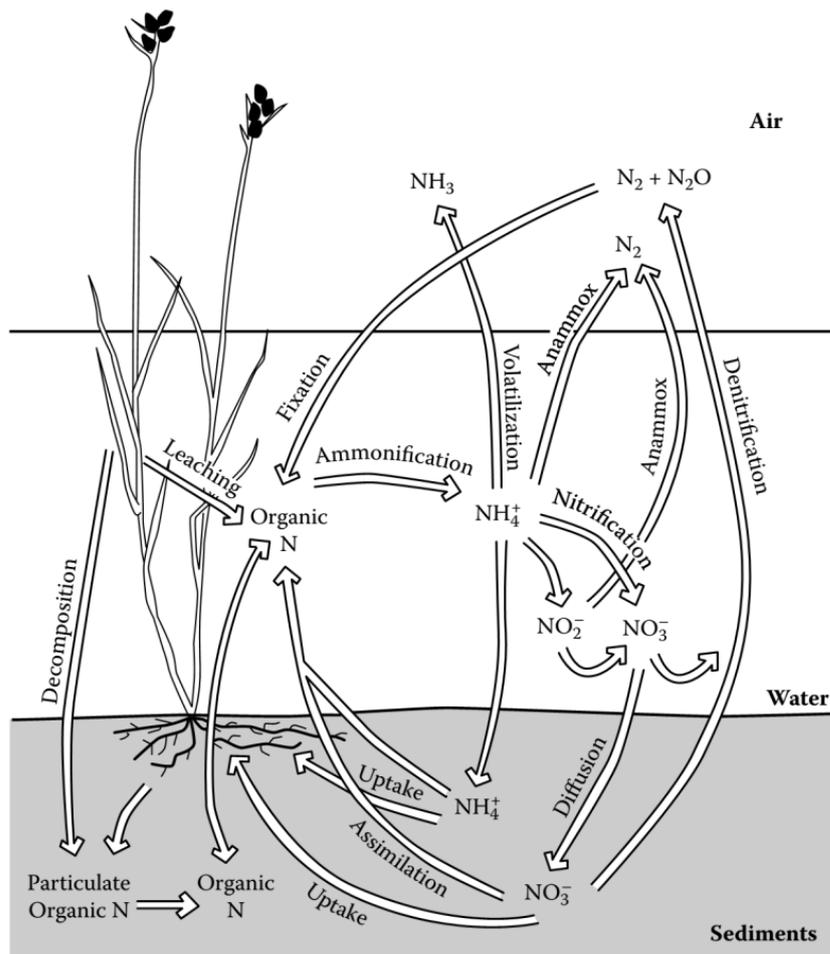


Figura 3.7. Procesos de remoción de nitrógeno (de Kadlec & Wallace, p273)

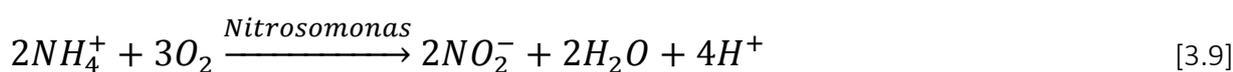
La remoción de nitrógeno por las plantas está limitada a la tasa de crecimiento de la especie y la concentración de nutrientes en los tejidos. Por esta razón para fitorremediación se suelen escoger especies de rápido crecimiento y alta acumulación de nitrógeno en tejidos, teniendo en cuenta que para removerlo efectivamente del sistema es necesario realizar cortes y extraer el tejido vegetal muerto.

La remoción por adsorción en la matriz del sustrato está por lo general limitada al ion amonio, ya que su carga positiva lo hace susceptible del intercambio catiónico. Por ende, las características del sustrato son importantes para definir la cantidad de amonio que puede ser adsorbido y la velocidad con

la que se remueve. Sin embargo, no se considera un sumidero de nitrógeno de largo plazo puesto que es fácilmente reversible, y cuando el amonio se remueve por otros procesos, el sustrato puede actuar como fuente ante el cambio de las condiciones de equilibrio (Vymazal et al, 1998)

La amonificación es la transformación de los compuestos orgánicos de nitrógeno en compuestos inorgánicos, principalmente amonio, y es el primer paso de la mineralización del nitrógeno en los humedales. Este proceso ocurre tanto en condiciones aerobias como anaerobias, siendo más rápido en presencia de oxígeno. Se considera que son bacterias heterotróficas las que llevan a cabo la amonificación (Kadlec & Wallace, 2009). Se ha hallado que el proceso depende de la temperatura, del pH, de la relación C/N, de los nutrientes disponibles en el sistema, y de la textura y estructura del sustrato (Reddy & Patrick, 1984).

La nitrificación, por otro lado, es el principal mecanismo para transformar el amonio en nitratos y nitritos, proceso que es mediado por bacterias autótrofas en presencia de oxígeno:



Estas reacciones se producen en un rango óptimo de pH que va desde 7,2 a 9,0 (Metcalf & Eddy, 1994). Si bien la nitrificación reduce el pH por la formación de  $H^+$ , en general en los humedales se mantiene cerca de la neutralidad por efecto de otros procesos.

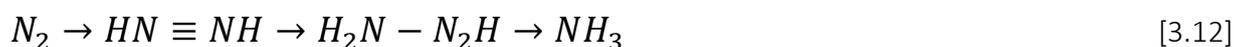
La denitrificación consiste en la conversión de nitrato en nitrógeno diatómico, a través de una serie de transformaciones mediadas por bacterias heterótroficas facultativas (entre las cuales se encuentran *Pseudomonas*, *Bacillus*, *Agrobacterium*, *Thiobacillus*, *Nitrosomonas*, *Rhodopseudomonas*, *Rhizobium*, *Halobacterium* y *Neisseria*):



Teóricamente la denitrificación no ocurre en presencia de oxígeno, aunque se han observado casos en los que ocurre en concentraciones no superiores a 0,3-1,5 mg/L de oxígeno (USEPA, 1993a). La reacción es irreversible y ocurre en presencia de fuentes de carbono, por lo que hay una correlación entre la materia orgánica soluble y el potencial de denitrificación (Wallace & Knight, 2006).

Finalmente, la fijación de nitrógeno es otro mecanismo importante en el balance de este nutriente en un humedal artificial y consiste en la reducción del nitrógeno gaseoso que difunde desde

la atmósfera en amonio. Es un proceso mediado por bacterias heterótrofas y autótrofas (como las de vida libre *Klebsiella* y *Clostridium*, y otras asociadas a plantas, como *Azotobacter*), cianobacterias (como *Nostoc* y *Anabaena*) y plantas vasculares. Es un proceso rápido que no ha sido descrito en su totalidad todavía, pero que se supone tiene varias etapas:



#### 3.5.4. Fósforo

En un efluente el fósforo se encuentra principalmente como ortofosfatos, fosfatos condensados y fosfatos orgánicos. Prácticamente todo el fósforo se encuentra como fosfatos debido a la oxidación biológica (Cooper et al, 1996). Estos compuestos pueden encontrarse disueltos libres, disueltos pero asociados a sólidos suspendidos, adsorbidos en la superficie del sustrato, o contenidos en la biomasa o en la estructura del sustrato. Para comprender mejor los procesos de remoción de fósforo, un humedal artificial puede ser visualizado como un grupo de compartimentos entre los que los compuestos de fósforo se transfieren: agua, vegetación, microbiota, hojarasca y suelo (Kadlec & Wallace, 2006). Los procesos más importantes que ocurren entre estos compartimentos son: la adsorción del sustrato, la asimilación en tejidos vegetales, la precipitación química y la sedimentación (Figura 3.8)

La cantidad de fósforo que puede ser adsorbida por el sustrato depende de las características del mismo y de las concentraciones del efluente. El proceso puede ser descrito por isothermas de transferencia de masa entre un fluido y un sólido, como las de Langmuir que dependen de mineralogía del sustrato para determinar la capacidad máxima de adsorción (Del Bubba et al, 2003). Se ha encontrado que la adsorción no sólo depende de la mineralogía (contenido de hierro, aluminio o calcio, por ejemplo) sino también de la cantidad de materia orgánica, del tamaño de las partículas y de la temperatura (puesto que se trata de una reacción endotérmica). El mayor problema con la adsorción es que está limitada por la cantidad de espacios disponibles para que ocurra la transferencia, una vez que están saturados la adsorción cesa. Por esta razón, generalmente es necesario cambiar el sustrato cada cierta cantidad de años, que depende de las concentraciones de entrada y de salida del fósforo.

Por otro lado, debido a que el fósforo es un nutriente para la vegetación, en los períodos de crecimiento la vegetación extrae compuestos de fósforo del efluente y el sustrato. Sin embargo, aun con especies de rápido crecimiento este no es el principal mecanismo de remoción de fósforo, sobre todo si las concentraciones en el efluente son elevadas. Además, el fósforo puede retornar al líquido

desde la biomasa muerta (detritos), sobre todo si la vegetación no es segada frecuentemente. En el caso de los HSSF este aporte puede ser menor, debido a que los detritos se acumulan por encima del sustrato y son menos susceptibles a la descomposición que en los FWS (Kadlec & Wallace, 2009)

La precipitación química consiste en la reacción de los compuestos de fósforo con cationes metálicos tales como Fe, Al, Ca y Mg para formar compuestos cristalinos amorfos. El proceso de remoción por precipitación química depende de la composición química del efluente y del sustrato, del pH, de la temperatura y de las condiciones de óxido-reducción del medio. Además los compuestos de fósforo pueden co-precipitar con otros minerales, como carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ).

Finalmente los compuestos de fósforo, principalmente aquellos adsorbidos o contenidos en sólidos suspendidos pueden ser removidos por sedimentación o filtración, tal como se describió para los SST.

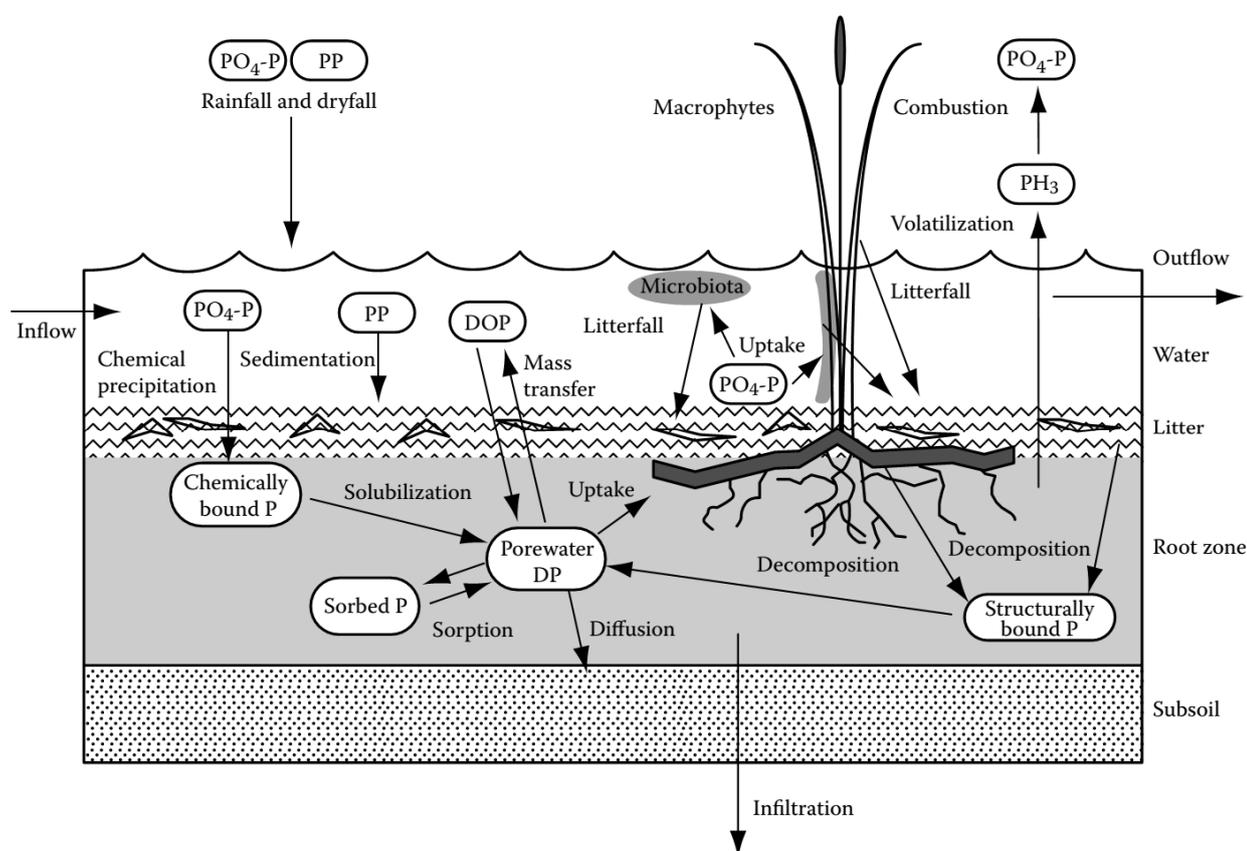


Figura 3.8. Procesos de remoción de fósforo (de Kadlec & Wallace, p350)

### 3.5.5. Patógenos

Los microorganismos patógenos comúnmente encontrados en efluentes son helmintos, protozoarios, hongos, bacterias y virus. Sin embargo, las determinaciones de rutina de estos microorganismos no es recomendada debido al costo, a la duración y a la necesidad de laboratorios especializados (USEPA, 2000). Es por esto que normalmente se utilizan microorganismos indicadores que tienen un comportamiento semejante a los patógenos, pero son más rápidos, económicos y fáciles de determinar. Se puede asumir que la presencia de indicadores evidencia la presencia de microorganismos patógenos, los cuales tienen respuestas parecidas a factores como el pH, la temperatura, la presencia de nutrientes, el tiempo de retención hidráulica y los sistemas de desinfección. Entre los indicadores más comunes se encuentran (Bitton, 2005):

- *Coliformes totales*: El grupo de coliformes totales pertenece a la familia de *enterobacteriaceae* e incluye las bacterias aeróbicas facultativas, gram negativas, no formadoras de esporas, que fermentan lactosa para formar gas en 48 horas a 35°C. El grupo incluye *Escherichia coli*, *Enterobacter*, *Klebsiella* y *Citrobacter*.
- *Coliformes fecales*: Las coliformes fecales, o termotolerantes, incluyen todas las coliformes que pueden fermentar lactosa a 44,5°C. Este grupo incluye bacterias del tipo *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae*. Su presencia indica contaminación por materia fecal de animales de sangre caliente. Si bien tienen supervivencia semejante a bacterias patógenas, su resistencia a la desinfección es menor que en virus y protozoos, por lo que su utilización es limitada.
- *Streptococos fecales*: Este grupo incluye a *Streptococcus faecalis*, *S. bovis*, *S. equinus* y *S. avium*. Son utilizados para detectar contaminación fecal, ya que pertenecen a los intestinos de animales de sangre caliente. Su supervivencia es mayor que otras bacterias indicadores, por lo que suelen ser utilizadas para inferir la presencia de virus patógenos.
- *Bacterias anaeróbicas*: Comprende principalmente a las bacterias *Clostridium perfringens* y *Bifidobacterium*. El primero es de la familia de Clostridia, bacterias oportunistas responsables de enfermedades como la gangrena, el tétanos y el botulismo. *C. perfringens* es una bacteria anaeróbica, gram positiva, formadora de endosporas y reductora de sulfitos, y representa aproximadamente el 0,5% de la microflora intestinal. Las esporas son muy resistentes, detectadas en medio con sulfitos, y son utilizadas para indicar la presencia de virus y protozoos patógenos. Por otro lado, las bifidobacterias son un grupo anaeróbico, no formadoras de esporas, gram positivas, de las más comunes en la flora intestinal. Como varias de ellas (*B.*

*bifidum*, *B. adolescentis*, *B. infantis*, *D. dentium*) están asociadas principalmente con humanos, su presencia puede ayudar a distinguir contaminación fecal humana de la provocada por otros animales.

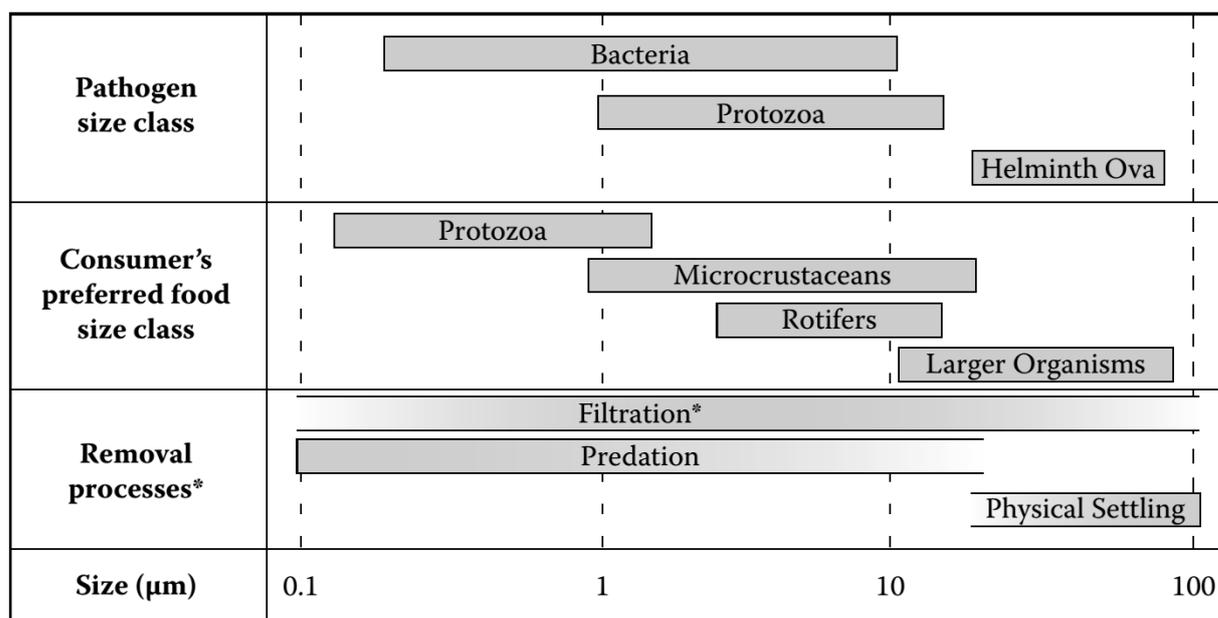
- *Bacterias heterótrofas*: Las bacterias heterótrofas representan a las bacterias aeróbicas y anaeróbicas facultativas que degradan a los compuestos orgánicos para obtener energía. El número depende del medio en el que se reproducen, el periodo de incubación y la temperatura. Este grupo incluye a las bacterias gram negativas pertenecientes al género *Pseudomonas*, *Aeromonas*, *Klebsiella*, *Flavobacterium*, *Enterobacter*, *Citrobacter*, *Serratia*, *Acinetobacter*, *Proteus*, *Alcaligenes* y *Moraxella*. Este grupo ha demostrado ser el indicador más sensible para la determinación de la remoción e inactivación de microorganismos patógenos.

Otros indicadores típicamente utilizados son la determinación de esporas de bacterias, de huevos viables de helmintos y de bacteriófagos (virus que afectan bacterias, como el virus MS-2).

Los microorganismos patógenos generalmente ingresan al sistema asociados a los sólidos suspendidos o bien en formas libres en suspensión. En cualquier caso, inicialmente son removidos por los mismos mecanismos que en SST, tales como sedimentación, filtración o adsorción. Una vez que son separados de la matriz sólida los microorganismos son retenidos por los biofilms formados en el sustrato o quedan contenidos en el agua dentro de los poros del mismo. Dentro de un humedal artificial, estos microorganismos deben competir con aquellos que son nativos del ecosistema en condiciones de temperatura, pH y concentración de nutrientes que son desfavorables para organismos intestinales. Además pueden ser removidos por predación o por exposición a radiación UV si se encuentran cerca de la superficie (Figura 3.9).

### 3.5.6. Metales pesados

El término metal pesado hace referencia a un grupo no muy bien definido de compuestos que presentan propiedades metálicas y de alta densidad. Sin embargo el término está siendo reemplazado por el de compuestos potencialmente tóxicos ya que generalmente se incluyen otros elementos sin estas propiedades. Típicamente los metales pesados más problemáticos para el medio ambiente son arsénico, cadmio, cromo, cobre, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio y zinc, debido a que, aun en bajas concentraciones, pueden resultar tóxicos.



\*Note: Filtration processes are system dependent.

Figura 3.9. Procesos de remoción de patógenos (de Kadlec & Wallace, p486)

Los metales ingresan a un humedal artificial asociados a las partículas de sólidos suspendidos o solubilizados en el efluente. Los mecanismos de remoción principales para metales son el intercambio catiónico con el sustrato, la formación de quelatos con compuestos presentes en los sedimentos, la unión con materiales húmicos, la precipitación química como sales, sulfatos o carbonatos, y la asimilación y translocación en los tejidos vegetales. Algunos metales también son asimilados en la biomasa microbiana. Si bien por lo general quedan inmovilizados en un humedal artificial, si varía el pH o las condiciones de óxido-reducción los metales pueden ser devueltos a la fase líquida.

Cuando los metales son asimilados en la biomasa vegetal, los restos generados durante las tareas de limpieza o segado de la vegetación constituyen un residuo peligroso<sup>1</sup>, y deben ser tratados adecuadamente para evitar que estos contaminantes regresen al ambiente. En la actualidad existen diversas formas de disponer de estos residuos vegetales, como la disposición directa en sitios preparados, la compactación, el compostaje, la pirolisis, la extracción líquida y la incineración con reutilización de las cenizas, siendo esta última la más común (Sas-Nowosielska et al, 2004).

<sup>1</sup> De acuerdo a la Ley Provincial de Residuos Especiales N°3.250, por poseer constituyentes listados en el Anexo III



## 4. El sistema Vetiver



#### 4.1. Antecedentes del sistema Vetiver

Inicialmente desarrollado por el Banco Mundial en la década de 1980 para la fitorremediación de suelos y agua en la India, el sistema Vetiver se basa en la aplicación de la gramínea *Chrysopogon zizanioides*, también conocida como pasto Vetiver (Figura 4.1). La investigación y desarrollo de este sistema se debe principalmente a *The Vetiver Network International (TVNI)*<sup>1</sup>, una organización internacional no gubernamental y sin fines de lucro, creada en 1989, y entre cuyos principales objetivos se encuentran la investigación, la documentación, el asesoramiento y la difusión de la información sobre esta especie y sus aplicaciones. Actualmente este sistema es utilizado en más de cien países, entre ellos Australia, Brasil, Chile, China, Colombia, Estados Unidos, Gran Bretaña, Sudáfrica, Tailandia y Venezuela.

Es descrito como un sistema simple, económico, de bajo mantenimiento, de alta eficiencia y ambientalmente amigable para diversas aplicaciones, entre las que se pueden enumerar: (i) la estabilización de suelos y pendientes, (ii) la fitorremediación de suelos contaminados, (iii) la depuración de efluentes de diversos orígenes, (iv) la protección de infraestructura y (v) la reducción de la vulnerabilidad a desastres naturales.



Figura 4.1 – Pasto vetiver utilizado en la conservación de suelos agrícolas (de The Vetiver Network International TVNI)

---

<sup>1</sup> <http://www.vetiver.org/>

## 4.2. Características de la especie

El vetiver (*Chrysopogon zizanioides*, antes conocida como *Vetiveria zizanioides*) es una gramínea perenne descrita originalmente por Guy Edouard Roberty en 1960<sup>2</sup> y que, debido a sus características particulares, resultó atractiva para la fitorremediación y la bioingeniería. Sus hojas son relativamente rígidas, largas y angostas, y pueden superar fácilmente los 2 m de altura en condiciones adecuadas de crecimiento. Por otro lado, carece de rizomas y estomas, desarrollándose en grandes macollos (de hasta 0,5 m de diámetro) a partir de una masa radicular muy ramificada y esponjosa. En algunas aplicaciones, las raíces pueden desarrollarse rápidamente hasta alcanzar los 4 m de profundidad, Figura 4.2 (Truong et al, 2008). La inflorescencia se da en una panícula que generalmente alcanza los 40 cm de largo, produciendo semillas estériles que se reproducen con extrema dificultad (Hopkinson, 2002), por lo que se considera una especie no invasiva. Se ha observado una longevidad promedio de cincuenta años.



Figura 4.2 – Pasto Vetiver. Izquierda: parte aérea con panículas florecidas. Derecha: sistema radicular (de The Vetiver Network International TVNI)

<sup>2</sup> Bulletin de l'Institut Française d'Afrique Noire 22:106 1960

Sus hojas son palatables y se ha informado un valor nutricional de 1,1% de nitrógeno, 0,17% de fósforo, 2,2% de potasio, 3,3% de proteína bruta (proteínas, péptidos, aminoácidos, amidas, bases nitrogenadas), 0,4% de grasa bruta (ceras, resinas, lípidos complejos, pigmentos) y 7,1% de fibra bruta (celulosa, hemicelulosa, lignina insoluble) (Truong et al, 2008).

### 4.3. Adaptabilidad y tolerancia de la especie

Otra característica notable de esta especie es su gran capacidad para adaptarse a condiciones ambientales desfavorables, lo que la hace atractiva para la fitorremediación en variedad de situaciones.

#### 4.3.1. Condiciones climáticas

Se ha informado que la planta puede sobrevivir en condiciones de escasas precipitaciones (250 mm anuales) y de abundantes (5000 mm anuales), con periodos de hasta 6 meses de sequía o 4 meses de anegamiento (Dahn et al, 2009). Se han encontrado resistencias promedio de 75 MPa, por lo que puede resistir fácilmente corrientes fuertes de agua. Además se ha observado una tolerancia a temperaturas extremas (de -22 a 60°C) incluso a 2800 msnm, y una importante capacidad de rebrote tras un incendio (Figura 4.3).

Es una planta C4, lo que le confiere una mayor eficiencia fotosintética en condiciones de alta intensidad lumínica y elevadas temperaturas. Si bien se han observado casos de crecimiento normal aún con pocas horas de luz directa por día, la especie es intolerante a la sombra, al punto tal de frenar su crecimiento y eventualmente erradicarla. En condiciones climáticas óptimas, se ha estimado que por cada kilogramo de tejido vegetal seco, la planta es capaz de consumir 6,86 L/d de agua. En el pico de su ciclo de crecimiento, la productividad potencial de la especie es de 40,7 t/ha (Índice de Área Foliar cercano a 14), con un consumo de agua de 279 m<sup>3</sup>/ha/d (Truong y Smeal, 2003)



Figura 4.3 – Tolerancia de la planta a incendios forestales, a la derecha: dos meses luego del incendio (de Truong et al 2008, p11)

#### 4.3.2. Condiciones edáficas

Por otro lado, la especie ha demostrado una tolerancia notable a condiciones edáficas adversas. Sobrevive en pH comprendidos entre 3,3 y 12,5, con una conductividad eléctrica máxima de 47,5 mS/cm (Figura 4.4), y un contenido elevado de aluminio (87%), sodio (48%), manganeso (578 mg/kg) y magnesio (2400 mg/kg). A su vez, puede establecerse en suelos infértiles debido a una estrecha asociación simbiótica con microorganismos en su rizósfera, como bacterias fijadoras de nitrógeno, bacterias y hongos que solubilizan fósforo, micorrizas y hongos celulíticos (Dahn et al, 2009)



Figura 4.4 – Vetiver creciendo en suelo salino (CE 46 mS/cm, pH 7,1 - 7,7), en el que se observan los parches de sal (de The Vetiver Network International TVNI)

### 4.3.3. Tolerancia a contaminantes

Según estudios realizados por Wagner et al (2003), el vetiver puede crecer sin problemas a concentraciones superiores a 6.000 kg/ha/año de nitrógeno y 250 kg/ha/año de fósforo, sin presentar aparentemente ningún efecto adverso hasta concentraciones de 10.000 kg/ha/año y 1.000 kg/ha/año, respectivamente (Figura 4.5). Por otro lado, presenta una notable tolerancia a altas concentraciones de metales pesados, muy por encima de la mayoría de otras plantas vasculares (Tabla 4.1, Dahn et al 2009)

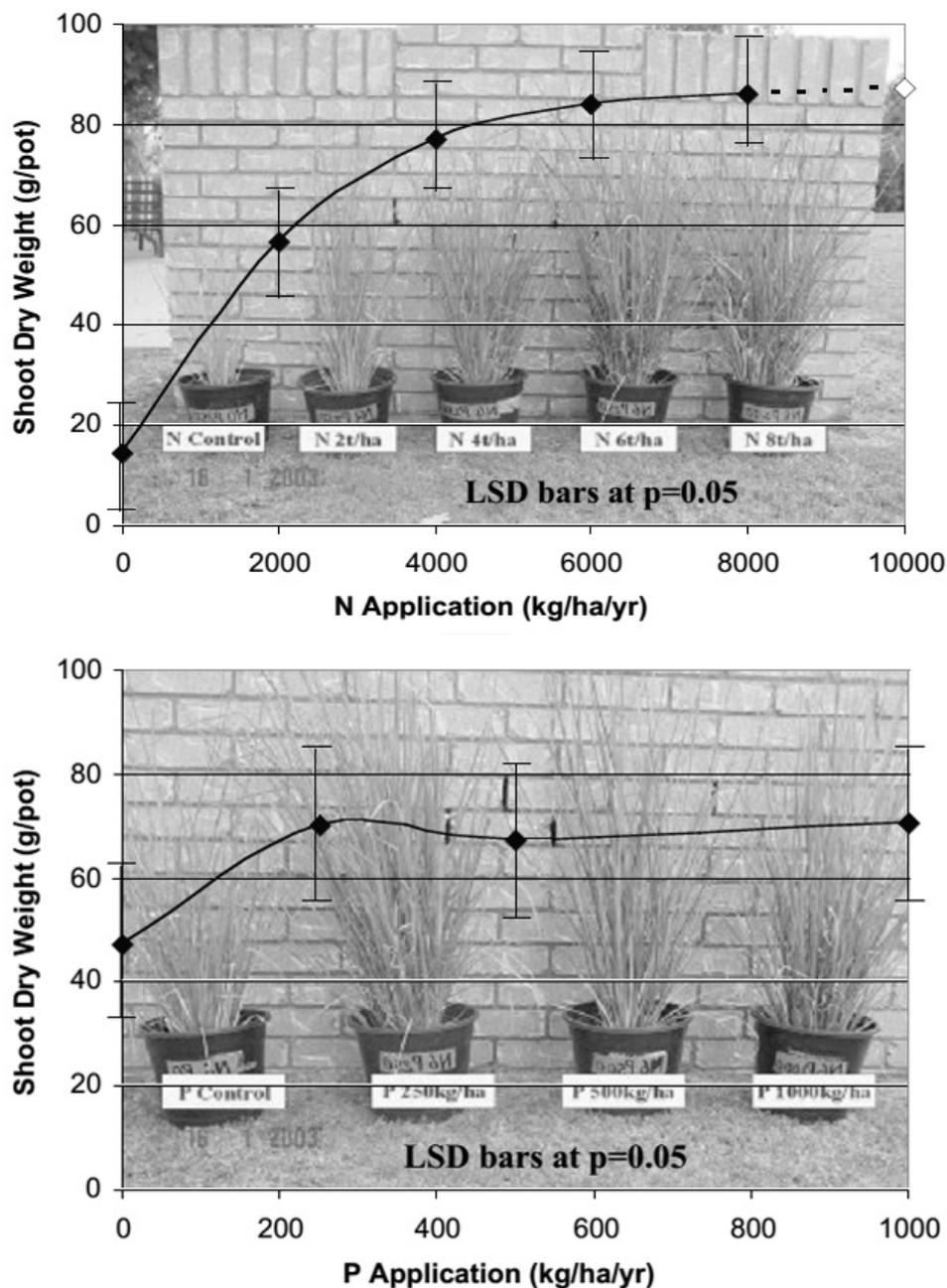


Figura 4.5 – Tolerancia del Vetiver a altas concentraciones de nitrógeno y fósforo (de Wagner et al 2003, p103)

	Mayoría de las plantas vasculares	Vetiver
	mg/kg	mg/kg
Arsénico	2,0	100-250
Cadmio	1,5	20-60
Cobre	-	50-100
Cromo	-	200-600
Plomo	-	> 1500
Mercurio	-	> 6
Níquel	7-10	100
Selenio	2-14	> 74
Zinc	-	> 750

Tabla 4.1 – Valores umbrales de tolerancia para diversos metales pesados (de Dahn et al 2009, p667)

Además, el vetiver puede resistir concentraciones elevadas de contaminantes orgánicos, como fenol (hasta 1.000 mg/L), 2,4,6-trinitrolueno (hasta 40 mg/L), benzo[a]pireno (hasta 100 mg/kg de suelo), atrazina (hasta 2000 µg/L), entre otros. La especie, sin embargo, no es resistente al glifosato.

#### 4.4. El sistema Vetiver para el tratamiento de efluentes

Por las características mencionadas anteriormente la especie es particularmente útil para proyectos de fitorremediación y bioingeniería, en variedad de ambientes y frente a un amplio rango de condiciones que podrían resultar adversas para otras especies comúnmente utilizadas. Además posee otras ventajas como el bajo costo, bajo mantenimiento, un rápido establecimiento (en cuatro o cinco meses se vuelve efectiva) y la disponibilidad de información actualizada por parte de la The Vetiver Network International (Hengchaovanovich, 2000).

Debido a su alto consumo de agua y capacidad de absorber contaminantes, la especie resulta muy eficiente para el tratamiento de efluentes, reduciendo los volúmenes a tratar y eliminando parte de los contaminantes. Típicamente es utilizada en sistemas de irrigación aunque también ha dado buenos resultados en humedales artificiales, balsas en lagunas e hidroponía. En la Tabla 4.2 se resumen algunos ejemplos de utilización de esta especie para el tratamiento de efluentes.

La especie ha sido utilizada con buenos resultados en humedales construidos para tratar aguas residuales domésticas (Kantawanichkul et al, 2013), lixiviados de rellenos sanitarios (Bwire et al, 2011) y otros efluentes de diversos orígenes (Dhanya & Jaya, 2013) (Tabla 4.3).

Lugar	Efluente	Sistema	Entrada	Salida	Referencia
Brisbane, Australia (Figura 4.6)	Aguas residuales domésticas	Irrigación subsuperficial (50m <sup>2</sup> )	NT: 93 mg/L PT: 1,3 mg/L CF: 500/100mL	N: 0,7 mg/L P: 0,2 mg/L CF: 23/100mL	Truong & Hart, 2001
Queensland, Australia (Figura 4.7)	Aguas residuales domésticas (500 m <sup>3</sup> /d)	Sistema hidropónico en lagunas y posterior irrigación subsuperficial	pH: 7,3-8,0 OD: 0-2 mg/L BOD <sub>5</sub> : 130-300 mg/L SS: 200-500 mg/L NT: 30-80 mg/L PT: 10-20 mg/L	pH: 7,6-9,2 OD: 8,1-9,2 mg/L BOD <sub>5</sub> : 7-11 mg/L SS: 11-16 mg/L NT: 4,1-5,7 mg/L PT: 1,4-3,3 mg/L	Truong et al, 2008
Guangzhou, China	Lixiviado de relleno sanitario	Irrigación subsuperficial	PT: 2,6-4,4 mg/L NT: 293,8-1125 mg/L CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 395-1183 mg/L DQO: 246-1120 mg/L Cl: 812-1406 mg/L	PT: 0,9-1,3 mg/L NT: 84,8-232,2 mg/L CO <sub>3</sub> <sup>-</sup> : 162-365 mg/L DQO: 93,7-347,2 mg/L Cl: 748-1103 mg/L	Xia et al, 2000
Guangzhou, China	Efluente de feedlot porcino	Humedal artificial	DQO: 825 mg/L BOD <sub>5</sub> : 500 mg/L NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 130 mg/L PT: 23 mg/L	DQO: 297 mg/L BOD <sub>5</sub> : 160 mg/L NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> : 104 mg/L PT: 19 mg/L	Liao, 2000
Brisbane, Australia	Aguas residuales domésticas (1670 L/d)	Irrigación subsuperficial	NT: 68 mg/L PT: 10,6 mg/L CF: >8000	NT: 0,13 mg/L PT: 0,152 mg/L CF: <10	Truong et al, 2008

Tabla 4.2 – Ejemplos de usos del sistema Vetiver en tratamiento de efluentes

Parámetro (mg/L)	Agua corriente		Efluente de estación de servicio (al 50%)		Efluente de pinturería (al 50%)		Aguas residuales domésticas (al 50%)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
Sólidos totales	57	59,9	30408,21	777,56	2140,64	396,02	1641,76	329,99
DBO5	N/D	0,91	5,26	0,94	6,47	1,17	44,91	7,45
DQO	N/D	2,12	320	60,8	498	90,78	1290	223,04
Nitratos	N/D	N/D	0,27	0,052	0,39	0,074	0,97	0,18
Nitritos	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Nitrógeno total	N/D	0,13	8,6	3,68	9,5	4,14	23,67	10,26
Amonio	N/D	N/D	3,9	1,75	5,1	2,21	17,61	7,84
Fósforo total	N/D	0,021	2,07	0,51	1,57	0,38	4,01	0,97
Fósforo inorgánico	N/D	N/D	1,37	0,42	1,04	0,312	2,43	0,721
Silicio	6,5	0,36	13,66	7,22	9,41	4,95	11,41	5,92
Cloro residual	56,60	2,64	97,71	45,49	621,44	277,92	83,47	37,91
Sulfatos	68,70	N/D	93,41	30,42	39,41	12,37	71,28	22,23
Calcio	36,0	1,62	65,4	23,54	557,6	190,42	110,4	37,64
Magnesio	24,0	1,21	39,2	13,48	42,6	14,52	50,4	16,56
Sodio	5,9	N/D	237,6	88,76	66,4	25,42	69,4	27,11
Potasio	0,7	N/D	40,6	16,41	47,6	19,01	50,1	19,59
Hierro	0,62	0,91	6,2	1,77	0,61	0,17	1,61	0,44

Tabla 4.3 – Resultados obtenidos en ensayos de humedales para diferentes efluentes (de Dhanya & Jaya, 2013)



Figura 4.6 – Sector de irrigación de Vetiver con aguas residuales de un edificio (de Truong & Hart, 2001)



Figura 4.7 – Sector de irrigación de Vetiver con residuales de una comunidad (de Truong et al, 2008)

# 5. Reutilización de efluentes tratados para riego



### 5.1. *La reutilización planificada*

El uso de aguas de baja calidad para riego es una práctica cada vez más frecuente en el mundo. Debido a la creciente escasez de agua segura, la necesidad de proteger al medio ambiente y de reducir los costos de tratamiento, se ha promovido internacionalmente la reutilización planificada de los efluentes tratados. La planificación consiste en la integración de este objetivo en los sistemas de tratamiento tradicionales, teniendo en cuenta la calidad del efluente en tres aspectos (Lorenzo et al, 2009):

- *Calidad sanitaria*: determinada por las concentraciones de parásitos que pueden causar enfermedades en las personas que puedan tener contacto con el agua reutilizada.
- *Calidad agronómica*: relacionada con las concentraciones de nutrientes y de elementos limitantes o tóxicos para las plantas.
- *Calidad ambiental*: aunque en principio incluye los aspectos anteriores, en la práctica está más relacionada con las concentraciones de sólidos, materia orgánica, nutrientes y elementos tóxicos que pueden provocar un impacto negativo sobre el suelo o las aguas subterráneas o superficiales.

A su vez, la implementación de un proyecto de reutilización tiene dos requisitos esenciales y complementarios (Mujeriego, 2006): (i) definir los niveles de calidad adecuados para cada uno de los posibles usos y (ii) establecer los procesos de tratamiento y los límites de calidad del efluente recomendados para cada uno de los usos previstos. Generalmente, la elaboración y aprobación de estos aspectos constituyen la faceta más discutida de un proyecto de reutilización, debido en parte a la dificultad para establecer una relación causal entre la calidad del agua y los posibles efectos sobre la salud y el medio ambiente. Por esta razón existen criterios de calidad muy diversos y heterogéneos (USEPA 2012, OMS 2006)

Siempre que se realice de forma controlada, la reutilización de efluentes tratados puede tener múltiples beneficios:

- Una nueva fuente de suministro de agua, capaz de aportar recursos hídricos adicionales, permitiendo liberar otros de mejor calidad y destinarlos a usos más exigentes.
- Una disminución en los costos de tratamiento debido a la menor exigencia en los parámetros de vertido.

- Una reducción en el aporte de contaminantes a los cursos de agua, en particular cuando la reutilización se efectúa mediante riego agrícola, de jardinería o forestal.
- Un ahorro energético, al evitar la necesidad de aportes adicionales de agua desde zonas alejadas.
- Un aprovechamiento de los nutrientes contenidos en el efluente tratado.
- Una mayor garantía de suministro, en particular en los sitios donde los cursos de aguas no son permanentes.

## 5.2. Normativas de calidad para los diferentes usos

Inicialmente las normas establecidas para el riego con efluentes reutilizados fueron bastante exigentes debido a que se basaron en la evaluación teórica de los posibles riesgos para la salud y el medio ambiente, particularmente por la posible supervivencia de microorganismos patógenos. Sin embargo, luego de años de investigación, expertos en salud pública, medio ambiente y epidemiólogos de la Organización Mundial de la Salud establecieron que el riesgo real es menor que el previsto y que no se justifica una normativa restrictiva. En 1989, se establecieron directrices basadas principalmente en la calidad real del agua de río empleada para riego sin restricciones en varios países, y se llegó a definir diferentes categorías (Tabla 5.1), estas directrices fueron rectificadas en el 2006.

Categoría	Condiciones de aprovechamiento	Grupo expuesto	Nemátodos intestinales* (media aritmética huevos/L)	Coliformes fecales (media geométrica/100 mL)
A	Riego de cultivos que se consumen crudos, campos de deportes o parques públicos	Trabajadores, consumidores, público	<1	<1000
B	Riego de cultivos de cereales, industriales, forrajeros, praderas y árboles	Trabajadores	<1	No se recomienda ninguna norma
C	Riego localizado de cultivos de la categoría B cuando los trabajadores ni el público están expuestos	Ninguno	No es aplicable	No es aplicable

\* Especies *áscaris*, *trichuris* y *anquilostomas*

Tabla 5.1 – Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de los efluentes tratados aplicados en agricultura según la OMS (adaptada de Lorenzo et al. 2009, p37)

Por otra parte, con respecto a los parámetros fisicoquímicos que pueden limitar la aplicación de efluentes tratados para riego, los diferentes marcos regulatorios se centran en pH, DBO<sub>5</sub>, sólidos en suspensión, nutrientes, metales pesados, pesticidas, salinidad y cloro residual. En este sentido la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos ha establecido directrices que fueron actualizadas en 2012 y que han servido de modelo para otras normativas internacionales (Tabla 5.2).

Tipo de reutilización	Tratamiento	Calidad	Distancia de seguridad
<b>Riegos de cultivos comestibles no procesados comercialmente</b>	Secundario	pH= 6-9 < 10 mgO <sub>2</sub> /L DBO <sub>5</sub>	15 m a fuentes o pozos de agua potable
	Filtración	< 2 UNT*	30 m de zonas permitidas al público
	Desinfección	0 CF/100 mL 1 mg/L ClO <sub>2</sub>	
<b>Riego de cultivos que se consumen procesados</b>	Secundario	pH= 6-9 < 30 mgO <sub>2</sub> /L DBO <sub>5</sub>	90 m a fuentes o pozos de agua potable
	Desinfección	< 30 mg/L SST 200 CF/100 mL 1 mg/L ClO <sub>2</sub>	30 m de zonas permitidas al público
<b>Riego de pastos de animales productores de leche y cultivos industriales</b>	Secundario	pH= 6-9 < 30 mgO <sub>2</sub> /L DBO <sub>5</sub>	90 m a fuentes o pozos de agua potable
	Desinfección	< 30 mg/L SST 200 CF/100 mL 1 mg/L ClO <sub>2</sub>	30 m de zonas permitidas al público
<b>Riego de parques, cementerios, campos de golf, lavado de coches, producción de nieve</b>	Secundario	pH= 6-9 < 10 mgO <sub>2</sub> /L DBO <sub>5</sub>	15 m a fuentes o pozos de agua potable
	Filtración	< 2 UNT	
	Desinfección	0 CF/100 mL 1 mg/L ClO <sub>2</sub>	
<b>Riego de árboles y parques con acceso público prohibido o infrecuente**</b>	Secundario	pH= 6-9 < 30 mgO <sub>2</sub> /L DBO <sub>5</sub>	90 m a fuentes o pozos de agua potable
	Desinfección	< 30 mg/L SST 200 CF/100 mL 1 mg/L ClO <sub>2</sub>	30 m de zonas permitidas al público

\*UNT Unidades nefelométricas de turbiedad

\*\*Cuando se monitorea semanalmente, se permiten máximos de 45 mgO<sub>2</sub>/L de DBO<sub>5</sub>, 45 mg/L de SST y 800 CF/100mL

Tabla 5.2 – Normativa de la USEPA para el riego con efluentes tratados (adaptada de Lorenzo et al. 2009, p40-41)

Cada país que ha desarrollado una normativa al respecto ha utilizado valores propios establecidos con diferentes criterios (Canadá 1999, Australia 2000, Sudáfrica 1996, Chile 2005, entre otros). La dificultad para aunar estos criterios se debe a las características ambientales de cada país

(disponibilidad de agua, fertilidad de los suelos), pero también de las características socioeconómicas y culturales.

En el caso de Argentina, no existe todavía un marco regulatorio específico que regule la materia de manera uniforme, si bien está expresado su importancia en los Principios Rectores de la Política Hídrica Argentina (COHIFE, 2003):

*“Las prácticas conservacionistas y el reuso del agua brindan oportunidades para el ahorro del recurso que derivan en importantes beneficios sociales, productivos y ambientales; beneficios que deben compartirse entre los múltiples usuarios del recurso. El reciclado del agua a partir de la modificación de procesos industriales, la disminución de los altos consumos de agua potable, el reuso de aguas residuales proveniente de centros urbanos e industriales en otras actividades, el aumento de eficiencia en el consumo de agua por el sector agrícola bajo riego; constituyen líneas de acción concurrentes en pos del uso racional y sustentable del recurso”*

Las principales experiencias en Argentina están relacionadas a la reutilización de aguas residuales tratadas, en la Provincia de Mendoza para el riego agrícola, en la Provincia de Chubut (Comodoro Rivadavia, Rada Tilly y Puerto Madryn) con fines forestales, y en la Provincia de Córdoba (Villa Nueva) destinada a riego para horticultura, floricultura y silvicultura. En el caso de la Provincia de Mendoza, la reutilización directa e indirecta se realiza de manera desordenada desde varias décadas atrás, aunque ya se cuenta actualmente con un organismo de control y una legislación correspondiente (Resolución Nº400/03, *Reglamento General Área de Cultivos Restringidos Especiales, ACRE*). En Puerto Madryn, por su parte, en el 2006 se dictó la Ordenanza Municipal Nº6301 *Reglamento del Reuso de los Efluentes Tratados para Riego Forestal*, que define los parámetros de calidad para el uso en Áreas de Riego de Acceso Restringido (ARAR) y Espacios de Riego con Acceso Público (ERAP), Tabla 5.3:

Parámetro		Límite máximo	Frecuencia
<b>A. Parámetros físicoquímicos</b>			
pH		5,5 - 9,0	Quincenal
Razón de adsorción de sodio (SAR)*		6	Quincenal
Conductividad eléctrica	S/cm	2250	Quincenal
Sustancias solubles en frío en éter etílico	mg/L	100	Trimestral
Sólidos sedimentables en 10 minutos	mL/L	0,5	Quincenal
Sólidos sedimentables en 2 horas	mL/L	0,5	Quincenal
Sólidos suspendidos totales	mg/L	300	Quincenal
<b>B. Sustancias tóxicas inorgánicas</b>			
Sulfatos	mg/L	600	Semestral
Cloruros	mg/L	500	Quincenal

Fluoruros	mg/L	5	Semestral
Sulfuros	mg/L	1	Semestral
Cianuros	mg/L	0,01	Semestral
Sodio	mg/L	500	Quincenal
Manganeso	mg/L	0,5	Semestral
Bario	mg/L	4	Semestral
Boro	mg/L	4	Semestral
Hierro total	mg/L	5	Semestral
Aluminio	mg/L	5	Semestral
Arsénico	mg/L	0,05	Semestral
Cadmio	mg/L	0,01	Semestral
Cobre	mg/L	3	Semestral
Cromo VI	mg/L	0,05	Semestral
Cromo total	mg/L	0,5	Semestral
Zinc	mg/L	10	Semestral
Níquel	mg/L	0,1	Semestral
Mercurio	mg/L	0,005	Semestral
Plomo	mg/L	0,05	Semestral
Selenio	mg/L	0,01	Semestral
Cobalto	mg/L	1	Semestral
Cloro libre residual	mg/L	**	Mensual
Potasio	mg/L	**	Semestral
<b>C. Nutrientes</b>			
Nitratos	mg/L	**	Quincenal
Nitritos	mg/L	**	Quincenal
Nitrógeno amoniacal	mg/L	**	Quincenal
Nitrógeno total	mg/L	**	Trimestral
Fosfatos	mg/L	**	Quincenal
Fósforo total	mg/L	**	Trimestral
<b>D. Parámetros orgánicos</b>			
DQO (filtrada)	mg/L	70	Quincenal
DBO (filtrada)	mg/L	30	Quincenal
Hidrocarburos totales	mg/L	10	Semestral
Fenoles	mg/L	0,05	Semestral
Detergentes	mg/L	3	Semestral
<b>E. Parámetros microbiológicos</b>			
Bacterias aerobias	UFC/mL	**	Quincenal
Coliformes totales	NMP/100mL	**	Quincenal
Coliformes fecales	NMP/100mL	1000	Quincenal
Pseudomonas aeruginosas	NMP/100mL	Según Tabla 5.1	Trimestral
Helmintos	Huevos/100mL	1	Trimestral

$$*SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{+2}+Mg^{+2})}}$$

\*\*Límite a determinar por la Autoridad de Reuso, según el uso que se le dé al efluente, estableciéndose valores para cada caso en particular

Tabla 5.3 – Parámetros de calidad para la reutilización de aguas residuales tratadas según la Ordenanza Municipal N°6301 de Puerto Madryn



## 6. Objetivos e hipótesis



## 6.1. Objetivo general

Se propone como objetivo general del Proyecto Final Integrador: *Evaluar la factibilidad del tratamiento por fitorremediación y reutilización de los lixiviados de compostaje de biosólidos de la planta depuradora de San Carlos de Bariloche utilizando un humedal artificial de Vetiver (Chrysopogon zizanioides).*

La factibilidad está determinada por la capacidad de la especie de tolerar el contaminante y de ser así, de poder diseñar un sistema de tratamiento y reutilización adecuado a la situación.

## 6.2. Objetivos específicos

Teniendo en cuenta el objetivo general, se han propuesto los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar información sobre el compostaje de biosólidos en la ciudad de San Carlos de Bariloche y las características ambientales del predio en donde se realiza.
- Recopilar información bibliográfica sobre las características de la especie Vetiver y los antecedentes en aplicaciones de fitorremediación por humedales artificiales.
- Caracterizar los lixiviados generados durante el compostaje de biosólidos mediante análisis fisicoquímicos y microbiológicos.
- Evaluar la tolerancia de la especie *Vetiver* sometida a diferentes concentraciones de lixiviados mediante ensayos de crecimiento vegetal.
- Dimensionar un humedal artificial de *Vetiver* para el tratamiento de los lixiviados, teniendo en cuenta las características del contaminante, los parámetros de calidad para reutilización y las condiciones ambientales del sitio.
- Estimar el impacto ambiental que podrían tener las diferentes etapas del proyecto del sistema de tratamiento propuesto, como así también su conveniencia en términos económicos.

## 6.3. Hipótesis

Las hipótesis en las que se basa este trabajo son:

- Los lixiviados generados por el proceso de compostaje de lodos cloacales pueden ser tratados por fitorremediación con la especie *Chrysopogon zizanioides*.

- El desarrollo de las plantas de *Vetiver* depende de la concentración de nutrientes y de la fitotoxicidad de los lixiviados.
- Es factible el empleo de humedales artificiales para el tratamiento de los lixiviados generados en el compostaje de lodos cloacales de la estación depuradora de la localidad.

# 7. Metodología



## 7.1. Características del trabajo

Con el propósito de alcanzar los objetivos mencionados en el capítulo anterior este trabajo ha sido estructurado en tres partes:

- Investigación: para evaluar la tolerancia y la adaptabilidad de la planta Vetiver al contaminante de modo de saber si es factible su utilización en un sistema de tratamiento.
- Diseño: del sistema de tratamiento y reutilización de lixiviados mediante humedales artificiales y posterior riego controlado.
- Evaluación del proyecto: tanto en su impacto ambiental como en su economicidad.

## 7.2. Investigación

### 7.2.1. Caracterización de los lixiviados

De acuerdo a los datos de la empresa se determinó la cantidad generada por año y los costos asociados a su transporte. Se tomaron muestras de lixiviados en el momento que éstos eran llevados a la planta depuradora para su tratamiento. Ocasionalmente las muestras fueron buscadas a la planta de compostaje. Las determinaciones fisicoquímicas se realizaron en el Laboratorio de la Planta Depuradora de la Cooperativa Eléctrica Bariloche (CEB) y en el Laboratorio de Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional de Río Negro (UNRN). En cada muestra se ha determinado:

- *pH*: determinación con electrodo combinado (APHA, 1992)
- *Conductividad eléctrica (CE)*: determinación con conductímetro de electrodo (APHA, 1992)
- *Demanda Biológica de Oxígeno en cinco días (DBO<sub>5</sub>)*: método 10099 HACH, con el uso de un incubador y un BODTrak que mide las diferencias de presiones producidas por el consumo de O<sub>2</sub> en una botella cerrada y constantemente agitada. Se utiliza una trampa de hidróxido de litio para capturar el CO<sub>2</sub> producido, evitando que afecte la medición de presión.
- *Sólidos totales (ST)*: método gravimétrico por evaporación en estufa a 105°C, Figura 7.1 (APHA, 1992)
- *Nitrógeno total (NT)*: método 10071 HACH, todas las formas de nitrógeno son convertidas a nitratos mediante la digestión con un persulfato alcalino. En condiciones ácidas, el nitrato reacciona con ácido cromotrópico para formar un complejo amarillo con un máximo de absorbancia a 410 nm y la concentración se determina colorimétricamente, Figura 7.2

- *Nitrógeno de amonio* : método 10031 HACH, mediante determinación colorimétrica tras el agregado de salicilato y cianurato, el compuesto adquiere un color verde, Figura 7.3
- *Nitrógeno de nitratos*: método 10020 HACH, al igual que en NT los nitratos se determinan colorimétricamente tras el agregado de ácido cromotrópico
- *Fósforo reactivo (PR)*: método 8048 HACH, los compuestos ortofosfatos reaccionan con molibdato en un medio ácido para formar un complejo que luego es reducido por ácido ascórbico, el compuesto adquiere un color azul intenso (Figura 7.4) y la concentración se mide por colorimetría (se utilizó un espectrofotómetro HACH DR/2000, Figura 7.6)

En tres ocasiones las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Agua y Suelos del Centro Regional Universitario Bariloche (CRUB) en donde se analizó: pH, conductividad eléctrica, DBO<sub>5</sub>, DQO, nitrógeno de amonio, nitrógeno de nitratos, nitrógeno de nitritos, nitrógeno total Kjeldahl (NTK), fósforo reactivo soluble, fósforo total y potasio. No se ha considerado necesario determinar metales pesados puesto que no se encuentran en altas concentraciones en el compost o en los biosólidos (Capítulo 2).

Las muestras fueron rotuladas con fecha y almacenadas en heladera hasta su utilización en el ensayo de crecimiento vegetal.

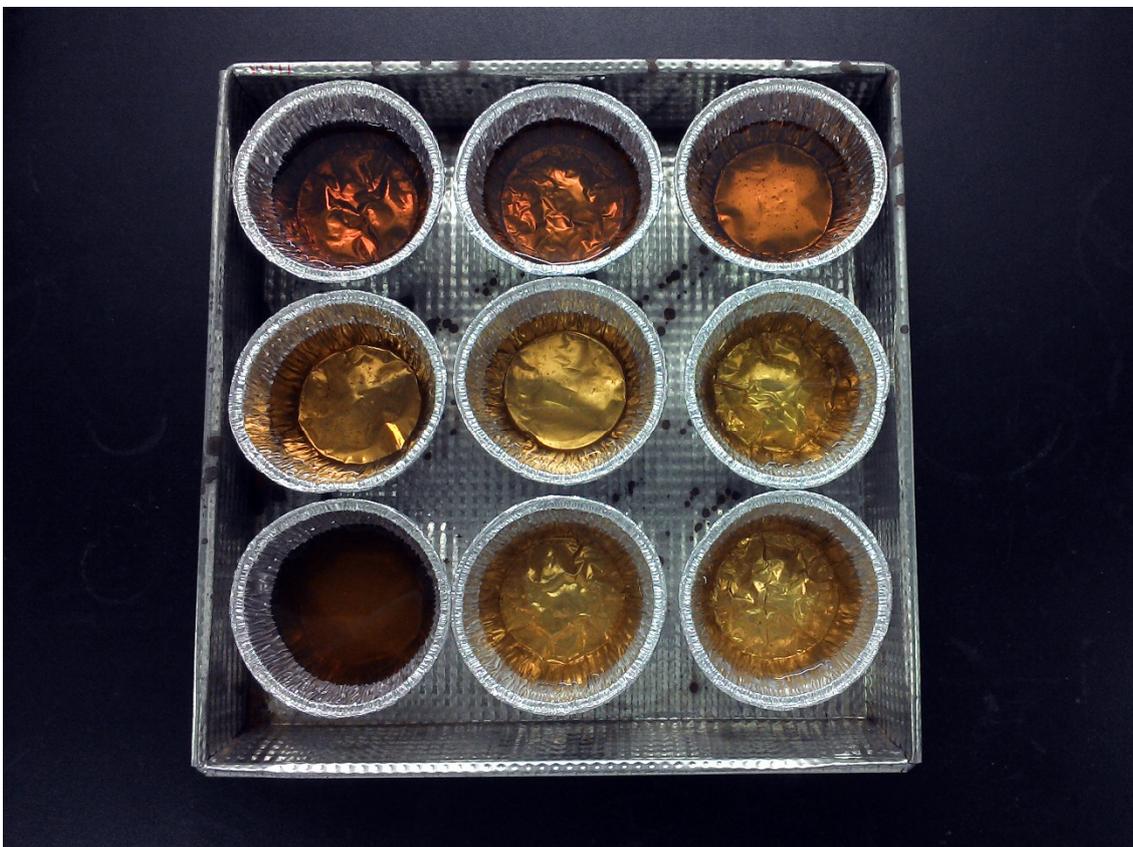


Figura 7.1 – Determinación de sólidos totales en lixiviados (Laboratorio UNRN)



Figura 7.2 – Determinación de nitrógeno total en lixiviados (Laboratorio CEB)



Figura 7.3 – Determinación de amonio en lixiviados (Laboratorio CEB)



Figura 7.4 – Determinación de fósforo reactivo en lixiviados (Laboratorio CEB)

Las determinaciones microbiológicas fueron realizadas sobre una muestra de lixiviado de fines de marzo del 2015, correspondiente a un período de escasas precipitaciones y máxima concentración de contaminantes. La muestra fue analizada en el Laboratorio de Bromatología de la Municipalidad de Villa La Angostura. Se evaluaron parámetros que se suponían elevados debido a que los lixiviados provienen de un subproducto de tratamiento de aguas residuales y de acuerdo a los requerimientos de vuelco descritos en el Capítulo 5 para la reutilización de efluentes tratados:

- *Coliformes totales*: por colimetría presuntiva en caldo Mac Conkey (48hs, 37°C) y en caldo lauril sulfato (48hs, 37°C), y posterior colimetría confirmativa en caldo verde brillante bilis (24hs, 37°C), Figura 7.5.
- *Coliformes fecales*: por colimetría confirmativa en caldo EC (24hs, 44°C) y prueba bioquímica del indol (peptona 1%, con reactivo de Kovacs, 24hs, 37°C).

- *Recuento de mesófilas aerobias*: por recuento en placas con agar nutrido (PCA) incubadas a 37°C durante 48hs.
- *Recuento de hongos y levaduras*: por recuento en placas con agar sabouraud glucosado, que contiene el antibiótico cloranfenicol, incubadas a 25°C durante 72hs.
- *Nemátodos*: mediante observación directa de alícuota centrifugada.



Figura 7.5 – Recuento de coliformes totales (Laboratorio Bromatología VLA)

### 7.2.2. *Ensayo de crecimiento vegetal*

Se plantaron 35 ejemplares de Vetiver en macetas de 3,5 L con una mezcla 2:1 de suelo y compost de residuos orgánicos urbanos (Figura 7.7). Luego de un tiempo de adaptación fueron descartados los ejemplares que no sobrevivieron, los 21 restantes se separaron en 3 grupos lo más homogéneos posibles entre sí (en cantidad de hojas y tamaño) y se realizó el corte de todas las plantas a 15 cm. Cada grupo de 7 plantas recibió un tratamiento diferente (Figura 7.8):

- **Grupo T100**: riego con 1L por semana por maceta de lixiviado sin diluir (al 100%)
- **Grupo T50**: riego con 1L por semana por maceta de lixiviado diluido al 50% con agua corriente
- **Grupo TC**: riego con 1L por semana por maceta de agua corriente



Figura 7.6 – Espectrofotómetro DR/2000 utilizado en las determinaciones colorimétricas de los protocolos HACH (Laboratorio CEB)

Los grupos T100 y T50 fueron definidos para emular las condiciones posibles en un humedal, la dilución podría darse en caso de precipitaciones. El grupo TC está definido como control. Se tomó nota del lixiviado utilizado en cada semana para poder relacionar los datos con los resultados de laboratorio. El propósito del ensayo de crecimiento vegetal fue determinar si habría diferencias entre los tratamientos mencionados en relación al crecimiento de las plantas, la cantidad de hojas nuevas y el tejido vegetal recuperado en cada corte (biomasa aérea).

El ensayo fue llevado a cabo durante 15 semanas en el Laboratorio de la CEB, en condiciones ambientales controladas. Una vez por semana se midió el largo máximo de cada planta y la cantidad de hojas. Se realizaron tres muestreos en diferentes momentos del experimento:  $t_0$  al momento de iniciar el ensayo,  $t_1$  a las 7 semanas y  $t_2$  a las 15 semanas. En los tres tiempos de muestreo se efectuó el corte de las plantas a 15 cm y se reservó el tejido vegetal, secado en estufa a 60°C. Con la ayuda de un barreno, se extrajo en  $t_1$  y  $t_2$  cerca de 100g de sustrato por maceta para su caracterización.



Figura 7.7 – Ejemplares de Vetiver en  $t_0$ , las 21 macetas fueron separadas en tres grupos, rotuladas con número de planta, tratamiento y un color para facilitar la identificación (rojo: T100, amarillo: T50 y verde: TC)



Figura 7.8 – Ejemplares de Vetiver en  $t_2$ , previo al último corte (Laboratorio CEB)

### 7.2.3. Caracterización del sustrato de crecimiento

Las muestras de sustrato de las macetas fueron secadas al aire en el Laboratorio de la UNRN y se les determinó:

- *pH*: determinación con electrodo combinado en suspensión sustrato:agua 1:2,5 y agitación mecánica (INIA, 2006)
- *Conductividad eléctrica (CE)*: determinación con conductímetro de electrodo en suspensión sustrato:agua 1:5 y agitación mecánica, Figura 7.9 (INIA, 2006)
- *Fósforo extraíble (PE)*: extracción con solución de bicarbonato de sodio 0,5 M a pH 8,5 y determinación colorimétrica del azul de molibdeno, Figura 7.10 (INIA, 2006)



Figura 7.9 – Determinación de conductividad eléctrica en suspensión del sustrato de crecimiento de las macetas (Laboratorio UNRN)

- *Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)*: las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Suelos de la EEA INTA Bariloche. Se determinó Nitrógeno Total por el método de Kjeldahl: (i) mineralización de la muestra para transformar el nitrógeno orgánico en formas amoniacales por digestión en ácido sulfúrico concentrado previo agregado de sulfato de potasio y sulfato de cobre como catalizadores, (ii) valoración del ion amonio por titulación ácido-base (SSSA, 1996).
- *Carbono orgánico (C-Org)*: determinación por Walkley-Black, oxidación con  $K_2Cr_2O_7-H_2SO_4$  y posterior titulación del dicromato remanente con sulfato ferroso heptahidratado ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ) en presencia de o-fenantrolina como indicador (Figura 7.11) (SSSA, 1996)
- *Respirometría (sólo para  $t_0$  y  $t_2$ )*: estimación del  $CO_2$  generado por la actividad microbiana dentro de un frasco cerrado en condiciones ambientales controladas. El  $CO_2$  es atrapado con NaOH y se precipita el  $CO_3Na_2$  con  $BaCl_2$ . Se titula el hidróxido remanente con HCl en presencia de fenoftaleína como indicador, Figura 7.12 (SSSA, 1996)



Figura 7.10 – Determinación de fósforo extraíble en suspensión del sustrato de crecimiento de las macetas (Laboratorio UNRN)

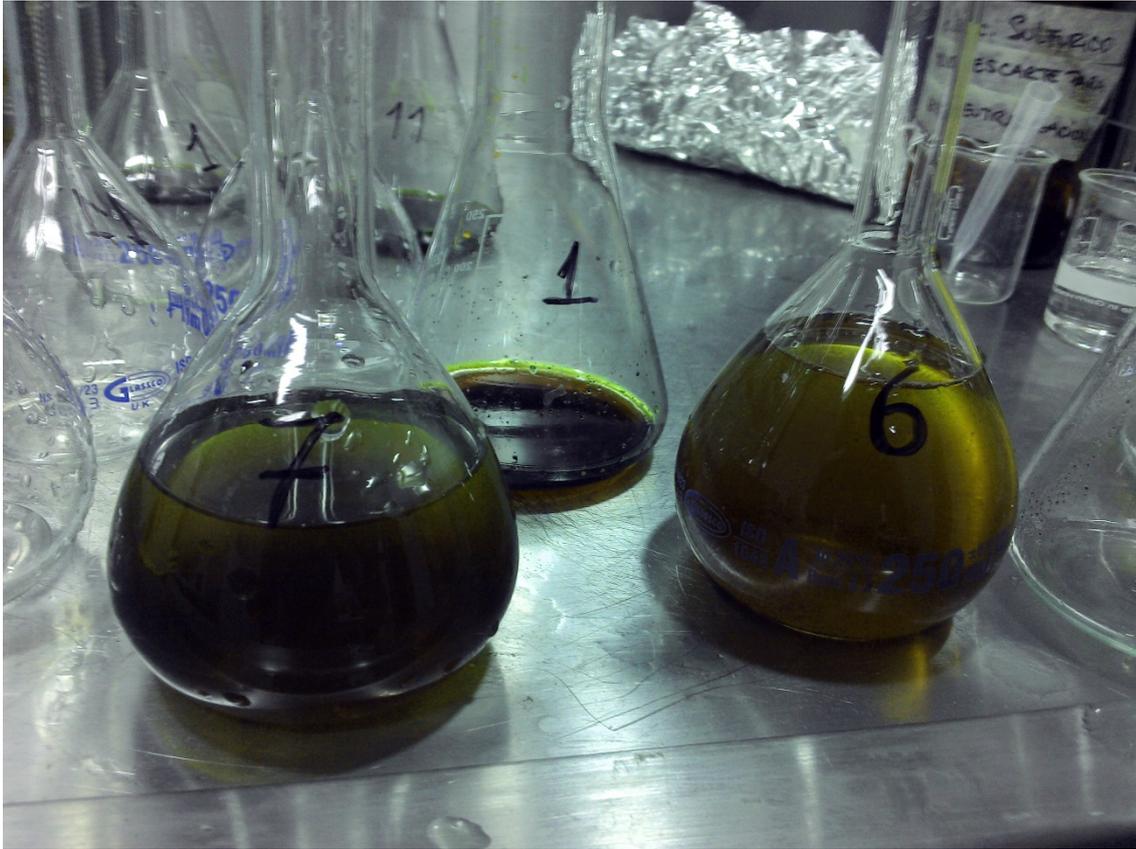


Figura 7.11 – Determinación de carbono orgánico en sustrato de crecimiento (Laboratorio UNRN)

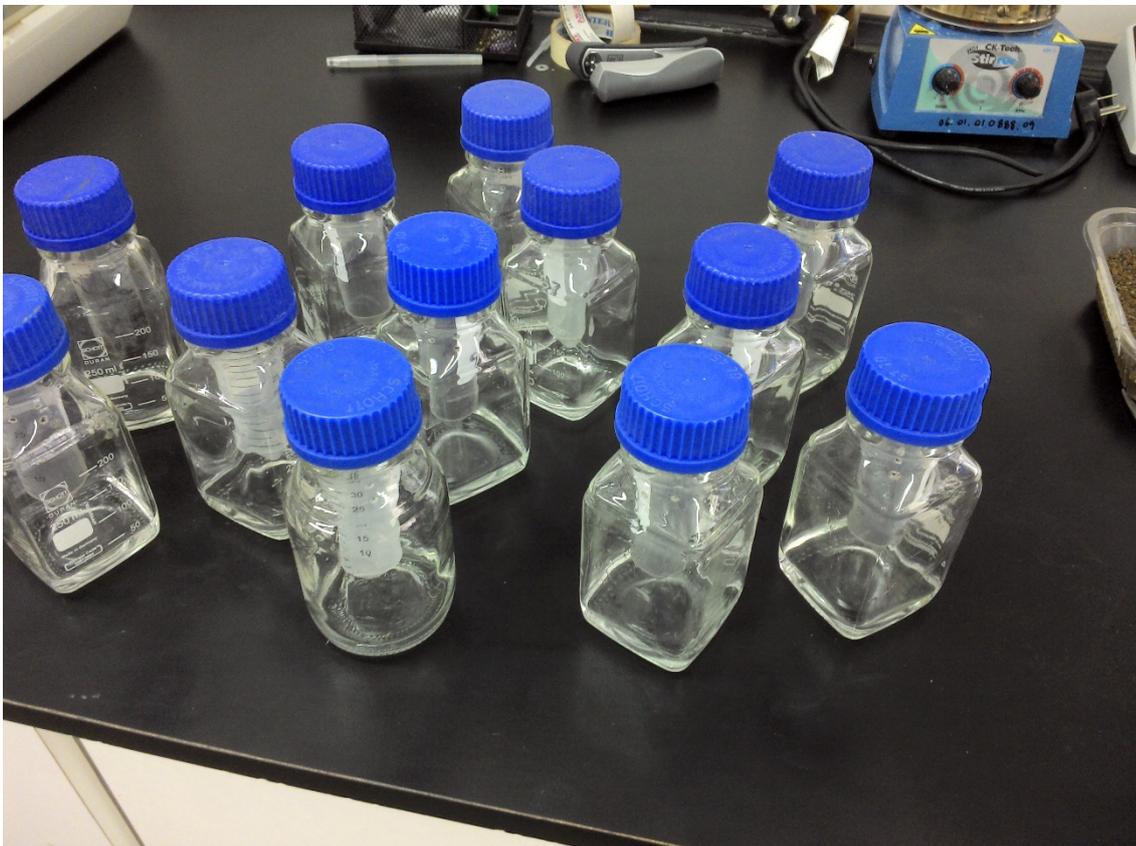


Figura 7.12 – Respirometría en sustrato de crecimiento (Laboratorio UNRN)

#### 7.2.4. Caracterización del tejido vegetal

El tejido vegetal recuperado en los cortes durante el ensayo de crecimiento vegetal fue secado en estufa a 60°C en bolsas de papel. Con el propósito de determinar diferencias en el contenido nutricional de las hojas para cada tratamiento, lo cual podría ser un indicador de la tolerancia de la especie al riego con el efluente, se han determinado los siguientes parámetros:

- *Materia orgánica*: método gravimétrico por calcinación de la muestra en crisoles, en mufla a 550°C durante 4 horas (INIA, 2007), en Laboratorio de la UNRN.
- *Fósforo total*: extracción con HCl concentrado sobre plancha calentadora (Figura 7.13) y remoción con HNO<sub>3</sub> 2M, sobre cenizas de tejido vegetal de la determinación de materia orgánica; y posterior determinación colorimétrica del azul de molibdeno (INIA, 2007), en Laboratorio de la UNRN.
- *Nitrógeno total Kjeldahl*: las muestras de tejido vegetal seco fueron enviadas al Laboratorio de Suelos de la EEA INTA Bariloche. Se determinó Nitrógeno Total por el método de Kjeldahl: (i) mineralización de la muestra para transformar el nitrógeno orgánico en formas amoniacales por digestión en ácido sulfúrico concentrado previo agregado de sulfato de potasio y sulfato de cobre como catalizadores, (ii) valoración del ion amonio por titulación ácido-base (SSSA, 1995).
- *Análisis elemental (Na, K, Ca y Mg)*: se diluyeron alícuotas del extracto usado para la determinación del fósforo total y se determinaron los cationes mediante espectrometría de absorción atómica con llama, previo agregado de La(Cl<sub>3</sub>·7H<sub>2</sub>O) para reducir las interferencias. El análisis se realizó en el Laboratorio de Agua y Suelos del CRUB (Figura 7.14)

#### 7.2.5. Análisis estadístico

Para comparar entre los tratamientos en cada tiempo de muestreo se ha realizado un análisis de la varianza (ANOVA de un factor) con el software OriginPro 8.6. En todos los casos se ha evaluado la normalidad del conjunto de datos con el test de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de las varianzas (homocedasticidad) con el test de Levene. Como test post-hoc para comparar entre pares de tratamiento se ha utilizado el de Bonferroni debido a que el número de grupos de comparación no es grande. Se ha tomado  $P < 0,05$  como valor de significancia.

Los resultados y análisis de las determinaciones de laboratorio se detallan en el Capítulo 8. Los valores se expresan como media  $\pm$  desvío estándar de cada tratamiento.

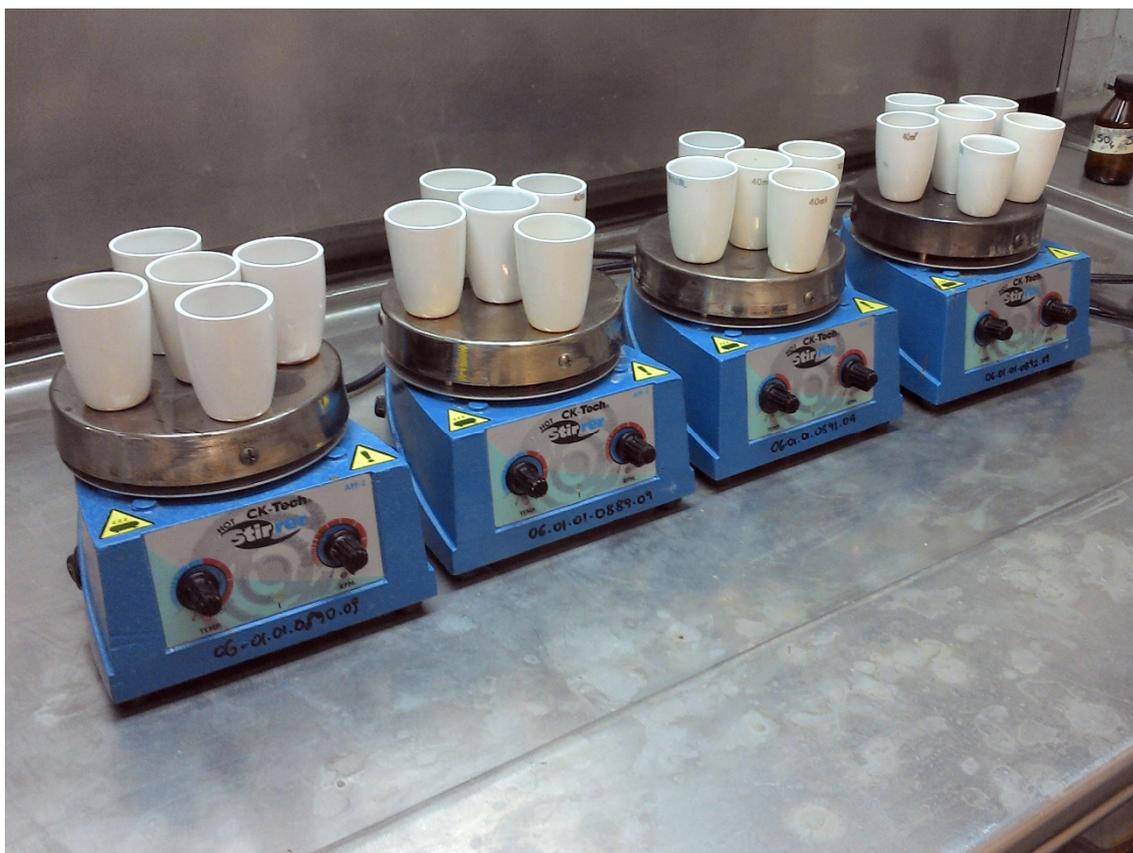


Figura 7.13 – Extracción con HCl concentrado calentado hasta evaporación total en cenizas de tejido vegetal (Laboratorio UNRN)



Figura 7.14 – Espectrómetro de absorción atómica PerkinElmer AAAnalyst 100 (Laboratorio CRUB)

### 7.3. Diseño

Luego de haber confirmado la tolerancia de la especie Vetiver al contaminante se ha propuesto un diseño de sistema de tratamiento mediante humedales artificiales. Debido a que se trata de un caso particular y que no existen metodologías directas de diseño de humedales para el tratamiento de este tipo de contaminante (como sí existen para aguas residuales o algunos efluentes industriales), se ha decidido utilizar un modelo matemático basado en los rendimientos esperados de los diferentes mecanismos de remoción. El dimensionamiento de los humedales se ha realizado iterando en una hoja de cálculo de Microsoft Excel 2013 hasta obtener un porcentaje de remoción aceptable para la situación más desfavorable (máximos caudales, mínimas temperaturas).

Para la reutilización de los lixiviados tratados se ha optado por el riego de un grupo de álamos criollos (*Populus nigra*), si bien los cálculos también se han realizado para otras especies alternativas.

Los esquemas de diseño se han realizado utilizando el software AutoCAD 2015. Los detalles se presentan en el Capítulo 9.

### 7.4. Evaluación del proyecto

Una vez propuesto el diseño del sistema de tratamiento se han evaluado los posibles riesgos que podrían presentarse y el impacto ambiental que podrían provocar las diferentes etapas del proyecto (construcción, operación y cierre). Se ha elegido realizar el cálculo en función de la intensidad, la extensión, la duración, la reversibilidad y la probabilidad de ocurrencia de los impactos generados por las diferentes actividades de cada etapa.

Finalmente se ha realizado un análisis de los aspectos económicos del proyecto, estimando el presupuesto necesario para la obra en base a cotizaciones actualizadas y comparándolo con los costos actuales del transporte de lixiviados desde la planta de compostaje hasta la planta depuradora.

Los resultados de la evaluación del proyecto se presentan en el Capítulo 10.



# 8. Análisis de resultados experimentales



### 8.1. Caracterización de los lixiviados

La cantidad de lixiviados transportados desde el sitio de generación hasta la planta depuradora se resumen en la Tabla 8.1, los datos corresponden al 2014. En la tabla también se resumen las precipitaciones correspondientes al mismo período. Como puede observarse en la Figura 8.1 la generación de lixiviados puede estar relacionada con las precipitaciones, aunque la variabilidad de los datos puede deberse a otros factores no analizados, como el tamaño de las pilas y su orientación, la cantidad de estructurante usado en el compostaje (Peralta et al, 2012) y la cantidad de biosólidos tratados (que depende de la temporada turística).

		Mes												Total
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
Lixiviados	m <sup>3</sup>	32	0	5	110	127	255	135	412	140	140	115	15	1486
Precipitaciones	mm	104,8	28,6	81,2	185,6	152	252	196,9	251,4	111,2	118,6	67	11,4	1560,7

Tabla 8.1 – Lixiviados transportados desde el sitio de generación hasta la planta depuradora y precipitaciones mensuales. Datos correspondientes al 2014, provistos por la empresa CEB y por el Departamento Provincial de Aguas (DPA)

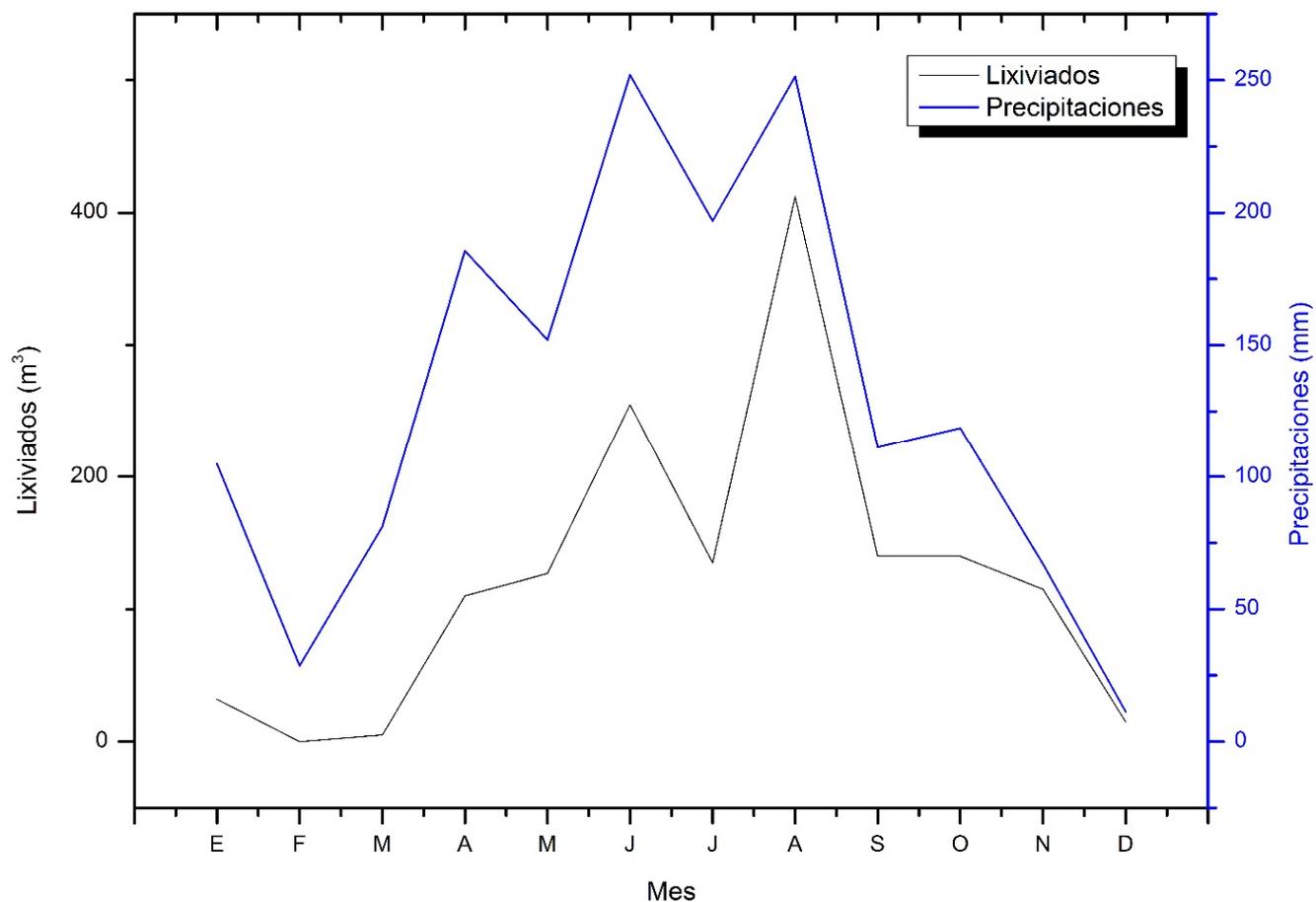


Figura 8.1 – Lixiviados transportados desde el sitio de generación hasta la planta depuradora y precipitaciones mensuales, datos correspondientes al año 2014

En la Tabla 8.2 se presentan los datos obtenidos de la caracterización de los lixiviados utilizados para el riego de las plantas en las 15 semanas que duró la experiencia, y en la Tabla 8.3 se resumen los valores informados por el Laboratorio del CRUB en las semanas 3, 9 y 12.

Semana	pH	CE	Sólidos totales	DBO	Nitrógeno total	Fósforo reactivo	Amonio	Nitratos
		$\mu\text{S/cm}$	$\text{mg/L}$	$\text{mgO}_2/\text{L}$	$\text{mgN/L}$	$\text{mgP/L}$	$\text{mgN/L}$	$\text{mgN/L}$
1	6,83	917	0,742	50	80	57	65	<0,1
2	6,90	999	0,776	61	52	59	68	<0,1
3	6,95	1053	0,792	95	76	65	75	0,3
4	6,86	907	0,510	49	48	43	62	<0,1
5	6,92	1021	0,688	47	80	52	76	<0,1
6	7,05	1343	0,972	105	108	67	100	0,1
7	7,13	1524	1,265	135	123	72	121	0,3
8	7,17	2587	2,312	543	250	115	175	0,4
9	7,22	2890	2,518	637	305	156	212	0,5
10	6,88	830	0,584	68	100	43	62	0,3
11	6,88	800	0,554	98	120	45	42	0,4
12	6,82	794	0,612	122	60	51	33	0,2
13	6,93	998	0,859	125	75	59	45	0,4
14	6,84	948	0,669	103	60	52	35	0,3
15	6,88	903	0,658	98	55	51	34	<0,1

Tabla 8.2 – Resultados de los análisis realizados a los lixiviados en el laboratorio de la CEB

Semana	pH	CE	DBO	DQO	Amonio	Nitratos	Nitritos	NTK	Fósforo reactivo	Fósforo total	Potasio
		$\mu\text{S/cm}$	$\text{mgO}_2/\text{L}$	$\text{mgO}_2/\text{L}$	$\text{mgN/L}$	$\text{mgN/L}$	$\text{mgN/L}$	$\text{mgN/L}$	$\text{mgP/L}$	$\text{mgP/L}$	$\text{mgK/L}$
3	7,1	891	81	730	61	0,5	<0,1	70	61	77	76
9	7,1	2860	652	2450	219	0,4	0,1	288	140	188	352
12	6,8	730	107	980	51	<0,1	<0,1	80	46	50	71

Tabla 8.3. Resultados de los análisis realizados a los lixiviados en el laboratorio del CRUB

Los análisis demuestran que los lixiviados son concentrados en compuestos de nitrógeno, fósforo y potasio, en algunas ocasiones con valores que podrían resultar tóxicos para la mayoría de los cultivos (Ayers & Westcot, 1994). En cuanto a la conductividad eléctrica, generalmente los valores se encuentran en el rango de lo permisible para riego, aunque en algunos momentos se alcanzan valores que se considerarían inapropiados para la aplicación directa ( $>3000 \mu\text{S/cm}$ ). La relación entre DQO y DBO indicaría una mayor proporción de compuestos orgánicos que no son fácilmente biodegradables, lo cual podría estar relacionado con las transformaciones de la materia orgánica durante el proceso de compostaje (Zbytniewski & Buszewski, 2005).

Con respecto a las determinaciones microbiológicas, en la muestra de lixiviado analizado se han obtenido valores bajos de coliformes totales (23 NMP/100 mL), no habiéndose podido determinar la presencia de coliformes fecales. No obstante el valor de bacterias mesófilas aerobias fue

apreciablemente mayor, con alrededor de  $4 \times 10^4$  UFC/mL. El recuento de hongos y levaduras fue de 4 UFC/mL, mientras que no fue posible determinar la presencia de nemátodos ni huevos viables. Asimismo se ha observado una muy escasa presencia de rotíferos, ciliados y crustáceos en la muestra concentrada.

Como puede apreciarse en la Figura 8.2 los valores de los parámetros medidos son consistentes entre sí. Cuando los lixiviados son más concentrados, los valores tanto de sólidos totales, como de nitrógeno total, fósforo reactivo, demanda biológica de oxígeno, amonio y nitratos también son mayores, lo que pareciera indicar que las proporciones relativas son relativamente constantes, habiendo diferencias únicamente por la dilución producida por la lluvia. Los lixiviados utilizados en las semanas 8 y 9 provienen de una serie de días sin precipitaciones. Esta relación entre calidad de los lixiviados y la cantidad generada también fue descrita por Christensen et al (1983-1984). Si bien son variables a lo largo del año, las concentraciones de contaminantes encontradas en los lixiviados superan a las permitidas para la descarga directa en cuerpos de agua o la infiltración en el suelo, por lo que se requiere de un tratamiento previo a su emisión al ambiente.

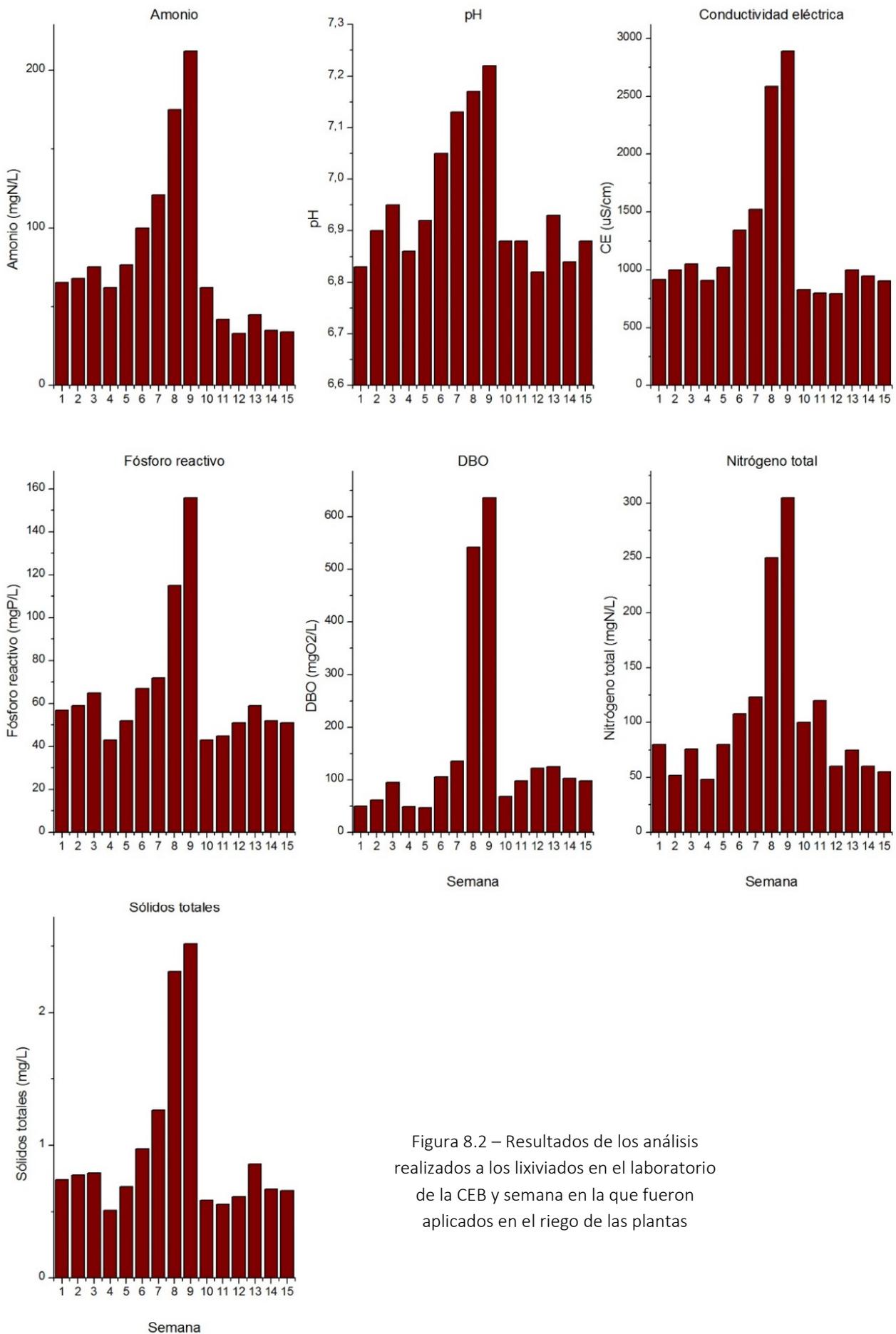


Figura 8.2 – Resultados de los análisis realizados a los lixiviados en el laboratorio de la CEB y semana en la que fueron aplicados en el riego de las plantas

## 8.2. Ensayo de crecimiento vegetal

A partir de los datos medidos de largo máximo alcanzado y número de hojas nuevas por planta, se han confeccionado los gráficos de la Figura 8.3 en donde se presentan las medias semanales. Se ha realizado un test ANOVA de un factor para comparar entre tratamientos en las semanas 3, 7, 10, 12 y 15, a fin de determinar si hubo diferencias significativas en esos momentos del ensayo. Se dispone de datos biomasa aérea recuperada en los cortes de las semanas 7 y 15 (Tabla 8.4)

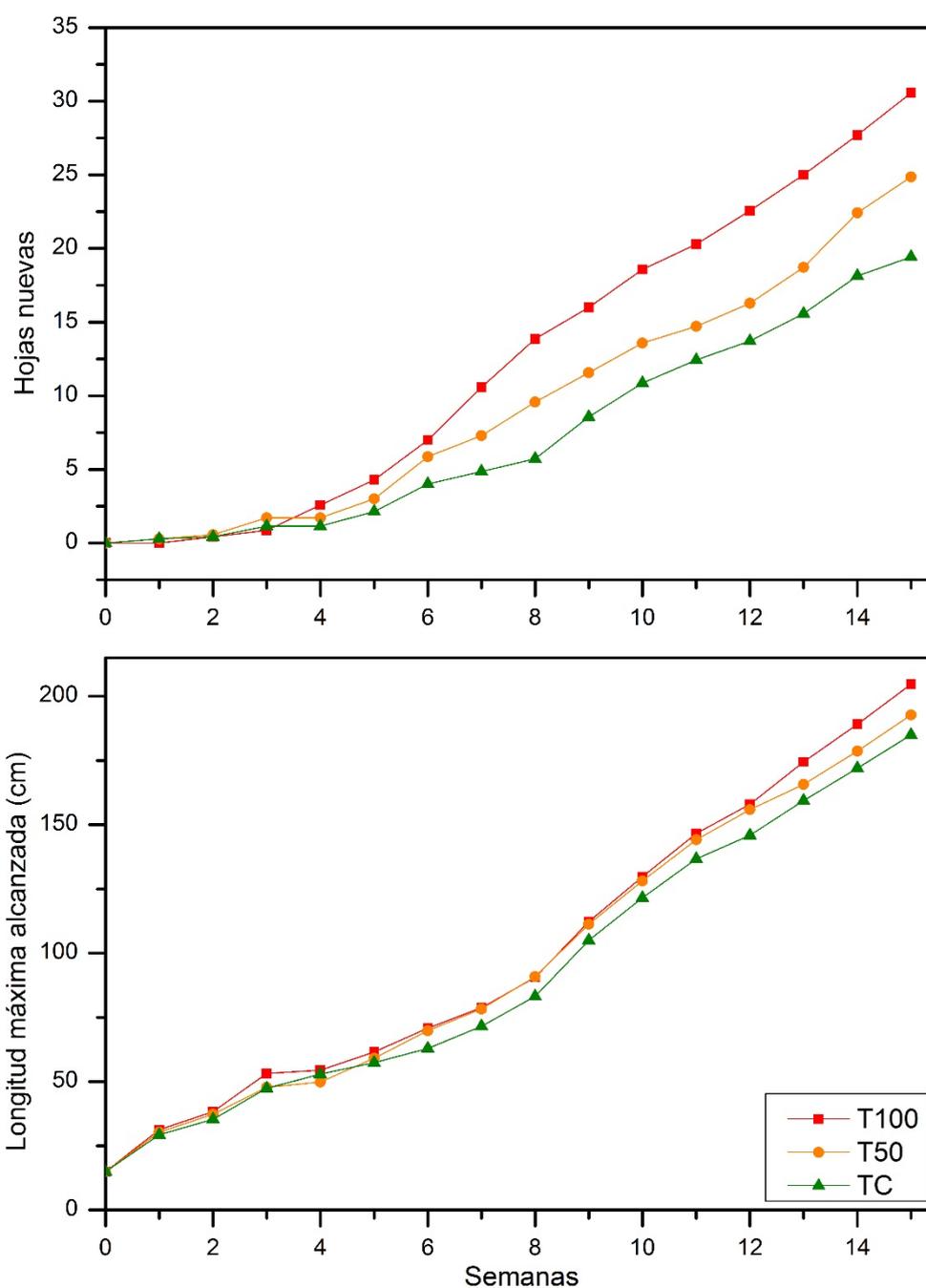


Figura 8.3 – Medias semanales por tratamiento para el largo máximo alcanzado y las hojas nuevas totales de cada planta

		Semana				
		3	7	10	12	15
Crecimiento semanal (cm)	T100	14,8 ± 4,1a	7,9 ± 1,3a	17,4 ± 1,9a	11,4 ± 4,3a	15,6 ± 0,5a
	T50	10,4 ± 4,1a	8,4 ± 1,7a	16,9 ± 3,2a	11,7 ± 3,3a	14,1 ± 0,7b
	TC	12,1 ± 3,7a	8,7 ± 1,6a	16,6 ± 4,9a	9,1 ± 3,9a	13,3 ± 0,8b
Hojas nuevas por semana	T100	0,4 ± 0,5a	3,6 ± 2,9a	2,6 ± 2,9a	2,3 ± 2,4a	2,9 ± 1,9a
	T50	1,1 ± 1,0a	1,4 ± 1,4a	2,0 ± 0,8a	1,6 ± 0,9a	2,4 ± 1,8a
	TC	0,7 ± 1,1a	1,0 ± 1,2a	2,3 ± 2,1a	1,3 ± 1,1a	1,3 ± 1,5a
Biomasa aérea recuperada (g)	T100	-	2,4 ± 1,1a	-	-	3,1 ± 1,8a
	T50	-	1,9 ± 0,8a	-	-	2,4 ± 1,0a
	TC	-	1,8 ± 0,6a	-	-	2,2 ± 0,8a

Tabla 8.4 – Medias y desvíos estándar por tratamiento para el crecimiento y hojas nuevas en las semanas 3, 7, 10, 12 y 15. Medias y desvío estándar por tratamiento para la biomasa aérea recuperada en los cortes de las semanas 7 y 15. Letras distintas indican medias estadísticamente diferentes entre tratamientos ( $P < 0,05$ )

Se observa que el crecimiento vegetal y el desarrollo de hojas nuevas siempre fueron positivos en todos los tratamientos. Por otro lado, no se aprecian diferencias estadísticamente diferentes entre tratamientos, salvo en el crecimiento vegetal al final del ensayo (Figuras 8.4, 8.5, 8.6). Esto es consistente con la información presentada en el Capítulo 4 sobre la tolerancia de la especie a altas concentraciones de contaminantes. Podría haberse esperado un efecto más notorio de la fertilización con N, P y K contenidos en los lixiviados (Wagner et al, 2003). Esta diferencia no se presentó sino hasta el final del experimento, lo que podría indicar que las plantas aún no tenían un desarrollo adecuado para aprovechar todos los nutrientes disponibles. De todos modos, en relación al diseño del sistema de tratamiento, este resultado es positivo ya que implica que la especie Vetiver podría desarrollarse normalmente aun siendo regada exclusivamente con lixiviados concentrados.

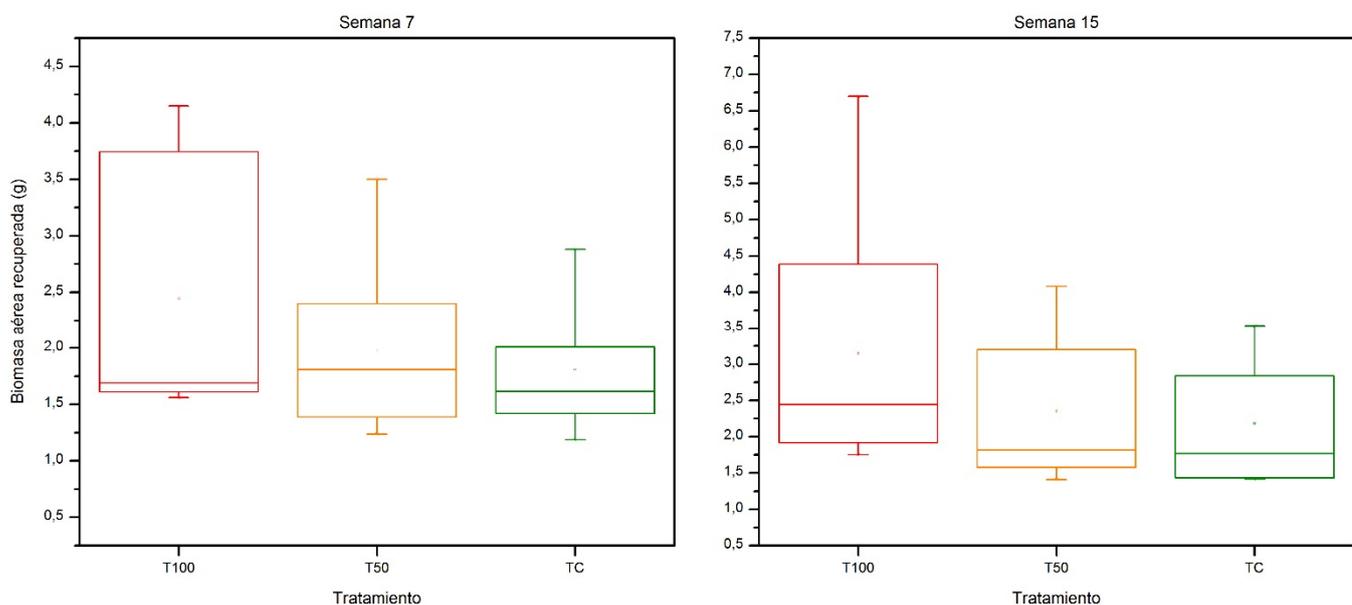


Figura 8.4 – Biomasa aérea obtenida por tratamiento en las semanas 7 y 15

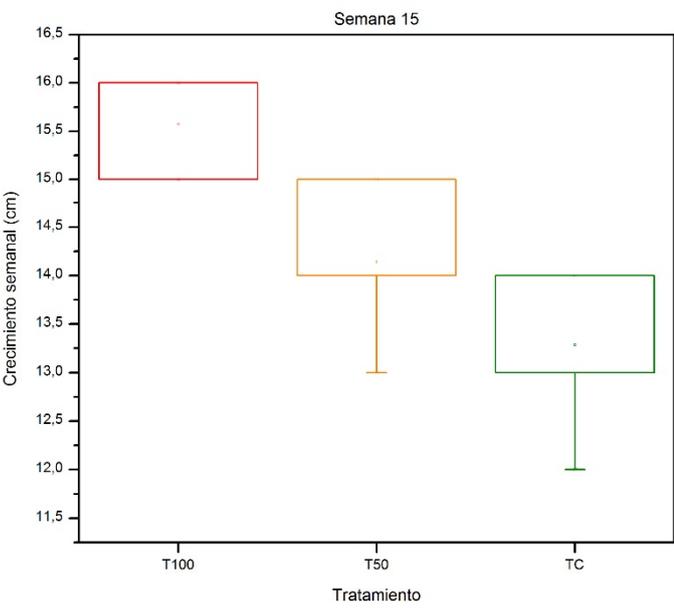
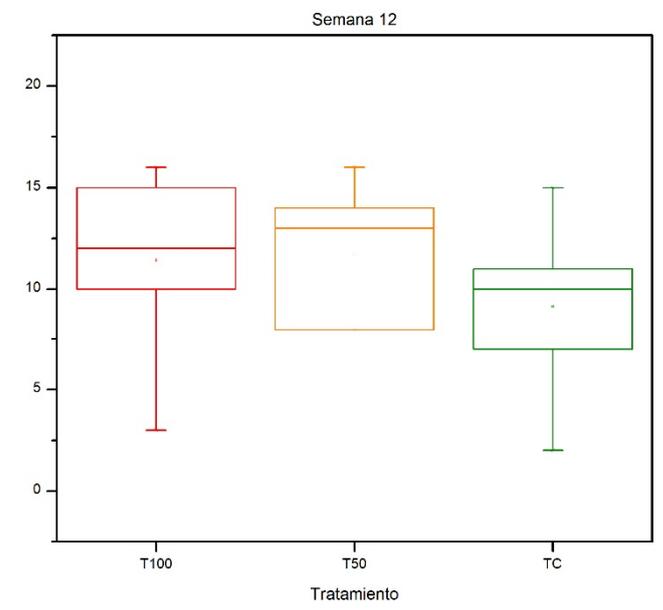
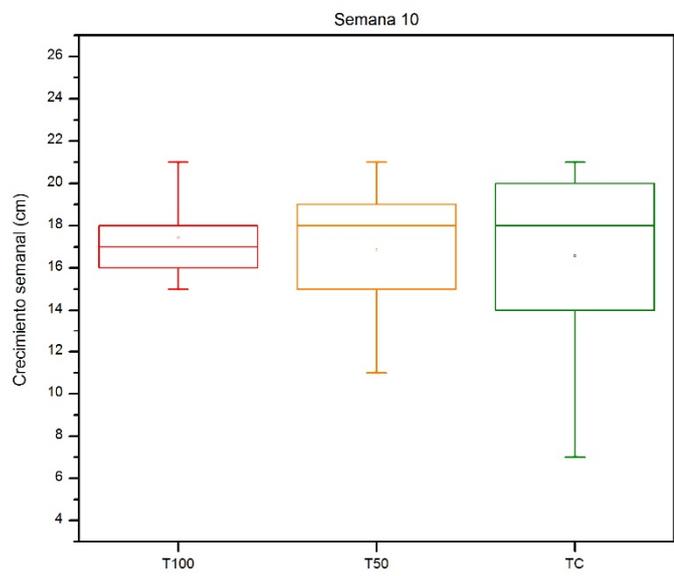
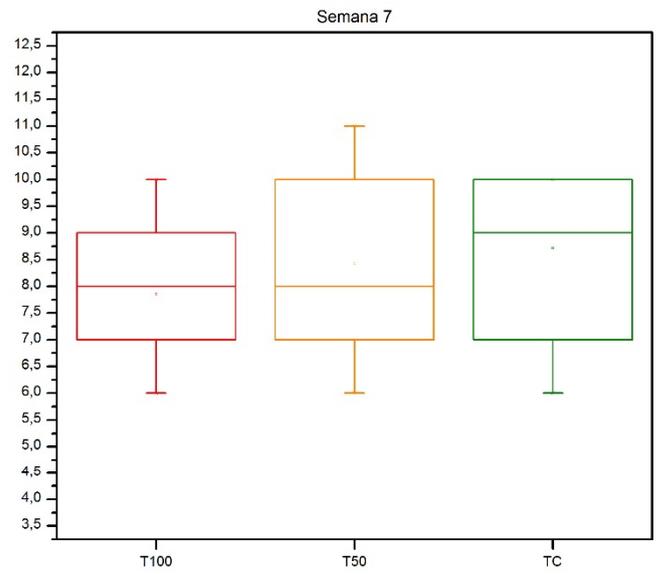
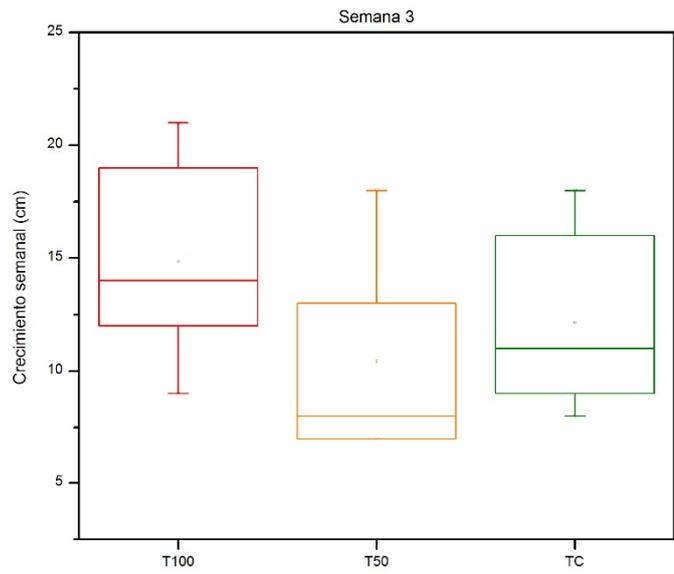


Figura 8.5 – Crecimiento semanal por tratamiento en las semanas 3, 7, 10, 12 y 15, sólo hay diferencias significativas en la última semana

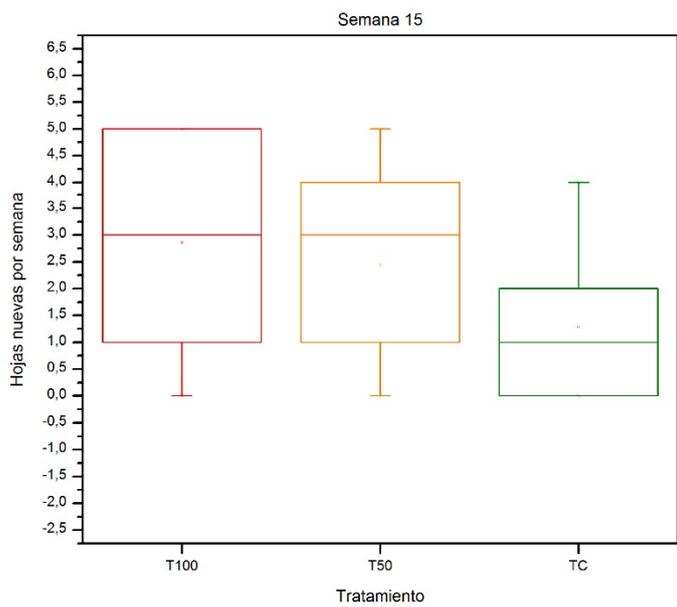
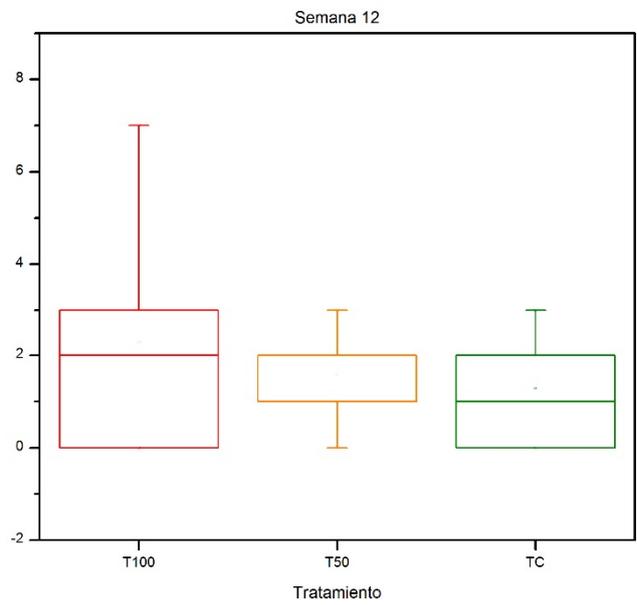
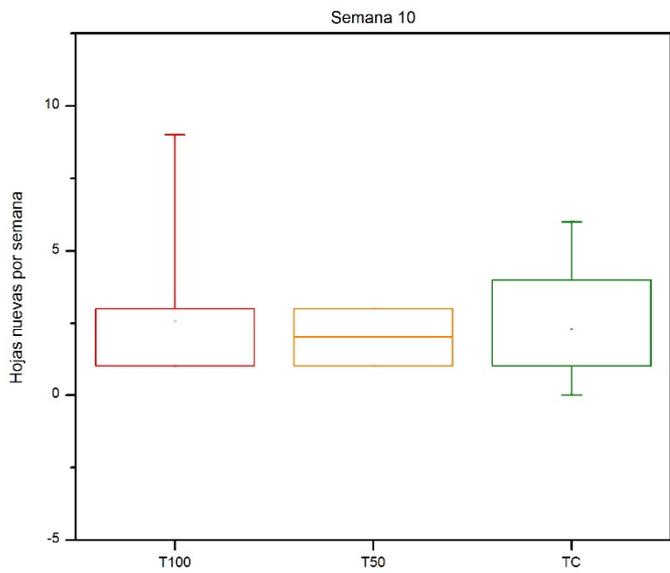
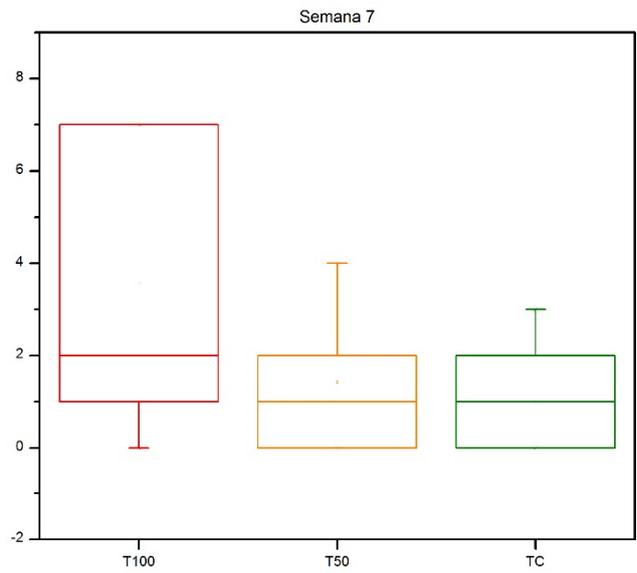
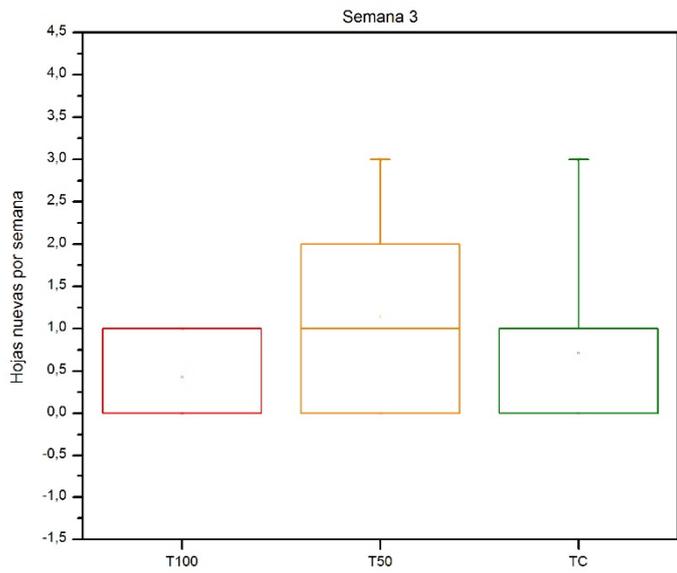


Figura 8.6 – Hojas nuevas por semana por tratamiento en las semanas 3, 7, 10, 12 y 15

### 8.3. Caracterización del sustrato de crecimiento

Los parámetros iniciales del sustrato de crecimiento (mezcla suelo:compost) se resumen en la Tabla 8.5. También se informan los valores medidos sobre el suelo y el compost individualmente.

		Suelo, S	Compost, C	Mezcla SC 2:1
pH		6,75	7,17	6,83
Conductividad eléctrica	$\mu\text{S/cm}$	237	118	344
Fósforo reactivo	$\mu\text{g/g}$	83,7	20,0	25,3
Carbono orgánico	%	6,6	0,3	3,2
Nitrógeno total Kjeldahl	%	0,27	0,58	0,37
Relación C/N		24	0,5	9
Respirometría	$\text{mgCO}_2/\text{kg/h}$	-	-	20,0

Tabla 8.5 – Parámetros medidos sobre el suelo, el compost y la mezcla suelo:compost 2:1 que fue colocada en las macetas del ensayo de crecimiento vegetal

En la Tabla 8.6 se presentan los valores obtenidos en los análisis realizados sobre las muestras de sustrato de crecimiento de las semanas 7 y 15 del experimento. Se ha realizado un test ANOVA de un factor para comparar entre tratamientos en los tiempos  $t_1$  y  $t_2$ , a las 7 y a las 15 semanas, respectivamente. En las Figuras 8.7 y 8.8 se presentan los diagramas de cajas para los datos obtenidos en ambas semanas.

En este caso se aprecian diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, particularmente entre T100 y TC. En el caso de T50, parece haber menos diferencias con TC en  $t_1$  y más diferencias en  $t_2$ . En las macetas regadas con lixiviados parece haber una acumulación de fósforo y un aumento de la conductividad eléctrica, lo cual es coherente debido a los elevados valores presentes en los lixiviados. Sin embargo, las concentraciones se mantienen por debajo de los niveles de tolerancia de la especie (detallados en el Capítulo 4), por lo que no se vería afectado el normal desarrollo de los ejemplares en este sustrato. En el caso del nitrógeno total, no se evidenciaron diferencias significativas entre tratamientos en ninguno de los dos tiempos de muestreo analizados, por lo que parece que no se vieron afectados los procesos naturales de mineralización del nitrógeno.

Al final del experimento (semana 15) no se observan valores significativamente diferentes de porcentaje de carbono orgánico entre tratamientos, en tanto que sí hay diferencias en la actividad microbiana, medida como respiración del suelo. Al parecer, en los tratamientos T100 y T50 hay una menor actividad con respecto al control, lo cual puede deberse a modificaciones en la porosidad del sustrato, producto de un mayor desarrollo radicular de las plantas hacia el final del ensayo. Una mayor porosidad podría aumentar la humedad y restringir en parte la respiración (USDA, 1999).

		Tratamiento		
		T100	T50	TC
		<b>t<sub>1</sub>, semana 7</b>		
pH		6,6 ± 0,2a	6,6 ± 0,1a	6,9 ± 0,1b
Conductividad eléctrica	μS/cm	372,9 ± 30,7a	378,6 ± 43,4a	229,4 ± 33,6b
Fósforo reactivo	μg/g	51,4 ± 6,5a	32,4 ± 5,1b	25,5 ± 4,1b
Carbono orgánico	%	2,7 ± 0,5a	3,4 ± 0,4b	3,9 ± 0,3b
Nitrógeno total Kjeldahl	%	0,31 ± 0,03a	0,30 ± 0,02a	0,29 ± 0,02a
Relación C/N		8,7	11,3	13,4
		<b>t<sub>2</sub>, semana 15</b>		
pH		7,1 ± 0,4a	7,1 ± 0,3ab	7,6 ± 0,3b
Conductividad eléctrica	μS/cm	272,3 ± 102,9ab	294,0 ± 128,5a	144 ± 32,7b
Fósforo reactivo	μg/g	52,9 ± 23,7a	40,9 ± 11,6ab	28,9 ± 10,2b
Carbono orgánico	%	3,5 ± 0,3a	3,6 ± 0,6a	3,3 ± 0,4a
Nitrógeno total Kjeldahl	%	0,31 ± 0,01a	0,30 ± 0,03a	0,29 ± 0,01a
Relación C/N		11,3	12,0	11,4
Respirometría	mgCO <sub>2</sub> /kg/h	11,0 ± 2,4a	12,3 ± 1,9a	16,7 ± 3,1b

Tabla 8.6 – Medias y desvíos estándar por tratamiento para los parámetros medidos en el sustrato de crecimiento de las macetas en los tiempos t<sub>1</sub> y t<sub>2</sub>. Letras distintas indican medias estadísticamente diferentes entre tratamientos (P<0,05)

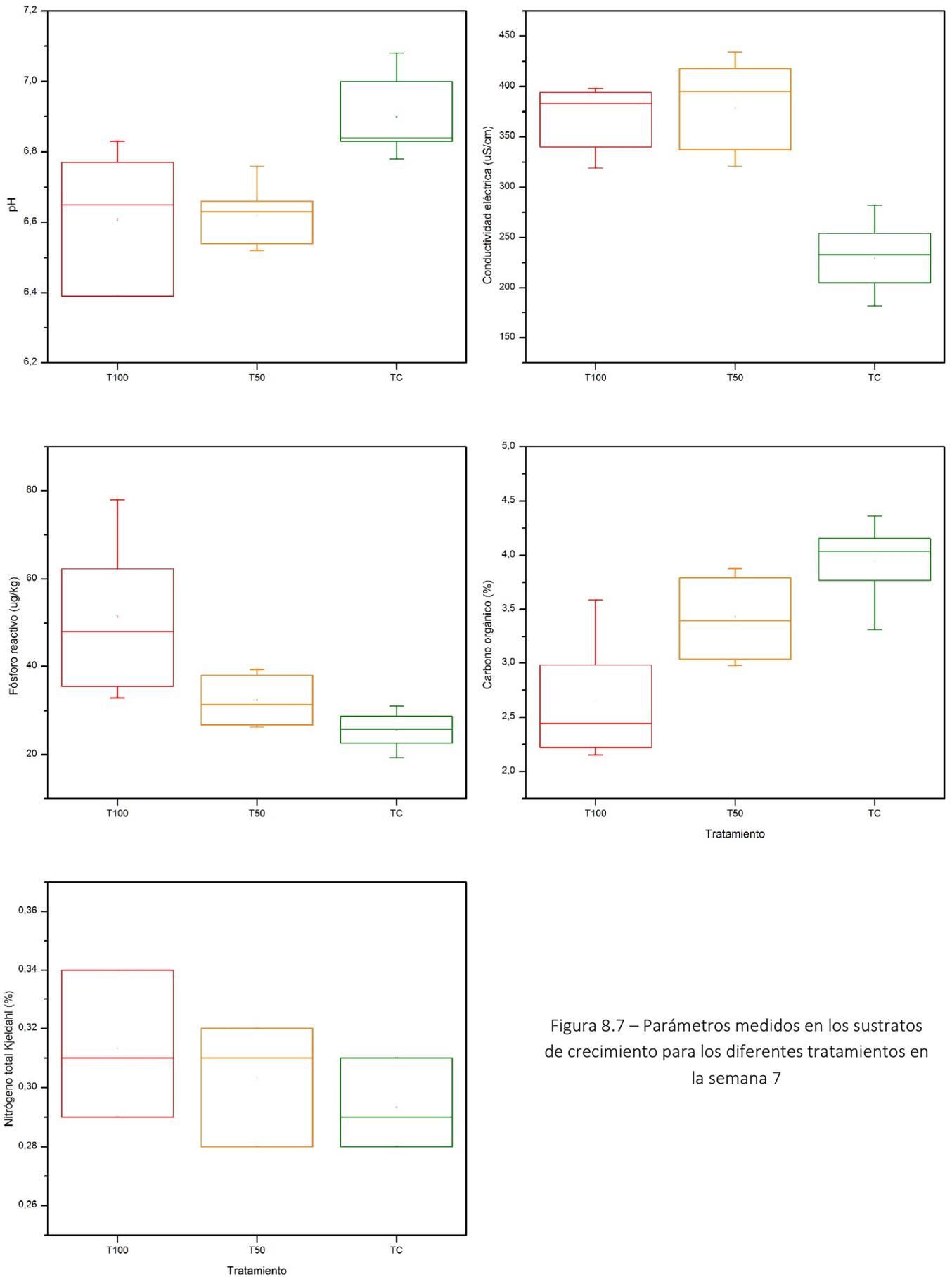


Figura 8.7 – Parámetros medidos en los sustratos de crecimiento para los diferentes tratamientos en la semana 7

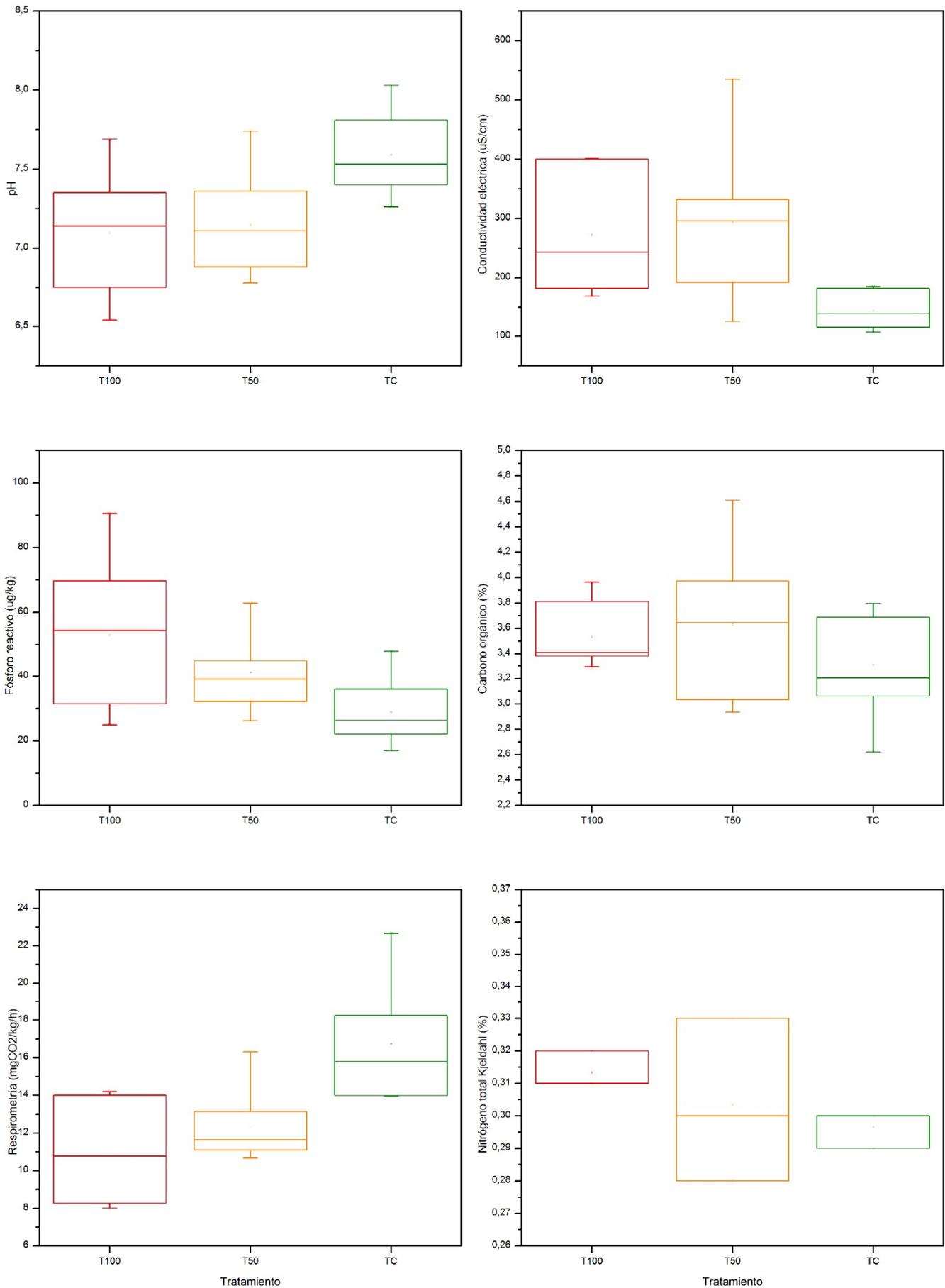


Figura 8.8 – Parámetros medidos en los sustratos de crecimiento para los diferentes tratamientos en la semana 15

#### 8.4. Caracterización del tejido vegetal

En la Tabla 8.7 se presentan los resultados obtenidos de la determinación del tejido vegetal en los ejemplares de Vetiver antes de iniciar el experimento. Los valores son similares a los informados en otros trabajos de investigación (Falola et al, 2013; Mane et al, 2013; Truong et al, 2008).

		Valores iniciales, to	Valores referencia aprox.
Materia orgánica	%	88,5 ± 0,4	85
Fósforo total	%	0,18 ± 0,01	0,2
Nitrógeno total	%	2,05 ± 0,09	1,1
Potasio	%	1,6 ± 0,4	1,5
Sodio	%	0,04 ± 0,01	0,2
Magnesio	%	0,13 ± 0,01	0,15
Calcio	%	0,56 ± 0,03	0,5

Tabla 8.7 – Parámetros medidos en el tejido vegetal de los ejemplares de Vetiver antes de iniciar el experimento, y valores de referencia aproximados según la literatura consultada

En la Tabla 8.8 se resumen los resultados obtenidos en las semanas 7 y 15 del experimento. No se observan diferencias significativas entre tratamientos, con excepción del fósforo total en t<sub>2</sub> (Figuras 8.9 y 8.10). Estos resultados indicarían que la especie se desarrolla normalmente aun siendo regada con lixiviados concentrados, siendo capaz de tomar del sustrato solamente lo que requiere para su desarrollo. Se observa una reducción en el contenido de algunos minerales conforme las plantas crecen, fenómeno que también fue descrito por Falola et al (2013) y que podría deberse a una dilución de estos elementos en una mayor cantidad de biomasa vegetal.

		Tratamiento		
		T100	T50	TC
		<b>t<sub>1</sub>, semana 7</b>		
Materia orgánica	%	90,1 ± 0,2a	90,2 ± 0,6a	90,1 ± 0,7a
Fósforo total	%	0,22 ± 0,02a	0,22 ± 0,02a	0,19 ± 0,02a
Nitrógeno total	%	1,94 ± 0,04a	1,91 ± 0,09a	2,02 ± 0,03a
Potasio	%	1,9 ± 0,2a	2,0 ± 0,3a	1,9 ± 0,2a
Sodio	%	0,03 ± 0,01a	0,04 ± 0,01a	0,03 ± 0,01a
Magnesio	%	0,12 ± 0,01a	0,12 ± 0,01a	0,12 ± 0,02a
Calcio	%	0,39 ± 0,02a	0,41 ± 0,01a	0,42 ± 0,01a
		<b>t<sub>2</sub>, semana 15</b>		
Materia orgánica	%	89,7 ± 0,2a	89,8 ± 0,5a	89,7 ± 0,5a
Fósforo total	%	0,24 ± 0,03a	0,19 ± 0,01ab	0,16 ± 0,01b
Nitrógeno total	%	1,70 ± 0,06a	1,72 ± 0,07a	1,7 ± 0,2a
Potasio	%	1,9 ± 0,2a	1,8 ± 0,1a	1,9 ± 0,3a
Sodio	%	0,03 ± 0,01a	0,03 ± 0,01a	0,03 ± 0,01a
Magnesio	%	0,13 ± 0,01a	0,12 ± 0,01a	0,13 ± 0,01a
Calcio	%	0,37 ± 0,04a	0,34 ± 0,02a	0,35 ± 0,07a

Tabla 8.8 – Medias y desvíos estándar por tratamiento para los parámetros medidos en el tejido vegetal en los tiempos t<sub>1</sub> y t<sub>2</sub>. Letras distintas indican medias estadísticamente diferentes entre tratamientos (P<0,05)

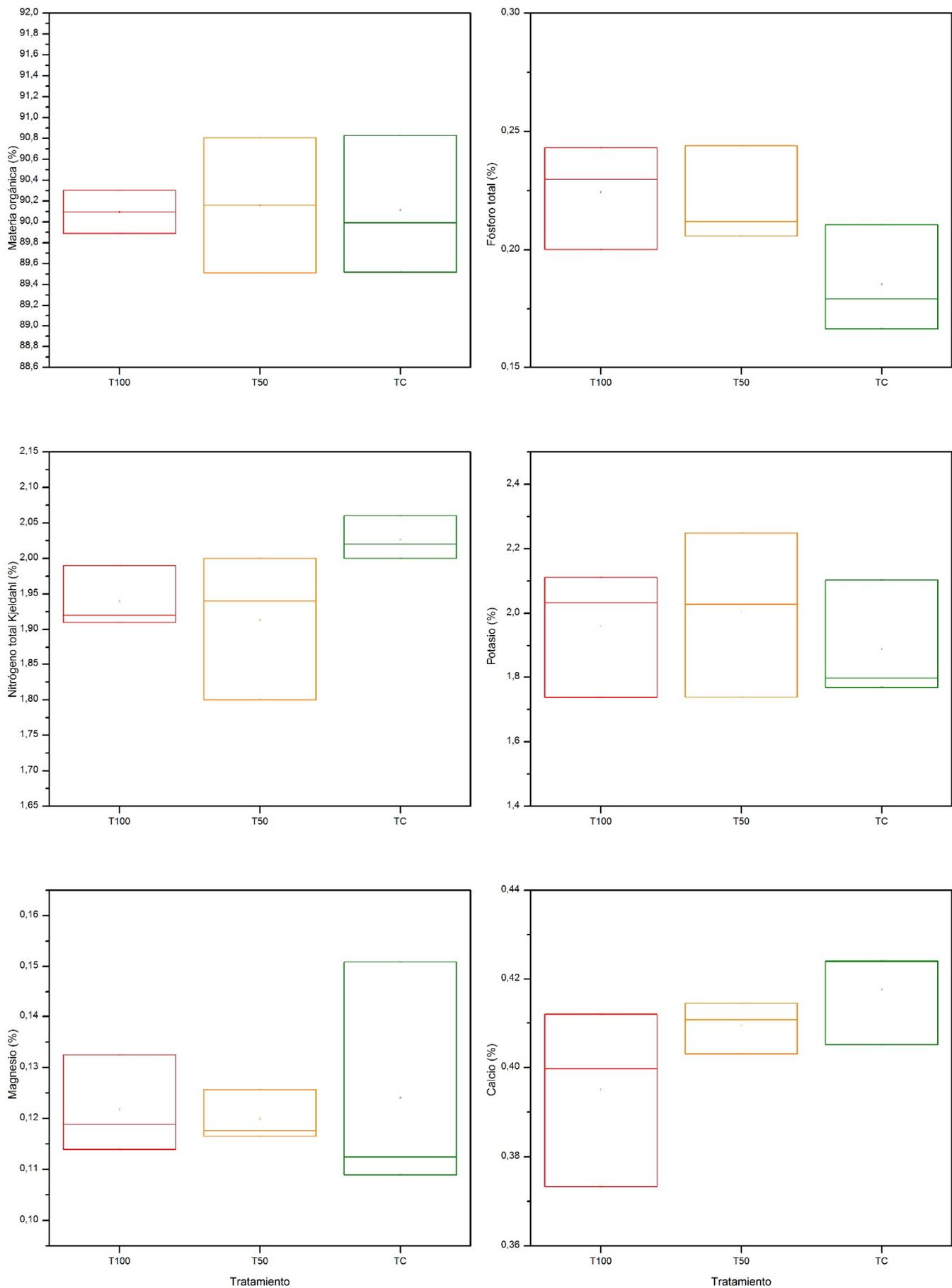


Figura 8.9 – Parámetros medidos en el tejido vegetal para los diferentes tratamientos en la semana 7

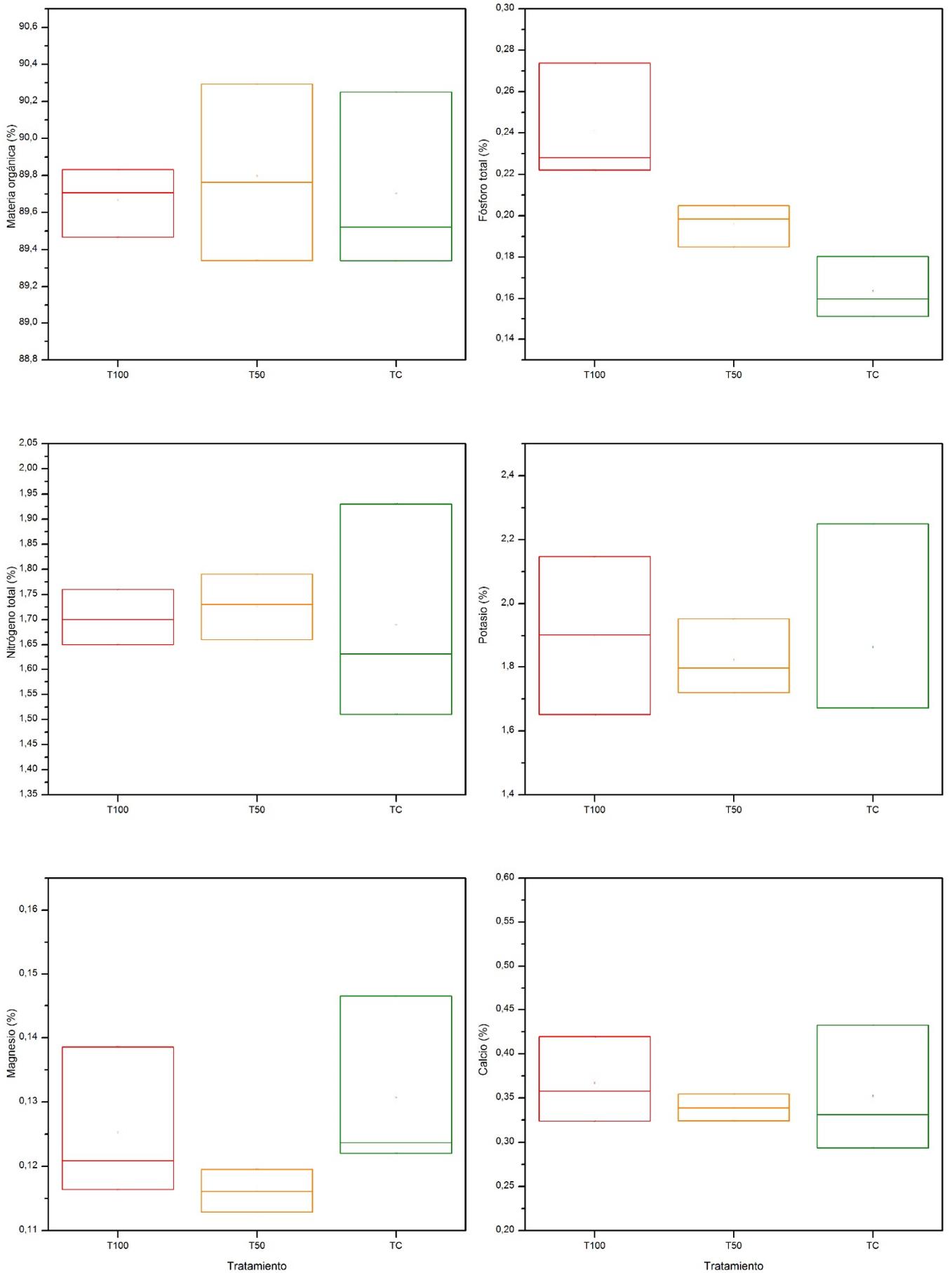


Figura 8.10 – Parámetros medidos en el tejido vegetal para los diferentes tratamientos en la semana 15



# 9. Diseño del sistema de tratamiento



## 9.1. Dimensionamiento de humedales

Debido a que los humedales son sistemas abiertos, para poder dimensionarlos correctamente se deben tener en cuenta el caudal de entrada, la calidad del contaminante, los requisitos de remoción y el clima local (Kadlec & Wallace, 2009). La mayoría de los manuales disponibles para el diseño de humedales están dedicados a aguas residuales domésticas, presentando fórmulas empíricas o factores de escalamiento para determinar la superficie necesaria. En otros casos, se presentan tablas o gráficos para determinarla de manera prescriptiva, pero sólo es válido si estos datos se basan en múltiples observaciones en condiciones semejantes a las previstas. Sin embargo, estos métodos no pueden ser aplicados cuando el efluente a tratar posee características atípicas. En estos casos se recurre a los modelos basados en el rendimiento (*Performance-based wetland sizing*) para poder dimensionar el sistema.

Los lixiviados pueden ser considerados efluentes atípicos, tanto por la concentración de contaminantes como por su caudal variable. En las siguientes secciones se presentan algunos conceptos básicos para el dimensionamiento de humedales, con énfasis en los humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF).

## 9.2. Aspectos hidráulicos

El éxito del sistema de tratamiento depende en buena parte de mantener las condiciones hidráulicas correctas ya que el movimiento del líquido dentro del humedal es crítico para asegurar las condiciones en las que se producen los procesos de remoción de los contaminantes mencionados en el Capítulo 3. En efecto, el flujo y el volumen contenido dentro del humedal determinan el tiempo que permanece el líquido en contacto con el ecosistema. Además, comprender correctamente estos aspectos permite evitar problemas operativos, como la mortandad de las plantas, la generación de zonas muertas o de estancamientos (Kadlec & Wallace, 2009).

Si bien el sistema de tratamiento se diseña con una entrada ( $Q_i$ ) y una salida ( $Q_o$ ) definidas en función de los caudales tratados, al tratarse de un sistema abierto existen otras formas en las que se intercambia líquido con el entorno (Figura 9.1). El líquido puede ingresar por medio de escorrentía superficial ( $Q_{si}, Q_c$ ), por ingresos subterráneos ( $Q_{gwa}$ ) y por las precipitaciones caídas en el sitio ( $P$ ), tales como lluvia, granizo, condensación o nieve. Asimismo, el líquido puede salir del sistema a través de escorrentía superficial ( $Q_{so}, Q_b$ ), de egresos subterráneos ( $Q_{gwr}$ ) y por evapotranspiración ( $ET$ ),

definida ésta última como la pérdida por evaporación directa y por la transpiración de la vegetación. Por lo general, estos ingresos y egresos son muy variables, con marcadas tendencias diurnas o estacionales. Por otra parte, en los diseños de humedales artificiales se incorporan formas de reducir la variabilidad de estos ingresos y egresos, tales como impermeabilización del volumen o barreras para desviar la escorrentía superficial.

En líneas generales, el balance de masas puede expresarse como:

$$Q_i - Q_o + Q_c - Q_b + Q_{gwd} - Q_{gwr} + (P \times A) - (ET \times A) = \frac{dV}{dt} \quad [9.1]$$

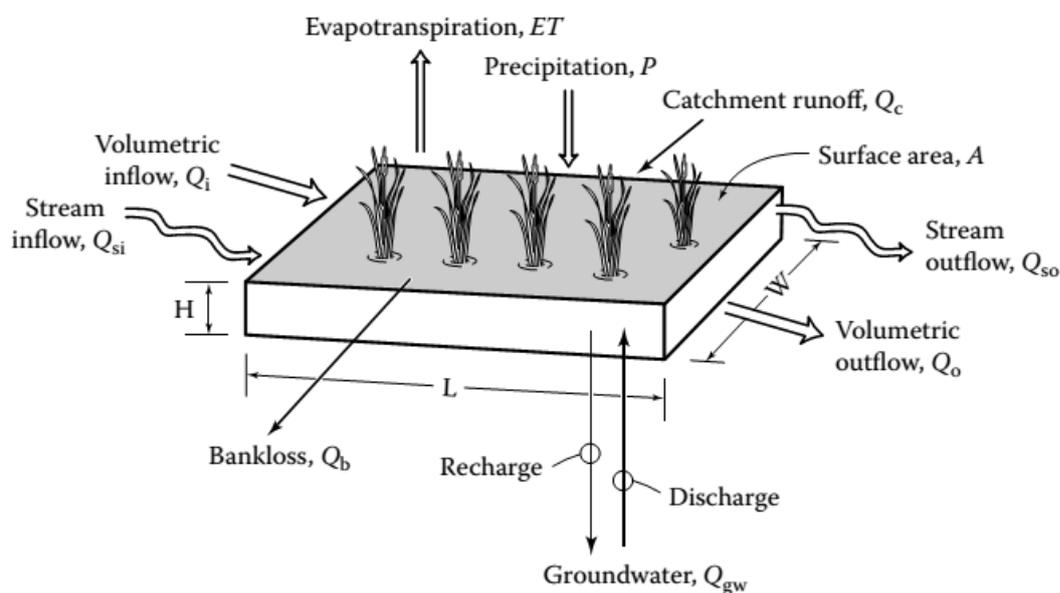


Figura 9.1 – Componentes del balance de masas de un humedal (de Kadlec & Wallace 2009, p22)

### 9.2.1. Tasa de carga hidráulica (HLR, Hydraulic Loading Rate)

Se define como tasa de carga hidráulica ( $q$ ) al caudal dividido el área del humedal:

$$q = \frac{Q}{A} \quad [9.2]$$

donde

$q$  tasa de carga hidráulica, m/d

$A$  área del humedal, m<sup>2</sup>

$Q$  caudal volumétrico, m<sup>3</sup>/d

### 9.2.2. Volumen efectivo y tiempo de retención hidráulica

En el caso de los HSSF el volumen efectivo está definido por el volumen geométrico del diseño multiplicado por la porosidad. El tiempo de retención hidráulica (HRT), por su parte, está definido como el volumen de líquido en flujo activo dividido el caudal volumétrico. En general, hay una tendencia a utilizar este concepto de igual modo que en otros sistemas de tratamiento (tiempo promedio que una porción de líquido permanece dentro del sistema), pero debido a que los humedales son sistemas más complejos hidráulicamente, hacen falta más parámetros para caracterizar el movimiento del líquido (Kadlec & Wallace, 2009). La ecuación es:

$$\tau = \frac{V_{ef}}{Q} = \frac{\varepsilon h A_{ef}}{Q} \quad [9.3]$$

donde

$Q$	caudal volumétrico, m <sup>3</sup> /d
$A_{ef}$	área del humedal con líquido en flujo activo, m <sup>2</sup>
$h$	altura del líquido dentro del humedal, m
$V_{ef}$	volumen del humedal con líquido en flujo activo, m <sup>3</sup>
$\varepsilon$	porosidad del medio
$\tau$	tiempo de retención hidráulica, d

Claramente estas variables, con excepción de la porosidad, dependerán del balance de masas. Un aumento del caudal, por ejemplo, aun cuando también aumente la altura del líquido, en general conlleva a una reducción del tiempo de retención hidráulica. La velocidad del líquido está directamente relacionada con el caudal volumétrico, según:

$$v = \frac{Q}{\varepsilon h W} \quad [9.4]$$

donde

$Q$	caudal volumétrico, m <sup>3</sup> /d
$W$	ancho del humedal, m
$h$	altura del líquido dentro del humedal, m
$\varepsilon$	porosidad del medio
$v$	velocidad del líquido, m/d

### 9.2.3. Fricción y conductividad hidráulica

El movimiento de líquido dentro de un medio poroso es un fenómeno complejo que puede ser abordado con relativa simplicidad al hacer algunas suposiciones. Por ejemplo, en condiciones de saturación, con la superficie libre a la atmósfera y en régimen laminar, la ley de Darcy establece que el caudal que atraviesa un medio poroso es linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico, lo que puede expresarse como:

$$\frac{Q}{hW} = -K \frac{dh}{dx} = u \quad [9.5]$$

donde

$Q$	caudal volumétrico, m <sup>3</sup> /d
$K$	conductividad hidráulica, m/d
$h$	altura del líquido dentro del humedal, m
$W$	ancho del humedal, m
$x$	posición en la dirección $x$ , m
$u$	velocidad superficial del líquido, m/d

Esta ecuación puede ser ampliada para el caso de flujo turbulento, agregando un término de turbulencia proporcional al cuadrado de la velocidad superficial ( $\omega$ , d<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>)

$$-\frac{dh}{dx} = \frac{1}{K}u + \omega u^2 \quad [9.6]$$

Se ha observado un comportamiento semejante al laminar en humedales con arena, pero la grava, las rocas y las raíces suelen provocar turbulencias en el flujo. Además otros parámetros a tener en cuenta son el diámetro medio, la distribución de tamaños, la forma y el acomodamiento de las partículas en el humedal.

## 9.3. Modelos de remoción de contaminantes

Los procesos de remoción descriptos en el Capítulo 3 pueden ser aproximados a diferentes modelos con el fin de poder estimar cómo varían las concentraciones durante el tratamiento. Habitualmente, estos modelos dependen de la concentración del contaminante y de los mecanismos que tienen lugar dentro del humedal en cada caso particular (Kadlec & Wallace, 2009).

El modelo más simple para la remoción de un contaminante es a tasa constante, lo que se conoce como proceso de orden cero, y no depende de la concentración del mismo. Para este caso, la tasa de remoción por unidad de área es ( $\text{g}/\text{m}^2\text{d}$ ):

$$J = k \quad [9.7]$$

Sin embargo muchos de los procesos de remoción, como la volatilización, la sedimentación o la adsorción, pueden ser aproximados como procesos de primer orden, al menos para cierto rango de concentraciones:

$$J = kC \quad [9.8]$$

donde

$k$  coeficiente de remoción,  $\text{m}/\text{d}$

$C$  concentración,  $\text{g}/\text{m}^3$

$J$  tasa de remoción por unidad de área o carga removida,  $\text{g}/\text{m}^2\text{d}$

En otros casos, el comportamiento sólo es de primer orden hasta cierto valor de concentración, lo que se debe a la capacidad limitada del sistema biológico para tratar el contaminante. A partir del valor de saturación, el comportamiento es orden cero:

$$J = k \left( \frac{C}{C+K} \right) \quad [9.9]$$

donde

$K$  constante de saturación,  $\text{g}/\text{m}^3$

Por otro lado, algunos contaminantes dependen de la concentración de otros componentes para poder ser removidos. La nitrificación, por ejemplo, depende de la concentración de oxígeno, mientras que la desnitrificación, de la presencia de fuentes de carbono. En estos casos, la tasa de remoción está limitada por la presencia de ese compuesto.

En general, muchos contaminantes presentan una concentración de fondo ( $C^*$ ) que es un límite intrínseco del tratamiento y propio de cada humedal. Esto puede deberse a que existen fracciones de un contaminante que son resistentes a la degradación, forman complejos con las partículas del sustrato o producen precipitados químicos. Para estos casos se puede dar el fenómeno de flujo inverso, en el

que la tasa de remoción se ve negativamente afectada por esta concentración de fondo (en general, una buena aproximación consiste en considerar este flujo inverso como de orden cero):

$$J = k(C - C^*) \quad [9.10]$$

#### 9.4. Modelo hidráulico de tanques en serie (TIS, tanks in serie)

En un humedal de flujo subsuperficial horizontal, el líquido se desplaza a través de un medio poroso en el que se distribuye y mezcla uniformemente, debido en parte a la turbulencia del flujo. Sin embargo, la canalización creada por la misma granulometría o por las raíces de la vegetación, crea flujos preferenciales en ciertas direcciones (Liehr et al, 2000) lo que se suma al fenómeno de *clogging* (Figura 3.6, Capítulo 3). El modelo hidráulico que mejor aproxima este fenómeno es considerar al humedal como una serie de tanques o compartimentos en serie (Figura 9.2)

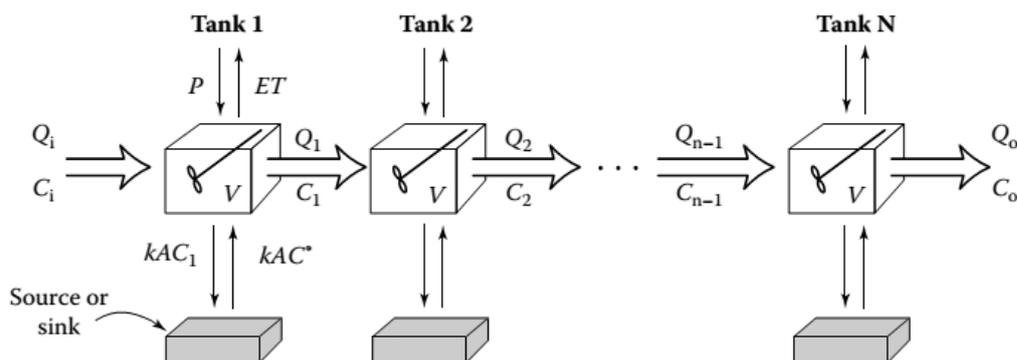


Figura 9.2 – El modelo hidráulico de tanques en serie (TIS) (de Kadlec & Wallace 2009, p189)

El líquido pasa a través de  $N$  compartimentos, y la remoción del contaminante se sucede en cada uno. En el caso de  $P=ET=0$  para un contaminante determinado y suponiendo un proceso de primer orden con una concentración de fondo, el balance de masas en el tanque  $j$ -ésimo, es:

$$(QC_{j-1} - QC_j) = kA(C_j - C^*) \quad [9.11]$$

En tanto que para toda la serie, el balance de masas para un contaminante determinado es (Kadlec & Wallace, 2009):

$$\frac{(C - C^*)}{(C_i - C^*)} = \left(1 + \frac{k\tau}{Nh}\right)^{-N} \quad [9.12]$$

donde

$C$	concentración de salida, g/m <sup>3</sup>
$C_i$	concentración de entrada, g/m <sup>3</sup>
$C^*$	concentración de fondo, g/m <sup>3</sup>
$k$	coeficiente de remoción, m/d
$\tau$	tiempo de retención hidráulica, d
$N$	número de compartimentos en serie
$h$	altura del líquido dentro del humedal, m

### 9.5. Modelo P-k-C\* de remoción de contaminantes

En el año 2009, Kadlec y Wallace desarrollaron el modelo  $P-k-C^*$  que es considerado actualmente el modelo que mejor aproxima el comportamiento de un humedal real y el preferido al momento de diseñarlos.

La Ecuación [9.12] representa la reducción de un componente determinado de un contaminante, mientras que en realidad la mayoría se trata de mezclas. Los parámetros en los que normalmente se basan los diseños, contemplan la medición de estas mezclas como un todo, sin diferenciar entre los diferentes componentes. Por ejemplo, muchos componentes pueden ser oxidados biológicamente y se consideran indistintamente como DBO. Asimismo, un amplio rango de partículas son consideradas dentro de SST, aunque existen infinidad de formas y tamaños.

Claramente cada uno de los componentes individuales de estas mezclas puede ser removido a diferentes tasas de remoción ( $J$ ) y con diferentes coeficientes de remoción ( $k$ ). Por ende, existe una distribución de estos valores de  $k$  para los diferentes  $n$  componentes que definen a un contaminante. Esta distribución puede ser discreta, cuando  $n$  es un valor contable y pequeño, o puede ser continua, para el caso de contaminantes con una cantidad  $n$  de componentes muy grande o posiblemente incontable (Kadlec, 2003). Por ejemplo, el nitrógeno total comprende algunos componentes identificables (como nitrato, o amonio), pero también un conjunto muy variado de componentes cuya identificación resulta más compleja (como nitrógeno particulado, o nitrógeno orgánico). El fósforo total, por su parte, incluye el fósforo particulado, el fósforo orgánico y el fósforo reactivo soluble.

En un modelo TIS, el número de compartimentos está definido por el comportamiento hidráulico del sistema y puede ser medido mediante el uso de trazadores. Estas sustancias son inertes,

fáciles de detectar y no dejan residuos, y son introducidas en el sistema a fin de estudiar su movimiento a través de él. De esta manera se puede estimar el número de compartimentos en serie ( $N$ ).

Se ha observado que el comportamiento real de un humedal puede ser representado mediante un modelo TIS, con un *número aparente de compartimentos en serie* ( $P$ ), que está más relacionado con la fracción orgánica y la actividad biológica, que con las características hidráulicas. A su vez, el valor del coeficiente de remoción para este modelo se reemplaza por un *coeficiente aparente de remoción* ( $k_{ap}$ ) que representa a la mezcla. En otras palabras, el humedal real se comporta como si estuviese conformado por  $P$  compartimentos en serie que remueven el contaminante (que es una mezcla) como si fuera un único componente con coeficiente  $k_{ap}$ :

$$\frac{(C-C^*)}{(C_i-C^*)} = \left(1 + \frac{k_{ap}\tau}{Ph}\right)^{-P} \quad [9.13]$$

Reemplazando por las Ecuaciones [9.2] y [9.3] se obtiene la forma más conocida de esta ecuación:

$$\frac{(C-C^*)}{(C_i-C^*)} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k_{ap}}{Pq}\right)^P} = \frac{1}{\left(1 + \frac{k_{ap}A}{PQ}\right)^P} \quad [9.14]$$

donde

- $C$  concentración de salida, g/m<sup>3</sup>
- $C_i$  concentración de entrada, g/m<sup>3</sup>
- $C^*$  concentración de fondo, g/m<sup>3</sup>
- $k_{ap}$  coeficiente aparente de remoción, m/d
- $P$  número aparente de compartimentos en serie
- $q$  tasa de carga hidráulica, m/d
- $A$  área del humedal, m<sup>2</sup>
- $Q$  caudal volumétrico, m<sup>3</sup>/d

Los autores de este modelo han encontrado que los valores de  $P$  y  $k_{ap}$  pueden ser estimados a partir de los valores de  $N$ ,  $n$  y la distribución de los coeficientes  $k$ . Esto implica, por ejemplo, medir los parámetros hidráulicos y las eficiencias de remoción en sistemas a escala. Cuando esta información no está disponible, una opción aceptable es utilizar valores de referencia de bibliografía, particularmente

cuando las remociones esperadas no son muy altas. Si se dispone del valor medido de  $N$ , una aproximación válida es que  $P = N/2$  (Kadlec & Wallace, 2009).

Por otro lado, en este modelo el valor de  $k_{ap}$  puede verse afectado por la temperatura, lo que generalmente se corrige utilizando la ecuación de Arrhenius:

$$k_{ap} = k_{20}\theta^{(T-20)} \quad [9.15]$$

donde

$\theta$       coeficiente dependiente de la temperatura

$T$       temperatura, °C

$k_{20}$     coeficiente de remoción a 20°C

## 9.6. Diseño del sistema de tratamiento

Teniendo en cuenta las características de los humedales (Capítulo 3), los parámetros recomendados para riego con aguas tratadas (Capítulo 5) y la caracterización realizada del contaminante (Capítulo 8), se propone un diseño de sistema de tratamiento para los lixiviados generados en la planta de compostaje de biosólidos de la ciudad de S. C. de Bariloche, siguiendo los modelos matemáticos desarrollados en este capítulo y de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- a) El sistema debe ser sencillo de operar y con bajo mantenimiento, no debe requerir energía eléctrica para funcionar ni poseer maquinaria o infraestructura susceptibles de ser hurtadas.
- b) El efluente tratado debe ser reutilizado, y debe ser almacenado en los meses de máxima generación para ser usado en los meses de déficit hídrico.
- c) La superficie destinada al sistema de tratamiento es limitada, pero posee una pendiente que puede ser aprovechada para el movimiento del fluido por gravedad.
- d) Se dispone del sistema de captación de lixiviados de las plateas de compostaje, y dos tanques de almacenamiento del sistema de tratamiento actual.
- e) Se deben contemplar posibles variaciones en los caudales generados y en los rendimientos de remoción, como así también cualquier otra contingencia factible de suceder.

### 9.6.1. Propuesta de diseño

Se propone un sistema de tratamiento conformado por dos humedales de flujo subsuperficial horizontal (HSSF) en serie, de modo de aprovechar el espacio disponible y la infraestructura existente. El Humedal 1 estará ubicado a la altura de las plateas de compostaje, mientras que el Humedal 2 estará en el nivel inferior, cerca de los gaviones mencionados en el Capítulo 2. Ambos humedales estarán rellenos con grava media a gruesa. La especie vegetal elegida será el pasto Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) descripta en el Capítulo 4.

El efluente de salida del sistema será recolectado en un estanque a cielo abierto durante los meses de máxima generación para ser utilizado en los meses de déficit hídrico. El efluente tratado será utilizado para irrigación forestal con acceso restringido al público.

### 9.6.2. Diseño de los humedales

Para el dimensionamiento de los humedales se ha utilizado el modelo P-k-C\* descripto anteriormente, con la corrección de la variación por temperatura (Ecuaciones [9.14] y [9.15]). No se dispone mediciones hidráulicas ( $N$ ) ni de eficiencias de remoción ( $k_{20}$ ), por lo que se han utilizado valores tomados de la literatura consultada (Kadlec & Wallace, 2009):

Proceso de remoción	P	C*	$k_{20}$	$\theta$
		mg/L	m/año	
DBO	3	5	37	1,057
Sólidos Totales	3	0,05	200	1,065
Nitrógeno Total	6	1	8,4	1,05
Amonio	6	0,05	11,4	1,05
Nitratos	8	0,05	42	1,05
Fósforo Total	6	0,02	6	1,097

Tabla 9.1 – Parámetros de referencia utilizados para el modelo P-k-C\* (de Kadlec & Wallace, 2009)

El modelo fue aplicado a estos contaminantes. Se espera que otros parámetros medidos en los lixiviados (DQO, CE,  $K^+$ ) sean removidos con eficiencias similares, debido a que comparten muchos de los mecanismos de remoción con los contaminantes de la Tabla 9.1. Los datos meteorológicos medios mensuales utilizados en el modelo, como precipitaciones ( $P$ ), evapotranspiración ( $ET$ ) y temperaturas ( $T$ ) han sido tomados del sitio del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Sistema de Información Patagonia Norte<sup>1</sup>, correspondientes a la EEA INTA Bariloche. Para los caudales de entrada

<sup>1</sup> [www.sipan.inta.gob.ar](http://www.sipan.inta.gob.ar)

( $Q$ ), se han tomado los valores de generación de la Tabla 8.1, teniendo en cuenta que son específicos del periodo considerado y que pueden variar año a año.

		Mes											
		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T	°C	13,9	14,0	12,0	8,8	6,2	3,9	3,1	4,1	5,8	8,0	10,1	12,5
P	mm	15,9	19,3	37,5	59,3	138,7	169,7	120,0	97,6	62,8	52,9	28,2	24,6
ET	mm	143,9	115,0	92,4	59,3	39,2	24,3	25,9	37,7	48,3	64,2	96,4	129,5

Tabla 9.2 – Datos meteorológicos utilizados para el modelo P-k-C\*, periodo 1982-2004

Se ha tomado 0,38 como valor de porosidad ( $\epsilon$ ), que representa adecuadamente una mezcla de grava fina a gruesa, con diámetros efectivos  $D_{10}$  que van desde los 16 a los 128mm (Delgadillo et al, 2010). Se ha propuesto una profundidad de los humedales de 1,2m, con una altura del sustrato ( $h$ ) de 0,7m. La altura del líquido que lo atraviesa puede ser ajustada durante la operación del sistema para adecuar el tiempo de retención hidráulica ( $\tau$ ) (USEPA, 1999).

Se ha considerado la utilización de los dos tanques de 56m<sup>3</sup> disponibles actualmente, a fin de reducir el caudal tratado en el mes de mayor generación. Este volumen almacenado (112m<sup>3</sup>) se distribuye equitativamente los meses de menor generación, incorporándose en el Humedal 2.

El modelo fue volcado en una hoja de cálculo de Microsoft Excel 2013. Los parámetros de entrada del Humedal 1 fueron estimados a partir de la caracterización fisicoquímica de los lixiviados (Capítulo 8), suponiendo los valores más concentrados para las épocas de menor generación (Diciembre-Marzo) y los menos concentrados para las épocas de mayor generación (Abril-Noviembre). Los parámetros de entrada del Humedal 2 son los valores de salida del Humedal 1 (y de los tanques de 56m<sup>3</sup> en los meses de menor generación).

Se ha iterado el modelo con diferentes escenarios, variando las superficies de los humedales. Para los diferentes meses del año se han obtenido valores de salida de N, P y DBO, y con el caudal mensual proyectado se pudo estimar la cantidad de N y P en el año (en kg/año) que saldrían del sistema y la cantidad de oxígeno requerido para degradar la materia orgánica no tratada por el sistema (en kg/año). Se ha observado que mayores superficies de ambos humedales reducen la cantidad final de estos valores, estando limitadas por el espacio disponible (Figura 9.3).

Las dimensiones finales fueron elegidas procurando cumplir con los parámetros de calidad para riego forestal sin acceso al público en todos los meses. Al cumplirse los porcentajes de remoción en las circunstancias más desfavorables (agosto, con máximos caudales, mínimos tiempos de retención y temperaturas bajas) se espera que el sistema pueda satisfacer las condiciones en los demás meses.

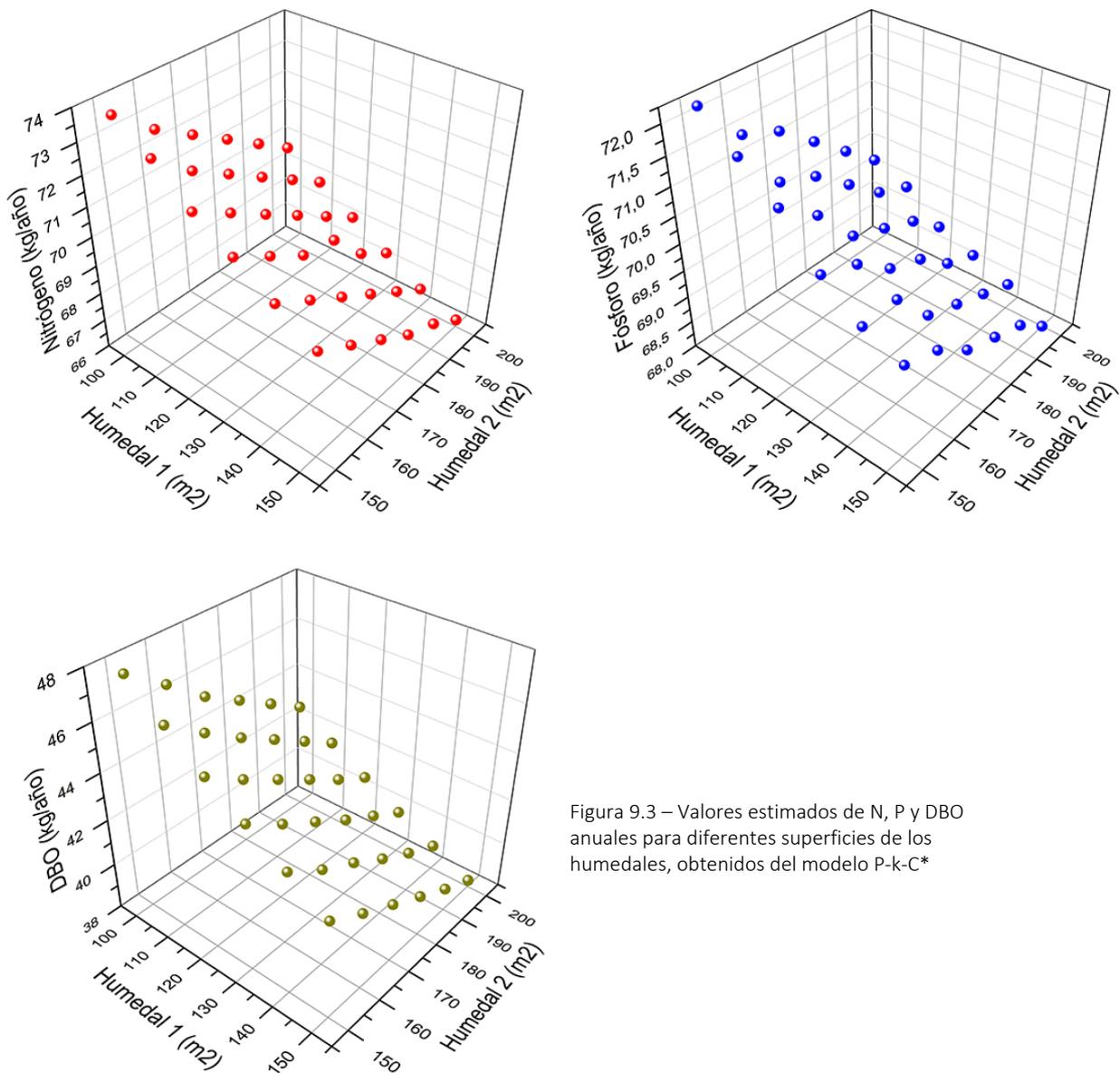


Figura 9.3 – Valores estimados de N, P y DBO anuales para diferentes superficies de los humedales, obtenidos del modelo P-k-C\*

Finalmente se ha elegido una superficie de 150 m<sup>2</sup> para el Humedal 1 y 200 m<sup>2</sup> para el Humedal 2, en función del espacio disponible. El modelo predice los resultados de la Tabla 9.3. Los valores finales de salida del sistema tratamiento son los valores de salida del Humedal 2. Los tiempos de retención varían mes a mes, en función del caudal de entrada (de lixiviados y precipitaciones) y de la altura de operación del humedal. En algunos casos los caudales de salida del Humedal 1 son nulos (en los meses de déficit hídrico máximo).

		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Valores de entrada Humedal 1</b>													
Caudal	m <sup>3</sup>	10	10	10	110	127	255	135	300	140	140	115	15
Sólidos Totales	mg/L	2,5	2,5	2,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	2,5	2,5	2,5
DBO	mg/L	650	650	650	100	100	100	100	100	100	100	100	650
Nitrógeno Total	mg/L	300	300	300	80	80	80	80	80	80	80	80	300
Fósforo Total	mg/L	200	200	200	60	60	60	60	60	60	60	60	200
Nitratos	mg/L	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Amonio	mg/L	250	250	250	50	50	50	50	50	50	50	50	250
<b>Valores de salida Humedal 1</b>													
Caudal	m <sup>3</sup>	0	0	1,8	110	142	277	149	309	142	138	105	0
Sólidos Totales	mg/L	-	-	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	-
DBO	mg/L	-	-	10,0	26,9	36,7	58,9	42,8	61,6	37,4	33,5	24,5	-
Nitrógeno Total	mg/L	-	-	1,0	47,8	56,1	67,7	59,6	68,8	56,5	53,8	45,2	-
Fósforo Total	mg/L	-	-	0,05	47,5	51,9	56,5	54,1	56,7	52,3	50,4	45,5	-
Nitratos	mg/L	-	-	0,05	0,09	0,13	0,25	0,16	0,27	0,14	0,12	0,08	-
Amonio	mg/L	-	-	0,05	24,9	30,8	39,9	33,5	40,7	31,1	29,1	23,1	-
<b>Valores de entrada Humedal 2</b>													
Caudal (†)	m <sup>3</sup>	28	28	28	110	142	277	149	309	142	138	105	28
Sólidos Totales	mg/L	0,5	0,5	0,5	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,5
DBO	mg/L	100	100	94,6	26,9	36,7	58,9	42,8	61,6	37,4	33,5	24,5	100
Nitrógeno Total	mg/L	80	80	75,3	47,8	56,1	67,7	59,6	68,8	56,5	53,8	45,2	80
Fósforo Total	mg/L	60	60	56,4	47,5	51,9	56,5	54,1	56,7	52,3	50,4	45,5	60
Nitratos	mg/L	0,5	0,5	0,47	0,09	0,13	0,25	0,16	0,27	0,14	0,12	0,08	0,5
Amonio	mg/L	50	50	47,0	24,9	30,8	39,9	33,5	40,7	31,1	29,1	23,1	50
<b>Valores de salida Humedal 2</b>													
Caudal	m <sup>3</sup>	2,4	8,9	18,8	110	162	306	168	321	145	136	91	7,0
Sólidos Totales	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
DBO	mg/L	10,0	10,0	10,2	12,2	16,7	33,8	20,3	35,7	16,3	14,3	11,2	10,0
Nitrógeno Total	mg/L	1,0	1,1	2,9	24,6	37,2	55,5	42,4	56,8	36,1	31,8	19,5	1,1
Fósforo Total	mg/L	0,02	0,8	6,9	34,8	43,9	52,8	47,9	52,9	43,7	39,9	34,6	0,6
Nitratos	mg/L	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,13	0,07	0,13	0,06	0,06	0,05	0,05
Amonio	mg/L	0,05	0,07	0,6	10,0	17,5	30,3	20,9	31,3	16,9	14,2	7,3	0,06
<b>Porcentajes de remoción total</b>													
Caudal	%	93,7	77	51	0	-28	-20	-24	-7	-4	3	21	84
Sólidos Totales	%	98	98	98	90	90	90	90	90	90	98	98	98
DBO	%	98	98	98	88	83	66	80	64	84	86	89	98
Nitrógeno Total	%	100	100	99	69	54	31	47	29	55	60	76	100
Fósforo Total	%	100	100	97	42	27	12	20	12	27	34	42	100
Nitratos	%	90	90	90	90	88	74	86	74	88	88	90	90
Amonio	%	100	100	100	80	65	39	58	37	66	72	85	100
<b>Parámetros hidráulicos (basados en caudal promedio)</b>													
Carga hidráulica	cm/d	0,19	0,22	0,27	1,04	1,38	2,67	1,44	2,95	1,36	1,31	0,98	0,24
Tiempo de retención	d	>30	>30	>30	25	19	10	18	9	20	27	27	>30

Tabla 9.3 – Resultados del modelo P-k-C\* para H1=150m<sup>2</sup> y H2=180m<sup>2</sup>. (†) El caudal de entrada de diciembre, enero, febrero y marzo proviene de los tanques de 56m<sup>3</sup> ya existentes

En cuanto al nitrógeno y el fósforo, anualmente los lixiviados crudos aportan alrededor de 126kg y 93kg, respectivamente. Se predice una reducción aproximada de 70kg de N y 35kg de P tras su paso por el sistema de humedales, sin considerar lo utilizado por las plantas Vetiver.

El caudal máximo de entrada se ha estimado en función de las precipitaciones diarias. Considerando que en el mes de máximo volumen de salida (agosto), puede haber días en los que llueve hasta un tercio del total mensual, se ha hecho la suposición de que en esos días el volumen de salida puede ser de hasta un tercio del total estimado (aproximadamente 100 m<sup>3</sup>/d). El sistema de drenaje de los humedales fue calculado en base a este valor y considerando la ecuación de Manning para el movimiento de fluidos en tuberías a gravedad. En esta ecuación se considera la pendiente, la rugosidad del material y el radio hidráulico (que depende del tirante del líquido dentro de la tubería). Haciendo el cálculo para tuberías de PVC, se obtiene que un valor adecuado para seguridad del drenaje es de 110mm de diámetro para todas las tuberías del sistema. Este diámetro permite además el paso de sólidos, lo que reduce el riesgo de obstrucción.

Los esquemas propuestos para los humedales se presentan en las Figuras 9.4 y 9.5, y están basados en las siguientes consideraciones (Tabla 9.4)

		Humedal 1	Humedal 2
Superficie	m <sup>2</sup>	150	200
Largo	m	15	20
Ancho	m	10	10
Profundidad	m	1,2	1,2
Altura del sustrato	m	0,7	0,7
Relación Largo:Ancho		3:2	2:1
Pendiente	%	3	3
Filas de plantas		12	17
Sustrato		Grava gruesa hasta 1,5m de los extremos y grava fina en el centro	
Impermeabilización		Geomembrana de 800 micrones	
Entrada		Tubo de PVC C6 de Ø110mm en T ranurado para drenaje	
Salida		Codo de PVC C6 de Ø110mm rebatible dentro de cámara de inspección	
		Tubo de PVC C6 de Ø110mm para salida de la cámara de inspección	

Tabla 9.4 – Características de diseño de los humedales

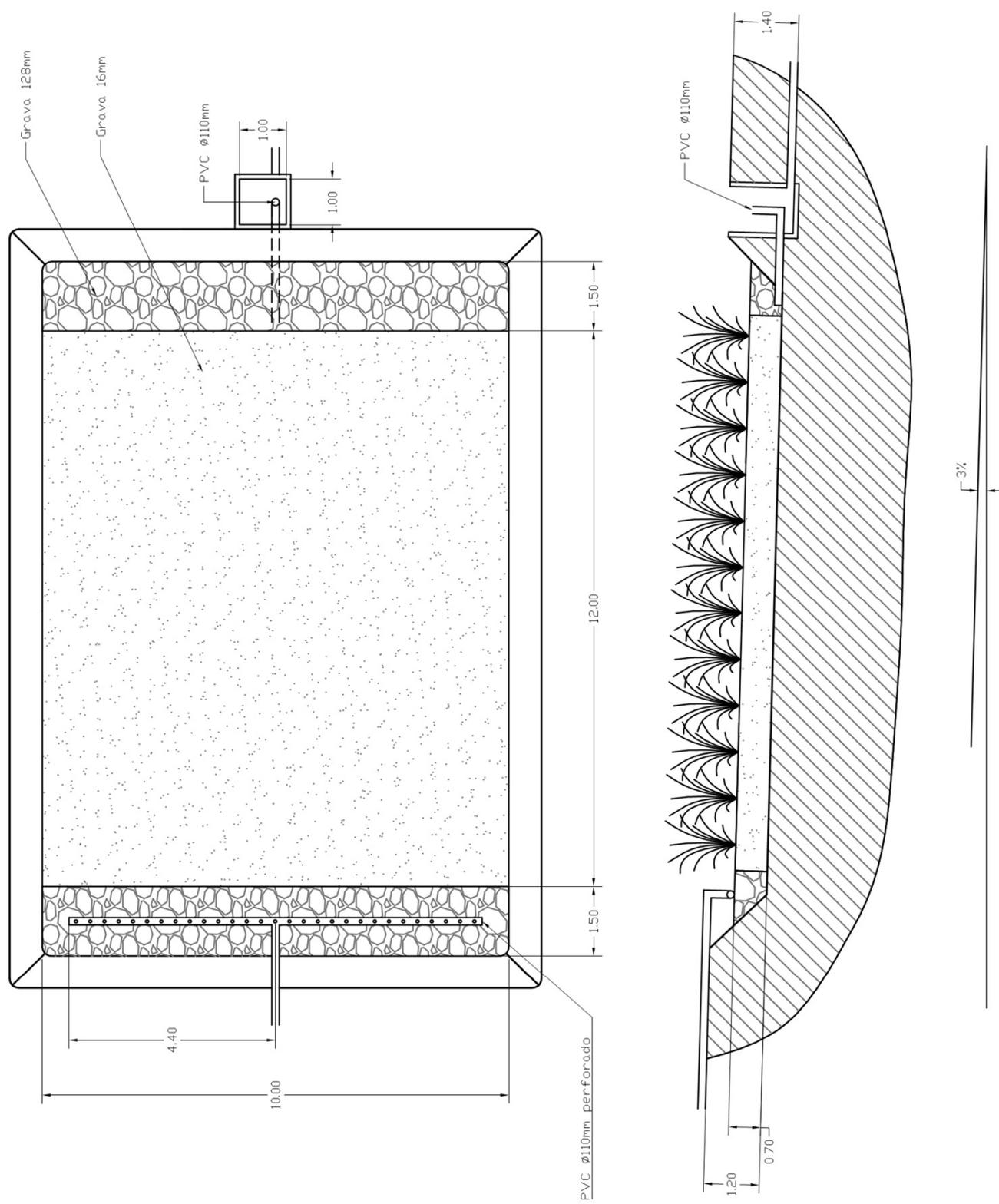


Figura 9.4 – Diseño propuesto para el Humedal 1 (cotas en metros)

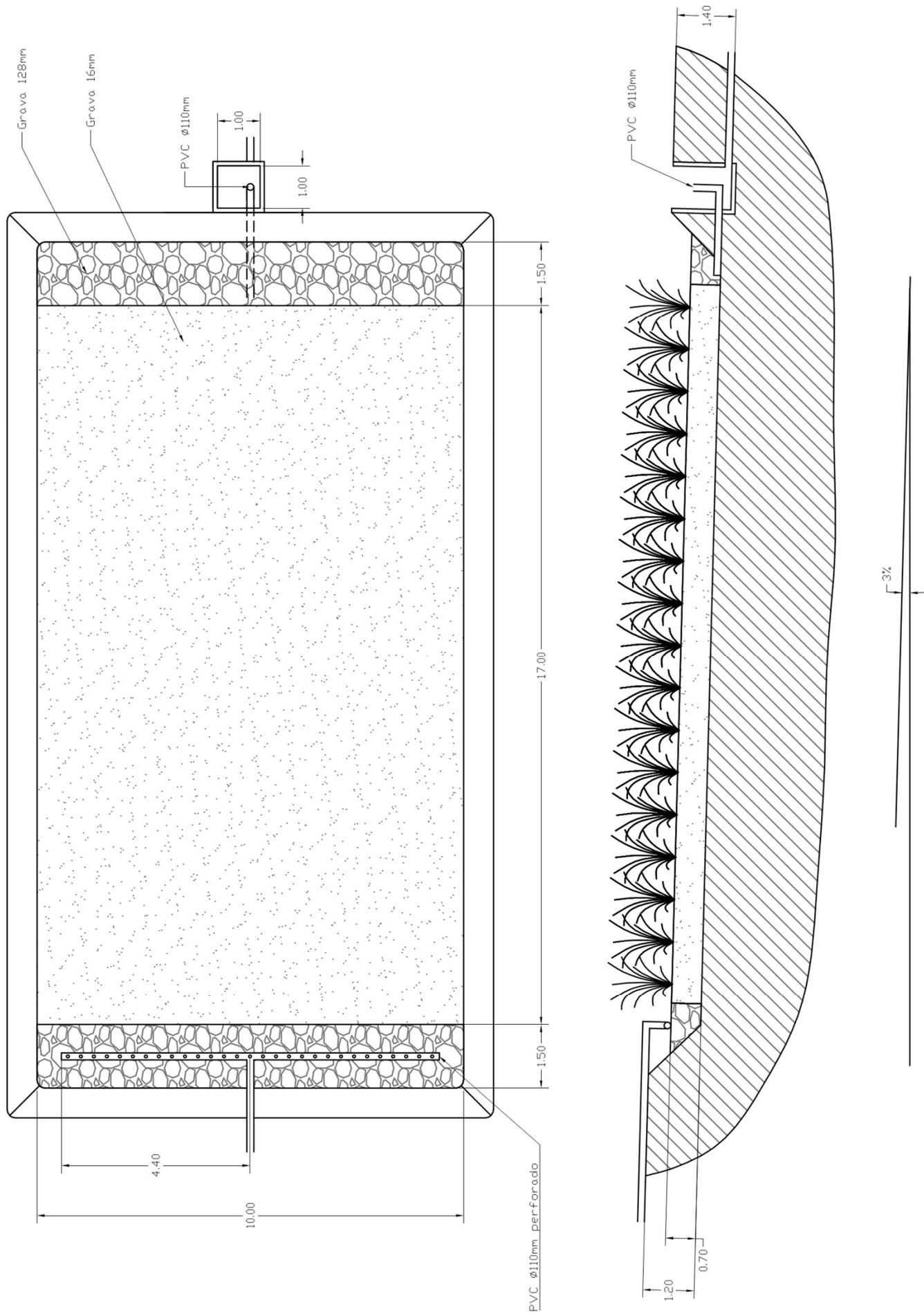


Figura 9.5 – Diseño propuesto para el Humedal 2 (cotas en metros)

### 9.6.3. Diseño del estanque de almacenamiento

Las dimensiones del estanque de almacenamiento se han calculado en función del balance de volúmenes de salida del sistema de humedales, del ingreso por precipitaciones, y el egreso por evaporación y por drenaje. Luego de ensayar con diferentes superficies y profundidades, se ha elegido un estanque con las características resumidas en la Tabla 9.5 (Figura 9.6). Considerando los valores de precipitaciones, evaporación y entrada prevista desde los humedales, la salida ha sido calculada para garantizar el riego en los meses de déficit hídrico. Estas condiciones pueden variar anualmente, y la salida del estanque debe adecuarse a cada año. Se estima, sin embargo, que un volumen de 680 m<sup>3</sup> permite disponer de una buena cantidad de líquido para reutilizar en riego. Además se propone un diseño de estanque que incluya a la entrada un sector de sedimentación y que por desborde se transfiera a otro sector de almacenamiento.

Estanque de almacenamiento		
Superficie	m <sup>2</sup>	400
Largo	m	25
Ancho	m	16
Profundidad	m	1,7
Volumen	m <sup>3</sup>	680
Pendiente	%	2
Impermeabilización		Geomembrana de 800 micrones
Entrada		Tubo de PVC C6 de Ø110mm
Salida		Tubo de PVC C6 de Ø110mm con válvula

Tabla 9.5 – Características del estanque de almacenamiento

		E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Precipitaciones	m <sup>3</sup>	6,4	7,7	15,0	23,7	55,5	67,9	48,0	39,0	25,1	21,2	11,3	9,8	330,6
Evaporación	m <sup>3</sup>	82,4	59,2	47,6	28,4	21,9	13,9	14,5	19,5	26,8	48,0	59,6	74,0	495,8
Humedales	m <sup>3</sup>	2,4	8,9	18,8	110	162	306	168	321	145	136	91	7	1476
Salida	m <sup>3</sup>	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110	1320
Balance	m <sup>3</sup>	-183	-153	-124	-4,6	85	250	91	231	33	-0,8	-67	-167	-9,3
Exceso	m <sup>3</sup>	0	0	0	0	85	250	91	231	33	0	0	0	690

Tabla 9.6 – Balance de volúmenes estimado para el estanque de almacenamiento

Este estanque de almacenamiento posee algunas características comunes a los sistemas de lagunas de estabilización facultativas para el tratamiento de efluentes, por lo que se podría esperar que contribuya con el tratamiento en alguna medida. Además, al diluirse el lixiviado tratado por efecto de las precipitaciones, la salida de este estanque debería tener concentraciones menores a las de entrada. Otro beneficio secundario de almacenar este volumen de líquido es el de poder disponer de él en caso de principios de incendios.

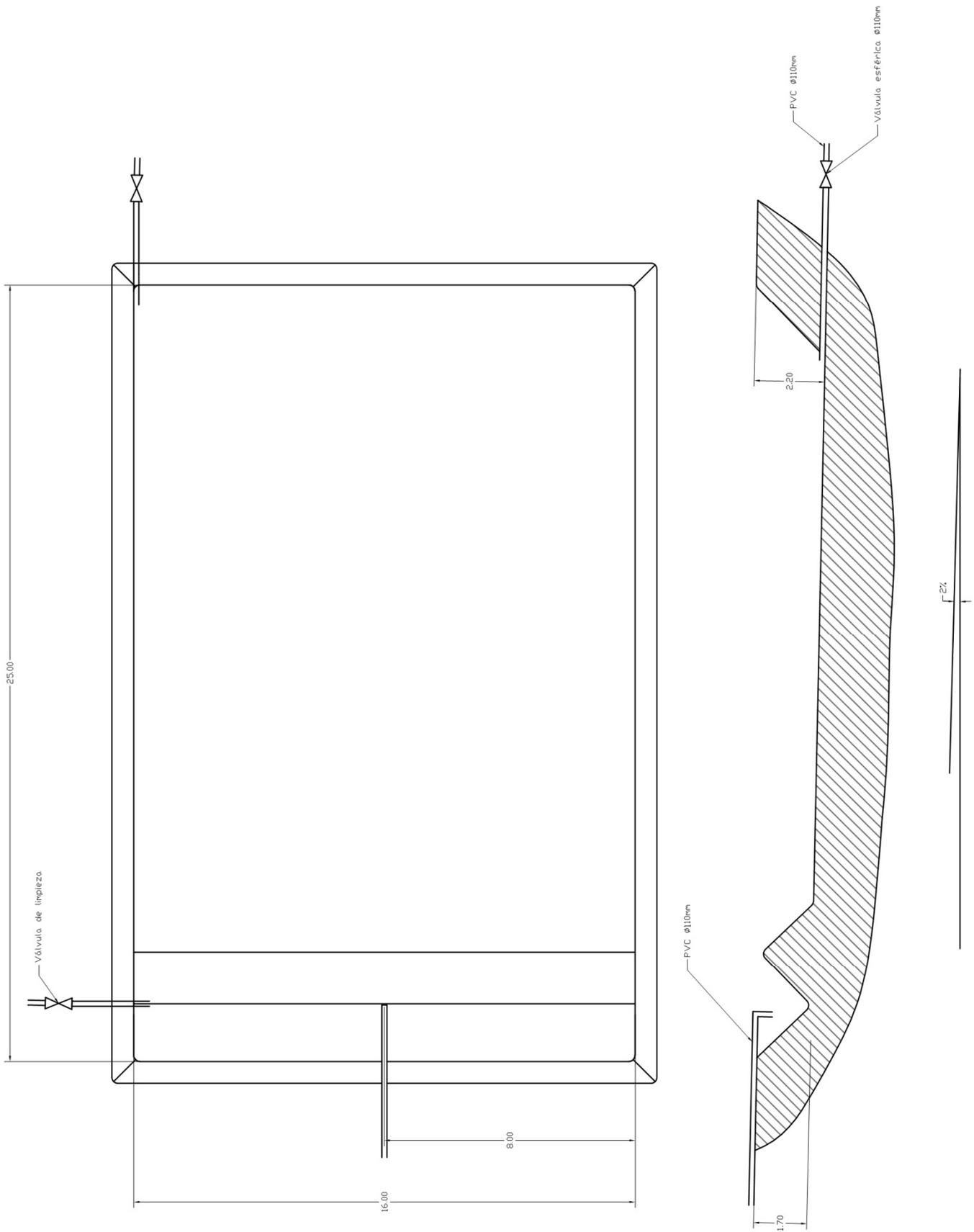


Figura 9.6 – Diseño propuesto para el estanque de almacenamiento de lixiviados tratados (cotas en metros)

#### 9.6.4. Riego con lixiviados tratados

Debido a que el volumen disponible para riego depende de las condiciones climáticas (tanto por la generación de lixiviados como por la pérdida por evapotranspiración), no es posible establecer un valor certero de la superficie que puede destinarse para riego. Si bien el estanque de almacenamiento ha sido dimensionado con un volumen de 680 m<sup>3</sup>, en años secos es posible que no alcance a llenarse o que se evapore rápidamente durante los meses de verano.

El modelo P-k-C\* fue estimado en base a las condiciones climáticas medias calculadas de acuerdo a los datos de los últimos años (Tabla 9.2), y en esas condiciones se prevé un caudal de salida de 110 m<sup>3</sup> todos los meses (Tabla 9.6), lo que equivale aproximadamente a 3660 L/d de lixiviado tratado para reutilizar.

En el trabajo *Estudio, evaluación y lineamientos generales para la aplicación de las aguas residuales tratadas en San Carlos de Bariloche* (UNRN, DPA, AIC y MSCB, 2013) se estimó la superficie factible de ser regada con las aguas residuales tratadas por la planta depuradora de la localidad. En este trabajo se analizaron las características de cinco sitios para poder determinar, entre otros parámetros, el agua útil (*Au*) o agua disponible para las plantas, calculada como la diferencia entre el porcentaje de agua a capacidad de campo a presión de 1/3 de bar; y el porcentaje de agua en el punto de marchitez permanente a 15 bares. En este caso, por comparación con uno de los sitios del mencionado trabajo, se ha tomado el valor de 538 m<sup>3</sup>/ha para el agua útil.

Teniendo en cuenta los meses de déficit hídrico (*Dh*), el valor de agua útil y el consumo de diferentes cultivos (*C*), se ha estimado la superficie que puede ser regada con 110 m<sup>3</sup> mensuales utilizando la ecuación:

$$110 \frac{m^3}{mes} + (Au - Dh - C) \times S = 0 \quad [9.16]$$

donde

<i>Au</i>	Agua útil, m <sup>3</sup> /ha
<i>Dh</i>	Déficit hídrico, m <sup>3</sup> /ha/mes
<i>C</i>	Consumo de la vegetación, m <sup>3</sup> /ha/mes
<i>S</i>	Superficie a regar, ha

En la Tabla 9.7 se resumen los valores estimados para diferentes plantas, los valores de déficit hídrico y consumo de la vegetación fueron extraídos del citado trabajo. Además se agregó el consumo de la Vetiver, considerando la opción de utilizarla también en el sitio de irrigación. En el caso de las cortinas de *Populus sp* la superficie varía de acuerdo al esquema de plantación elegido, la separación entre plantas puede ser entre 1 y 2m, con un distanciamiento entre hileras de 1,5 a 3,5m (Izquierdo et al, 2009).

Cultivo	Consumo de agua (C) m <sup>3</sup> /ha/mes	Agua útil (Au) m <sup>3</sup> /ha	Déficit hídrico (Dh) m <sup>3</sup> /ha/mes	Superficie (S) m <sup>2</sup>	Cantidad de plantas aproximado
<b>Diciembre</b>					
Pastizal	837	538	520	1343	-
<i>Salix humboldtiana</i>	1800	538	520	617	31
<i>Populus sp</i> en cortina	1800	538	520	-	31
<i>Pinus ponderosa</i>	894	538	520	1256	63
Nativas	375	538	520	3081	154
Vetiver	8370	538	520	132	-
<b>Enero</b>					
Pastizal	837	538	590	1237	-
<i>Salix humboldtiana</i>	1800	538	590	594	30
<i>Populus sp</i> en cortina	1800	538	590	-	30
<i>Pinus ponderosa</i>	894	538	590	1163	58
Nativas	375	538	590	2576	129
Vetiver	8370	538	590	161	-
<b>Febrero</b>					
Pastizal	837	538	660	1147	-
<i>Salix humboldtiana</i>	1800	538	660	572	29
<i>Populus sp</i> en cortina	1800	538	660	-	30
<i>Pinus ponderosa</i>	894	538	660	1083	54
Nativas	375	538	660	2213	111
Vetiver	8370	538	660	130	-
<b>Marzo</b>					
Pastizal	837	538	390	1597	-
<i>Salix humboldtiana</i>	1800	538	390	666	33
<i>Populus sp</i> en cortina	1800	538	390	-	32
<i>Pinus ponderosa</i>	894	538	390	1475	74
Nativas	375	538	390	4846	242
Vetiver	8370	538	390	134	-

Tabla 9.7 – Superficie estimada de riego y cantidad aproximada de plantas para cada mes de déficit hídrico según los requerimientos de la vegetación, agua útil y déficit hídrico mensual. El grupo “Nativas” es un promedio de ciprés de la cordillera, radial, ñire, entre otros.

Los valores de consumo corresponden a árboles adultos, por lo que en las fases iniciales del proyecto es recomendable duplicar la superficie estimada. Esta suposición tiene validez considerando

que se espera un aumento en la cantidad de lixiviados producidos por la ampliación de la capacidad operativa de la planta depuradora de aguas residuales en los próximos años. Para este caso se ha decidido optar por una cortina de una hilera de álamo criollo (*Populus nigra*) distribuidos a lo largo de un desnivel topográfico (un total de 60 ejemplares, separados 1,5m entre sí). Si bien no es nativa, finalmente se ha elegido esta especie por las siguientes razones:

- El elevado consumo de agua, lo que permite disponer de grandes volúmenes de lixiviados tratados en poco espacio, reduciendo el área comprometida de matorral nativo en el sitio.
- Su rápido crecimiento y altura, lo que podría reducir la dispersión de los olores generados en el proceso de compostaje y tratamiento de lixiviados.
- Es una especie que tolera el frío, heladas, nieve y vientos fuertes, además de que su madera posee valor comercial (Izquierdo et al, 2009).

No obstante se recomienda un adecuado manejo silvicultural de la cortina de álamos, realizando una poda de formación a temprana edad y evitando la propagación hacia el sector ocupado por especies nativas. El notable consumo de la Vetiver hace que sea una opción a tener en cuenta en caso de que sea necesario disponer de un volumen de lixiviados tratados mayor al estimado.

Considerando las propiedades edáficas y la topografía del sitio, se ha optado por el riego localizado por goteo. Esto minimiza las pérdidas por infiltración y evaporación, a la vez que se reducen los problemas de erosión hídrica.

#### 9.6.5. *Distribución en planta*

Considerando la infraestructura y el espacio disponibles, y teniendo en cuenta que la pendiente dominante del sector es en dirección S a N/NE, se recomienda distribuir el sistema de tratamiento tal como se esquematiza en las Figuras 9.7 y 9.8.

#### 9.6.6. *Consideraciones finales sobre el diseño*

Dado que la generación de lixiviados, y por ende la concentración de contaminantes, depende de factores que no pueden ser controlados desde el sistema de tratamiento (precipitaciones, evapotranspiración, cantidad de compost, proporción de estructurante), es posible que se den condiciones iniciales diferentes a las utilizadas en el diseño. Asimismo, pueden darse temperaturas

medias menores afectando a los procesos de remoción de contaminantes. Por estas razones se ha elegido un diseño sobredimensionado, modular y flexible, capaz de adaptarse a las condiciones reales que puedan darse durante el funcionamiento.

En el dimensionamiento se han elegido valores de coeficientes de remoción ( $k_i$ ) menores para incluir la posibilidad de un rendimiento menor no esperado. Tampoco se ha considerado en ningún momento la remoción adicional por parte de la especie Vetiver, que como se comentó en el Capítulo 4, es mayor que las especies generalmente utilizadas en fitorremediación. Además el efecto de la temperatura se ha sobreestimado puesto que en los humedales subsuperficiales (HSSF), la reducción en la eficiencia es menor por el aislamiento del sustrato. Estas consideraciones llevaron al cálculo de una superficie mayor que la necesaria según las condiciones actuales.

Por otra parte, se ha incluido un espacio libre de 50 cm por encima del sustrato para poder acaparar cualquier exceso en la generación de lixiviados. En condiciones normales de operación, el Humedal 1 puede contener 39,9 m<sup>3</sup>, mientras que el Humedal 2 puede contener 53,2 m<sup>3</sup>. Sin embargo, si son llenados hasta el máximo de su capacidad, pueden contener 114,9 y 153,2 m<sup>3</sup>, respectivamente.

Por otro lado el sistema se ha pensado como modular, existiendo la posibilidad de incluir otros humedales equivalentes que funcionen en paralelo a los propuestos. Por esta razón se ha reservado espacio libre que podría utilizarse ante la necesidad de ampliar la capacidad de tratamiento.

Finalmente, el diseño es flexible ya que se puede cambiar la hidráulica de los humedales (pasando de ser HSSF a FSW, por ejemplo) y el estanque de almacenamiento de lixiviados tratados puede adecuarse para convertirse en un humedal, en una laguna de estabilización facultativa o agregarle balsas para el tratamiento mediante hidroponía. También el área de irrigación puede ajustarse, agregando más plantas al sistema de riego, lo que aumenta la demanda de líquido y nutrientes, y reduce la presión sobre el sistema de tratamiento.

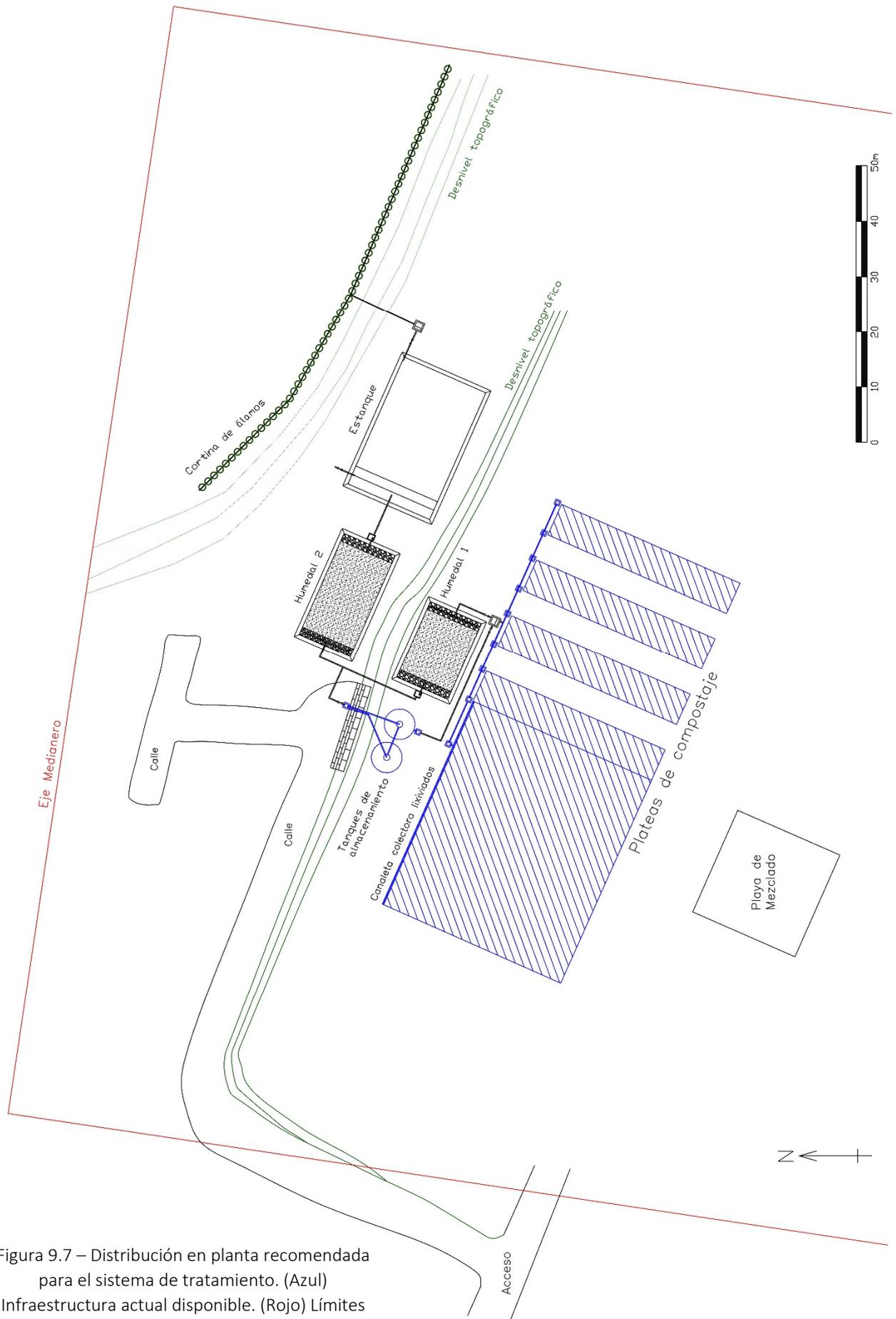
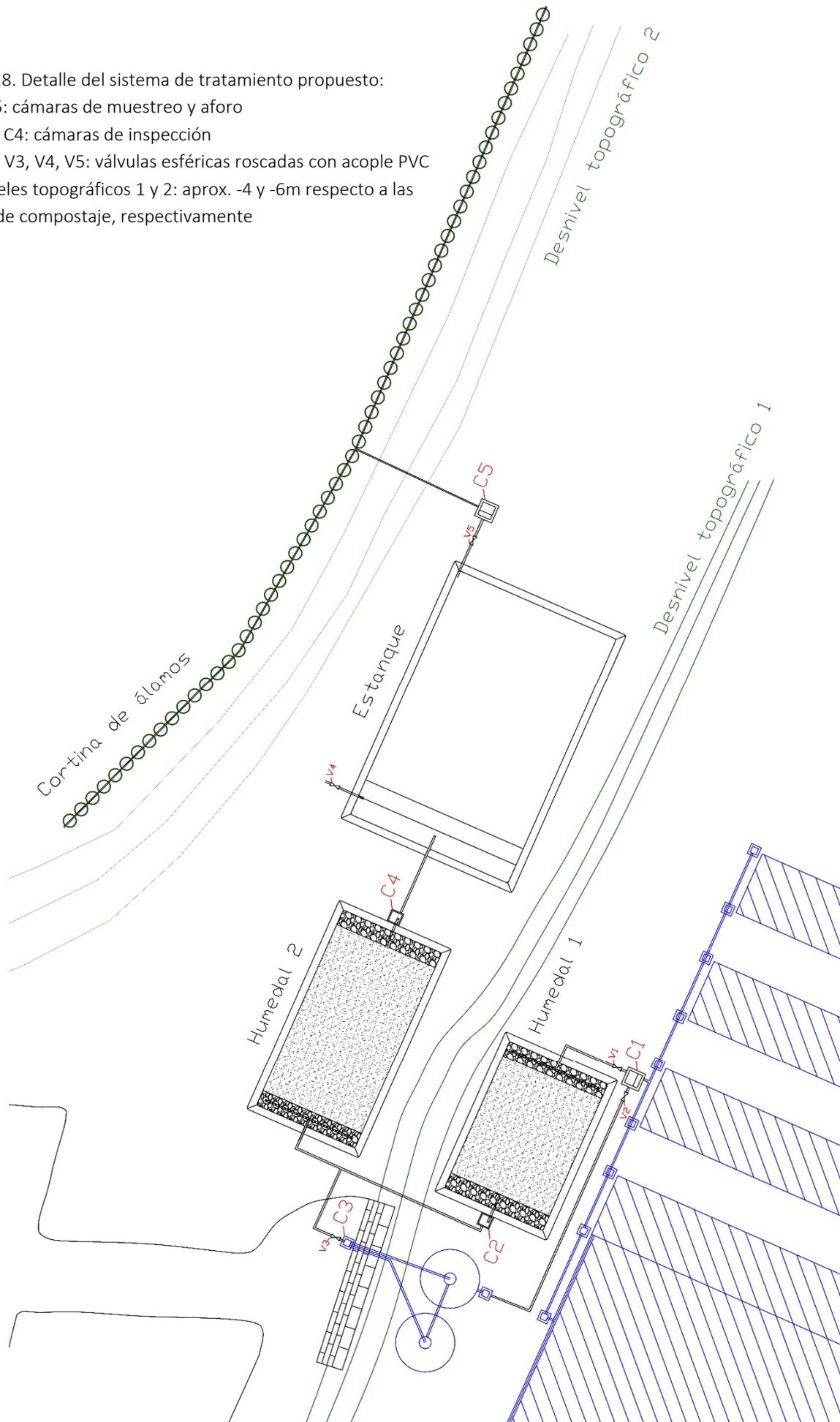


Figura 9.7 – Distribución en planta recomendada para el sistema de tratamiento. (Azul) Infraestructura actual disponible. (Rojo) Límites del lote. (Verde) Desniveles topográficos

Figura 9.8. Detalle del sistema de tratamiento propuesto:

- C1 y C5: cámaras de muestreo y aforo
- C2, C3, C4: cámaras de inspección
- V1, V2, V3, V4, V5: válvulas esféricas roscadas con acople PVC
- Desniveles topográficos 1 y 2: aprox. -4 y -6m respecto a las plateas de compostaje, respectivamente



### 9.7. Operación, mantenimiento y monitoreo del sistema de tratamiento

En esta sección se describe el funcionamiento general del sistema de tratamiento, su operación básica, las tareas de mantenimiento y los protocolos para el monitoreo de calidad de proceso.

#### 9.7.1. Operación

Debido a que el sistema fue diseñado para adaptarse hidráulicamente a un amplio rango de condiciones climáticas, la operación es sencilla y no requiere de una dedicación exclusiva. No obstante, para aprovechar mejor los recursos y garantizar las condiciones de diseño, se recomienda alternar entre tres configuraciones de paso de caudales a través del sistema, para lo cual se utilizan una serie de válvulas mencionadas anteriormente. El sistema puede representarse como se muestra en el esquema de la Figura 9.9.

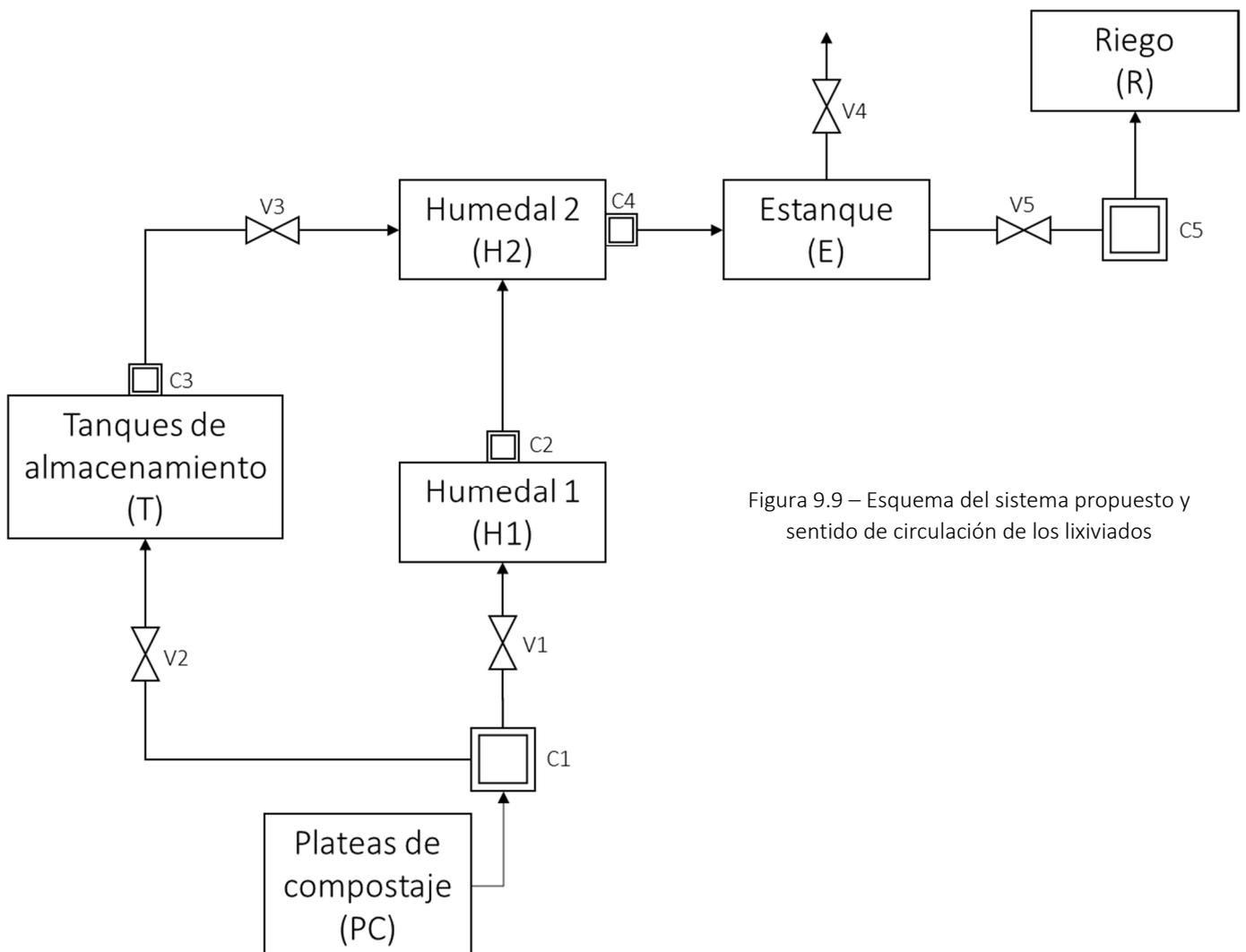


Figura 9.9 – Esquema del sistema propuesto y sentido de circulación de los lixiviados

A continuación se describen las configuraciones de operación del sistema que se proponen para el funcionamiento en determinadas condiciones. Se obtienen alternando el paso a través de las válvulas V1, V2, V3, V4 y V5.

- *Configuración 1 – Condiciones normales de operación*

Los lixiviados son tratados en el sistema de humedales y almacenados en el estanque. Se derivan por desborde caudales excesivos de lixiviados hacia los tanques de almacenamiento a través de la cámara de muestreo y aforo C1 (Figura 9.10). Se propone esta configuración para los meses de abril a noviembre, cuando las precipitaciones son suficientes para garantizar un caudal mínimo de lixiviados que permita el correcto funcionamiento de los humedales. Cualquier exceso en el caudal de entrada se deriva hacia los tanques de almacenamiento para su posterior tratamiento. El efluente tratado es almacenado en el estanque, pero la válvula de salida al sistema de riego por goteo (V5) puede ser abierta según las necesidades de riego de la cortina de álamos.

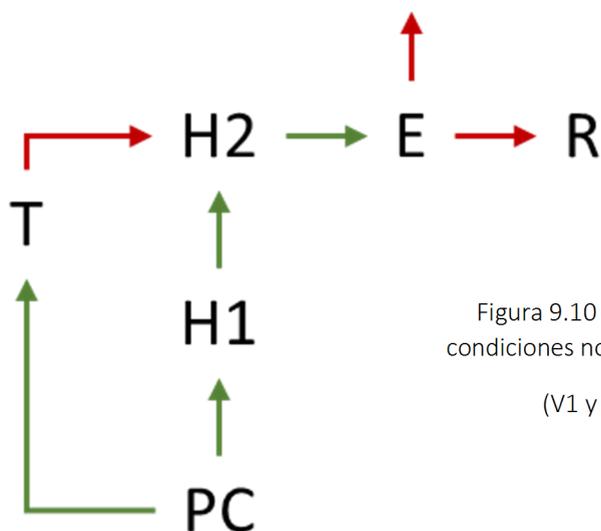


Figura 9.10 – Configuración 1, condiciones normales de operación

(V1 y V2 abiertas)

- *Configuración 2 – Mínima generación de lixiviados*

Los lixiviados generados en el compostaje son captados por el Humedal 1, mientras que el Humedal 2 recibe los lixiviados almacenados en los tanques durante los meses de máxima generación. El efluente tratado almacenado en el estanque es utilizado en el riego de los álamos (Figura 9.11). Esta configuración se propone para los meses de diciembre a marzo, en los cuales se dan condiciones de déficit hídrico. Las precipitaciones son escasas y la evapotranspiración es máxima durante estos meses,

por lo que los lixiviados generados sólo alcanzan para mantener al Humedal 1 en funcionamiento. El Humedal 2 se mantiene gracias a los volúmenes almacenados en los tanques.

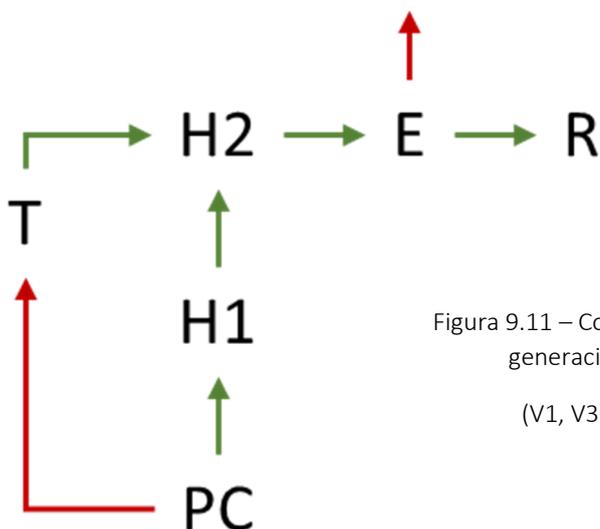


Figura 9.11 – Configuración 2, mínima generación de lixiviados

(V1, V3 y V5 abiertas)

- *Configuración 3 – Tareas de mantenimiento*

Esta configuración es situacional y depende de las tareas de mantenimiento que deban realizarse en las diferentes etapas del proceso (Figura 9.12). V1 debe cerrarse cada vez que se realicen tareas en los humedales (como replantación de las Vetiver, cambio del sustrato, limpieza de canales), en tanto que los lixiviados generados se derivan a los tanques de almacenamiento (V2 abierta, V3 cerrada). V5 debe cerrarse cada vez que realicen tareas en la cortina de álamos (poda, limpieza, sustitución de ejemplares muertos). V4 debe abrirse cada vez que se realicen tareas de limpieza en el estanque.

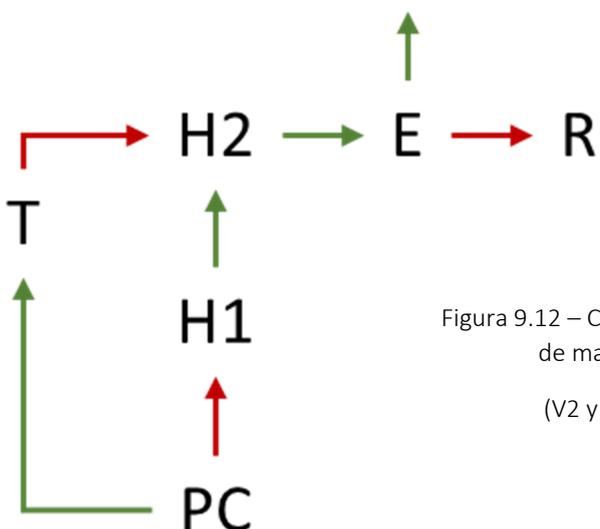


Figura 9.12 – Configuración 3, tareas de mantenimiento

(V2 y V4 abiertas)

### 9.7.2. Mantenimiento

A continuación se detallan las tareas de mantenimiento propuestas que deben ser llevadas a cabo en el sistema de tratamiento con determinada frecuencia. Estas tareas permiten preservar la integridad de las estructuras y mantener las condiciones de higiene y seguridad. Asimismo mejoran el proceso al asegurar que el flujo se distribuya correctamente en todo el sistema, permitiendo un correcto desarrollo del ecosistema de humedales y un mejor aprovechamiento en el riego forestal. Las tareas pueden clasificarse de acuerdo al sector del sistema en el que se desarrollan:

- *Plateas de compostaje:*
  - *Limpieza de canaletas:* las canaletas que recolectan los lixiviados en las plateas de compostaje son susceptibles de obstrucciones debido a que no están cubiertas, lo que puede provocar el desborde de líquido no tratado. Se deben revisar diariamente y liberar de cualquier residuo sólido.
  
- *Humedales:*
  - *Limpieza de tuberías:* las entradas y las salidas de los humedales deben ser limpiadas al menos una vez por semana para evitar obstrucciones que limiten el flujo.
  - *Limpieza de cámaras de inspección:* si bien se encuentran tapadas, estas cámaras pueden acumular sedimentos que podrían afectar el control de la altura de líquido dentro de los humedales, por lo que se recomienda limpiarlas al menos una vez por mes.
  - *Reemplazo del sustrato:* la saturación del sustrato por acumulación de sedimentos y desarrollo excesivo de biofilms puede provocar cambios importantes en las características hidráulicas de los humedales (*clogging*), disminuyendo la eficiencia del tratamiento. Para aguas residuales domésticas, este fenómeno suele aparecer de dos a nueve años desde el inicio de las operaciones, dependiendo de las características del efluente y de las condiciones de tratamiento. En este caso se recomienda revisar anualmente la saturación del sustrato mediante ensayos de permeabilidad en los humedales, principalmente en los primeros metros desde la entrada. El sustrato puede ser reemplazado por material nuevo, o lavado y reutilizado.
  - *Sustitución de vegetación muerta:* dada la importancia de la vegetación en el tratamiento, es fundamental reemplazar los ejemplares de Vetiver que por alguna razón

hayan muerto o que presenten signos de dificultades de adaptación y desarrollo. Se deben sustituir con plantas nuevas a comienzos de la primavera.

- *Tanques de almacenamiento:*
  - *Limpieza de tuberías:* las entradas y las salidas a los tanques de almacenamiento deben ser limpiadas al menos una vez por semana para evitar obstrucciones que limiten el flujo.
  - *Remoción de sedimentos:* los tanques actualmente disponen de válvulas de limpieza que se utilizan para remover los sedimentos acumulados en el fondo. Este procedimiento debe ser realizado preferentemente a fines de noviembre, a fin de reducir los sólidos suspendidos que ingresan al Humedal 2 cuando el sistema opera en la Configuración 2.
  
- *Estanque:*
  - *Limpieza de tuberías:* la entrada y la salida al estanque deben ser limpiadas al menos una vez por semana para evitar obstrucciones que limiten el flujo.
  - *Remoción de sedimentos:* la válvula de limpieza del estanque (V5) permite remover los sólidos que por sedimentación se acumulan en la entrada. Esta operación debe realizarse a comienzos de abril, debido a que el volumen de líquido tratado almacenado es mínimo al final del verano y antes de la época de lluvias.
  
- *Riego forestal:*
  - *Mantenimiento del sistema de riego:* el riego por goteo es susceptible de obstrucciones por acumulación de sedimentos, por lo que se recomienda revisar los puntos de drenaje, la integridad de las mangueras y acoples, y el correcto suministro de líquido tratado en toda la línea. Esta operación se debe realizar a fines del invierno (para comprobar que no haya daños por congelamiento), y semanalmente durante los meses de verano.
  - *Poda de formación:* permite eliminar horquillas y ramas que compiten con la guía principal del árbol, lo que asegura un mejor funcionamiento como cortina forestal. Esta poda debe comenzar en los primeros años y proseguir anualmente hasta que se alcanzan alturas de 4-5 metros, siempre realizándose hacia fines del invierno.
  - *Poda de limpieza:* se eliminan las ramas finas de la parte inferior del árbol, lo que mejora el funcionamiento como cortina y se logra, además, una troza libre de nudos para un

aprovechamiento posterior. Se puede realizar tanto en período vegetativo como en reposo invernal, al menos una vez por año.

- *General:*

- *Limpieza de cámaras de muestreo y aforo:* se pueden acumular sedimentos que podría ocasionar obstrucciones o malas lecturas de los caudales. Se recomienda limpiarlas al menos una vez por mes.
- *Limpieza del predio:* se debe mantener el orden y la limpieza del predio, evitando la acumulación de residuos, lo que reduce el riesgo de accidentes y mejora el aspecto visual del sistema de tratamiento.
- *Control de malezas:* se deben remover malezas a fin de evitar la proliferación de animales indeseados, a la vez que se mejora el aspecto visual del predio. Es recomendable realizar esta operación en primavera.
- *Control de plagas:* se debe evitar la proliferación de animales que puedan ser vectores de enfermedades (moscas, mosquitos, roedores, entre otros), mediante fumigaciones frecuentes (al menos una vez por mes en los meses de reproducción) y trampas permanentes. Asimismo es recomendable controlar cualquier plaga que pueda interferir con el tratamiento, particularmente aquellos animales herbívoros que podrían atacar a la vegetación involucrada.
- *Revisión de condiciones de higiene y seguridad:* al menos una vez por mes se debe revisar el stock de elementos de protección personal (EPP) tales como guantes, barbijos e indumentaria adecuada. A su vez, es recomendable controlar mensualmente la validez de los matafuegos de los vehículos y la disponibilidad de materiales para primeros auxilios en las instalaciones de la planta de compostaje. Diariamente debe garantizarse el suministro de agua segura para el consumo y el aseo personal de los operarios.

Las tareas de mantenimiento descriptas generan residuos que deben ser gestionados adecuadamente según su origen y las cantidades previstas. Éstos pueden clasificarse en:

1. *Residuos de la limpieza de canaletas de lixiviados:* en la actualidad las canaletas se obstruyen por una mezcla de tierra, lixiviados, hojarasca y material estructurante

(aserrín y chips de madera). Estos residuos deben ser reutilizados en el proceso de compostaje.

2. *Residuos de la limpieza de tuberías y cámaras:* estos sitios pueden ser obstruidos por una mezcla de sedimentos y lixiviados en diferentes estados de tratamiento. Estos residuos pueden ser depositados en la superficie de los humedales.
3. *Sedimentos de los sitios de almacenamiento:* los tanques de almacenamiento y el estanque previo al riego forestal pueden acumular sedimentos. Una vez removidos éstos pueden ser colocados nuevamente en la superficie de los humedales.
4. *Restos de vegetación:* estos residuos se generarían durante las tareas de poda de la cortina de álamos, de reemplazo de vegetación muerta en los humedales y en el desmalezamiento del predio. Pueden ser reutilizados en el proceso de compostaje como material estructurante.
5. *Limpieza de derrames accidentales:* el vertimiento accidental de productos químicos (plaguicidas, fertilizantes, productos de limpieza), de combustibles, o de lixiviados sin tratar en el suelo, debe ser tratado con especial cuidado para prevenir accidentes personales y una propagación mayor de la contaminación. Se recomienda:
  - a. Evaluar la importancia del vertido y atender al personal afectado si lo hubiera
  - b. Avisar al responsable del proceso
  - c. Identificar el producto derramado y consultar la ficha de seguridad
  - d. Empleando el material de seguridad necesario, controlar la fuente del derrame y contener la propagación.
  - e. Remover el suelo afectado y reservarlo en un recipiente adecuado de acuerdo al producto. Si se trata de derrames de lixiviados, el suelo afectado puede ser ubicado en la superficie de los humedales. En cambio, si se trata de una sustancia con características especiales se debe gestionar como establece la normativa vigente y aplicable. Los residuos especiales deben almacenarse en depósitos transitorios hasta su tratamiento o disposición final.
6. *Elementos de protección personal usados:* para las tareas de mantenimiento debe utilizarse material de seguridad apropiado (guantes, barbijos, mamelucos descartables) que, una vez utilizados, deben almacenarse y transportarse a la planta depuradora para que sean gestionados junto a los residuos del mismo tipo generados en la operación y el mantenimiento.

### 9.7.3. Monitoreo

Se entiende por monitoreo a la medición y observaciones continuas y estandarizadas del sistema de tratamiento, destinadas a evaluar su funcionamiento, detectar anomalías y verificar el cumplimiento de los objetivos propuestos en cuanto a la calidad del efluente tratado (Delgadillo et al, 2010). En la implementación de un programa de monitoreo se deben definir: (i) la ubicación de los puntos de muestreo, (ii) la metodología de recolección de las muestras, y (iii) los análisis que deben realizarse a campo y en el laboratorio.

- *Ubicación de los puntos de muestreo*

El sistema cuenta con diversos puntos de muestreo y control (Figura 9.13), que se detallan a continuación:

1. *Muestra de entrada del sistema de tratamiento:* permite obtener la muestra de lixiviados crudos que ingresarán al sistema para su tratamiento. Se obtiene directamente de la cámara C1 de muestreo y aforo.
2. *Salida Humedal 1:* permite obtener la muestra del efluente tratado por el Humedal 1. Se obtiene en la cámara C2 de inspección desde la que se regula la altura del líquido dentro del humedal.
3. *Salida tanques de almacenamiento:* permite obtener la muestra de los lixiviados almacenados en los tanques y que posteriormente ingresarán al Humedal 2. Se obtiene directamente de la cámara C3 de inspección de los tanques, que se encuentra disponible actualmente.
4. *Salida Humedal 2:* permite obtener la muestra del efluente tratado por el Humedal 2. Se obtiene en la cámara C4 de inspección desde la que se regula la altura del líquido dentro del humedal.
5. *Muestra de salida del sistema de tratamiento:* permite obtener la muestra de líquido almacenado en el estanque luego de pasar por el sistema de humedales y antes de ser aplicado en el riego forestal. Se obtiene directamente desde la cámara C5 de muestreo y aforo.

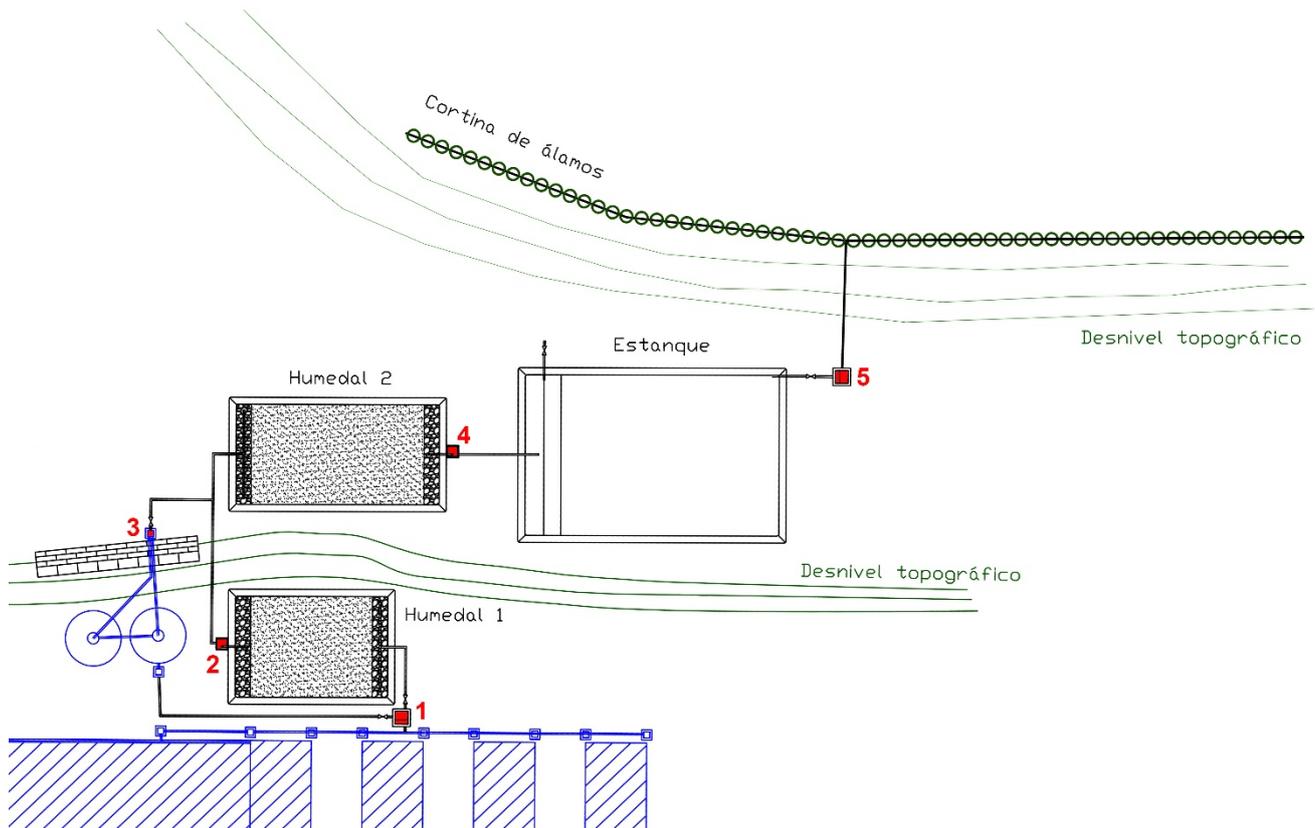


Figura 9.13 – Ubicación de los puntos de muestreo

Adicionalmente pueden requerirse muestreos puntuales para análisis de suelos en el sector de riego forestal o en el sustrato de los humedales. Asimismo se recomienda instalar puntos de muestreo freaticométrico para evaluar la calidad de la napa en diversos puntos, particularmente en el sector de riego, y comparando los resultados con algún punto de control que se suponga libre de contaminación.

- *Metodología de recolección de las muestras*

La metodología de recolección de las muestras incluye: (i) la planificación del muestreo, (ii) el tipo de muestra, y (iii) la conservación, almacenamiento y registro de las mismas. En general se debe seguir la reglamentación estipulada por el ente regulador de la prestación del servicio (en este caso el Departamento Provincial de Aguas), pero como no están definidos los lineamientos generales para este tipo de efluentes, se propone la siguiente metodología:

- *Planificación del muestreo:* la puesta en marcha del sistema de tratamiento puede requerir algunos meses, en tanto que la máxima capacidad de depuración puede alcanzarse luego de algunos años, ya que está asociada a la madurez biológica de la vegetación y los microorganismos (Kadlec & Wallace, 2009). Además, como cualquier sistema natural, la depuración por fitorremediación se ve influenciada por las

condiciones climatológicas al verse afectada la actividad biológica en las diferentes estaciones. Por esta razón se recomienda realizar el muestreo con dos frecuencias independientes:

1. *Muestreo mensual*: para evaluar el proceso en general, comparando los valores de entrada y de salida (puntos 1 y 6 de muestreo). Los resultados se informan a la autoridad de aplicación, por lo que deben ser realizados por terceros.
  2. *Muestreo estacional*: para evaluar el funcionamiento del proceso en sus diferentes etapas se deben evaluar todos los puntos de muestreo en cada estación. Se recomienda muestrear en enero, abril, julio y octubre. Debido a que los resultados son de uso interno con propósitos operativos, pueden ser realizados en el laboratorio de la planta depuradora, siempre que sea posible.
- *Tipo de muestra*: el objetivo de cualquier toma de muestras es recoger una porción del material que se busca analizar, lo suficientemente pequeña como para ser transportada adecuadamente pero que represente fielmente las características originales al momento del muestreo y manteniendo las proporciones relativas (Delgadillo et al, 2010). Para este caso se recomiendan dos criterios de muestreo:
1. *Muestra simple o puntual*: consiste en tomar la muestra en un momento determinado, lo que permite identificar picos máximos o mínimos.
  2. *Muestra compuesta*: resulta de la mezcla y homogeneización de muestras puntuales recogidas en un mismo punto a lo largo de un período de tiempo. La contribución de cada muestra puntual a la mezcla final depende del caudal registrado al momento de la recolección.
- *Conservación, almacenamiento y registro*: para asegurar que las muestras sean transportadas hasta el laboratorio sin que se alteren significativamente, se deben adoptar algunas medidas que dependen de la determinación que se deba realizar (Tabla 9.8). En líneas generales, es recomendable conservar la muestra refrigerada (con conservadoras portátiles) y evitando la exposición directa a la luz, siempre enjuagando el recipiente previamente con la muestra al menos dos veces. Por lo regular, alcanza con 1 a 2 L de muestra para todas las determinaciones. Los recipientes deben ser rotulados con número, fecha, hora e identificación del punto de muestreo. Se debe mantener un

registro de los muestreos realizados, incluyendo información sobre las condiciones generales al momento de la recolección, las determinaciones a realizar, los datos meteorológicos y la información sobre el responsable del muestreo y el traslado.

Determinación	Material del recipiente	Preservación	Almacenamiento máximo
Temperatura	Plástico o vidrio	-	Análisis inmediato
pH	Plástico o vidrio	-	Análisis inmediato
Conductividad eléctrica	Plástico o vidrio	Refrigerar 4°C	28 días
Sólidos totales	Plástico o vidrio	Refrigerar 4°C	2-7 días
DBO	Plástico o vidrio	Refrigerar 4°C	6 horas
DQO	Plástico o vidrio	Adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH 2 y refrigerar a 4°C	7 días
Oxígeno disuelto	Vidrio	Adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH 2 y refrigerar a 4°C	8 horas
Fósforo reactivo	Plástico o vidrio	Adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH 2 y refrigerar a 4°C	28 días
Nitrógeno total	Plástico o vidrio	Adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH 2 y refrigerar a 4°C	7 días
Nitratos	Plástico	Congelar -20°C	48 horas
Nitritos	Plástico	Congelar -20°C	2 días
Fosfatos	Vidrio enjuagado con ácido	Congelar -20°C	48 horas
Amonio	Plástico	Congelar -20°C	7 días
Metales	Plástico enjuagado con ácido	Adicionar H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> hasta pH 2 y refrigerar a 4°C	6 meses
Salinidad	Vidrio	-	Análisis inmediato
Microorganismos	Plástico o vidrio	Refrigerar 4°C	24 horas

Tabla 9.8 – Recomendaciones para la preservación y almacenamiento de muestras líquidas, (adaptada de APHA 1992 y Delgadillo et al. 2010)

- *Análisis que deben realizarse*

Las determinaciones que se recomiendan para el sistema propuesto se resumen en la Tabla 9.9, donde se incluyen también la frecuencia de muestreo, los puntos de los que se deben recolectar, el tipo de muestra y el laboratorio en el que se deben realizar. Los análisis físicos, químicos, fisicoquímicos y microbiológicos que se recomiendan permiten comprobar la eficiencia del tratamiento, detectar problemas en el funcionamiento y verificar el cumplimiento de los niveles requeridos para la reutilización.

Muestreo	Puntos	Tipo de muestra	Laboratorio	Parámetros
<b>Mensual</b>	1 y 6	Puntual	Externo	Caudal, sólidos totales, pH, conductividad eléctrica, temperatura, DBO, DQO, fósforo reactivo, nitrógeno total, nitratos, nitritos, amonio, coliformes totales, coliformes fecales, bacterias mesófilas aerobias, nemátodos
<b>Estacional</b>	Todos	Compuesta	Planta depuradora (†)	Caudal, sólidos totales, pH, conductividad eléctrica, temperatura, razón de adsorción de sodio, DBO, DQO, oxígeno disuelto, fósforo reactivo, nitrógeno total, nitratos, nitritos, sulfatos, cloruros, amonio, coliformes totales, coliformes fecales, bacterias mesófilas aerobias, nemátodos

Tabla 9.9 – Análisis recomendados para el sistema de tratamiento. (†) Siempre que se disponga del equipamiento necesario para su determinación

# 10. Evaluación del proyecto



## 10.1. Generalidades

El diseño propuesto para el tratamiento de los lixiviados podría ser presentado a modo de proyecto a consideración de la empresa para la que se propone la solución. Podrían definirse tres etapas a partir del diseño: la construcción, la operación y el cierre del sistema de tratamiento. En este capítulo estas etapas son analizadas someramente, tratando de identificar los riesgos que podrían presentarse durante la ejecución del proyecto y el impacto ambiental que podrían tener las actividades previstas. Asimismo, se realiza un cálculo económico aproximado para poder verificar la conveniencia de esta alternativa de tratamiento en comparación a la actual. La Figura 10.1 resume la metodología y el alcance de la evaluación realizada.

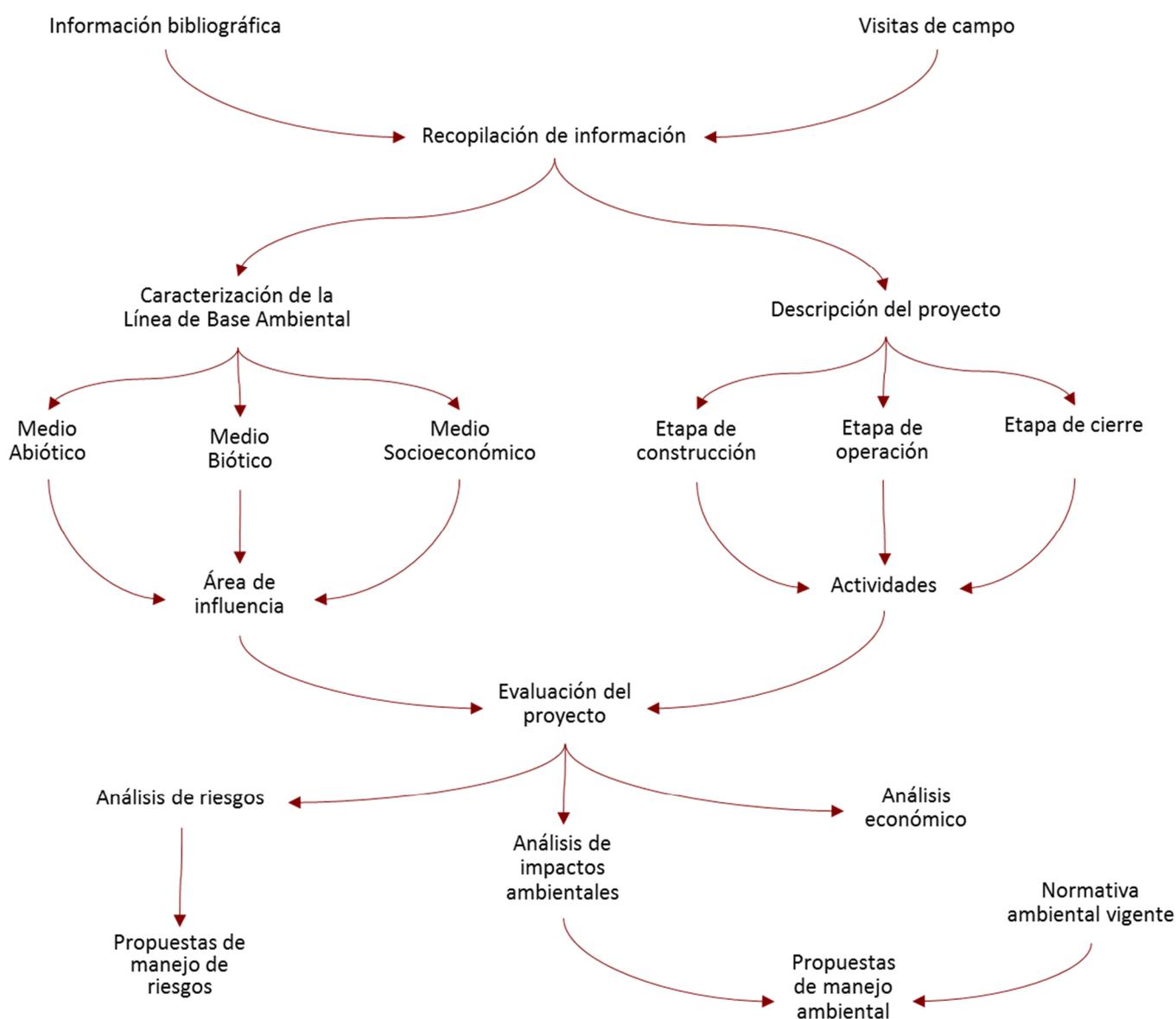


Figura 10.1 – Metodología utilizada para la evaluación del proyecto

## 10.2. Marco legal

El marco legal está conformado por el conjunto de leyes, tratados, normas, decretos y ordenanzas relacionadas con la política ambiental, a las que debe ajustarse el diseño propuesto en sus diversas etapas. La normativa ambiental incluye ordenanzas propias de la ciudad de S. C. de Bariloche, leyes particulares de la Provincia de Río Negro, leyes nacionales y tratados internacionales ratificados por la República Argentina, que aplican directa o indirectamente en el proyecto que se propone, de acuerdo a las actividades que se realizarían y a los impactos previstos que éstas podrían producir.

### 10.2.1. Marco Internacional

- *Conferencia sobre el Medio Ambiente de Río de Janeiro (1992)*: Establece la AGENDA 21, un programa de acción basado en el desarrollo sustentable para solucionar problemas ambientales. “Los seres humanos constituyen el centro de las preocupaciones relacionadas con el desarrollo sostenible. Tienen derecho a una vida saludable y productiva en armonía con la naturaleza”. En su sección II, la AGENDA 21 da prioridad a la conservación y gestión de los recursos para el desarrollo, como la protección de la atmósfera, el enfoque integrado de la planificación y la ordenación de los recursos de tierras, la lucha contra la deforestación, la conservación de la biodiversidad, la ordenación de ecosistemas frágiles, la protección de la calidad y suministro de los recursos de agua dulce y la gestión ecológicamente racional de los residuos sólidos y cuestiones relacionadas con las aguas cloacales.
- *Objetivos de Desarrollo del Milenio (2000)*: Son ocho objetivos de desarrollo que 189 países de las Naciones Unidas acordaron conseguir para el 2015. En su Objetivo 7, se ha propuesto garantizar la sostenibilidad del medio ambiente, incorporando los principios de desarrollo sostenible en las políticas y los programas nacionales. Para evaluar los resultados se han definido algunos indicadores como la proporción de tierras cubiertas por bosques, la proporción de poblaciones de peces que están dentro de unos límites biológicos seguros, entre otros.
- *Convenio sobre la diversidad biológica (2010)*: Ratificado mediante la Ley Nacional 24.375, cuyos objetivos son la conservación de la biodiversidad y la protección de los ecosistemas.

### 10.2.2. Marco Nacional

- *Constitución Nacional*: El Artículo 41 de la reforma de 1994 reconoce el derecho de todo habitante de la Nación a un ambiente sano, equilibrado y apto para el desarrollo humano
- *Ley Nacional 25.675 – Ley General del Ambiente (2002)*: Establece los presupuestos mínimos para lograr una gestión sustentable y adecuada del ambiente, preservar y proteger la diversidad biológica e implementar políticas de desarrollo sostenible. Establece los objetivos de la política ambiental nacional (congruencia, preservación, conservación, recuperación y mejoramiento de los recursos ambientales, progresividad, equidad intergeneracional, responsabilidad, subsidiariedad, cooperación)
- *Ley Nacional 25.688 – Régimen de gestión ambiental de aguas*: Establece los presupuestos mínimos ambientales para la preservación de las aguas, su aprovechamiento y uso racional (captación, desviación, estancamiento, profundización, contaminación)
- *Ley Nacional 25.831 – Régimen de Libre Acceso a la información pública ambiental*: Establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para garantizar el derecho de acceso a la información ambiental que se encuentre en poder del Estado, tanto en el ámbito nacional como provincial y municipal, como así también de entes autárquicos y empresas prestadoras de servicios públicos, sean públicas, privadas o mixtas.
- *Ley Nacional 26.331 – Protección ambiental de los Bosques Nativos*: Establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para el enriquecimiento, la restauración, conservación, aprovechamiento y manejo sostenible de los bosques nativos, y de los servicios ambientales que éstos brindan a la sociedad. Asimismo, establece un régimen de fomento y criterios para la distribución de fondos por estos servicios ambientales. Se busca promover la conservación mediante el ordenamiento territorial de los bosques nativos y la regulación de la expansión de la frontera agropecuaria y de cualquier otro cambio de uso del suelo.
- *Ley Nacional 24.557 – Riesgos del trabajo*: Establece las normas para la prevención de accidentes laborales y enfermedades profesionales, como así también la reparación de los daños derivados del trabajo. Tiene como objetivos la reducción de la siniestralidad laboral, la rehabilitación,

recalificación y recolocación de los trabajadores damnificados, y la promoción de la negociación colectiva laboral para la mejora de las medidas de prevención y de las prestaciones reparadoras.

- *Código Civil de la República Argentina:*

*Artículo 1.113* - La obligación del que ha causado un daño se extiende a los daños que causen los que están bajo su dependencia, o por las cosas de que se sirve, o que tiene a su cuidado. En los supuestos de daños causados con las cosas, el dueño o guardián, para eximirse de responsabilidad, deberá demostrar que de su parte no hubo culpa; pero si el daño hubiere sido causado por el riesgo o vicio de la cosa, sólo se eximirá total o parcialmente de responsabilidad acreditando la culpa de la víctima o de un tercero por quien no debe responder. Si la cosa hubiese sido usada contra voluntad expresa o presunta del dueño o guardián, no será responsable.

*Artículo 2.499* - Habrá turbación de la posesión, cuando por una obra nueva que se comenzara a hacer en inmuebles que no fuesen del poseedor, sean de la clase que fueren, la posesión de éste sufriende un menoscabo que cediese en beneficio del que ejecuta la obra nueva. Quien teme de que un edificio o de otra cosa derive un daño a sus bienes, puede denunciar ese hecho al juez a fin de que se adopten las oportunas medidas cautelares.

*Artículo 2.618* - Las molestias que ocasionen el humo, calor, olores, luminosidad, ruidos, vibraciones o daños similares por el ejercicio de actividades en inmuebles vecinos, no deben exceder la normal tolerancia teniendo en cuenta las condiciones del lugar y aunque mediare autorización administrativa para aquéllas. Según las circunstancias del caso, los jueces pueden disponer la indemnización de los daños o la cesación de tales molestias. En la aplicación de esta disposición el juez debe contemporizar las exigencias de la producción y el respeto al uso regular de la propiedad; asimismo tendrá en cuenta la prioridad en el uso.

- *Resolución 016/94 Administración de Parques Nacionales – Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental:* Define los lineamientos para regular los estudios e Informes Ambientales que se requieren para la ejecución de proyectos públicos y privados a llevar a cabo en las áreas sujetas al régimen de la Ley 22.351, o que se encuentren administradas por la Administración de Parques Nacionales, y que permita garantizar la existencia a perpetuidad del recurso. El objetivo de estos estudios es brindar un instrumento para: (i) una adecuada evaluación de la

factibilidad y conveniencia de ejecutar las obras o actividades que se propongan, (ii) minimizar los impactos ambientales negativos consecuentes de las obras que se realicen o de las actividades y servicios que se presten en las áreas protegidas y (iii) prevenir los impactos ambientales negativos que puedan producir los proyectos a realizar por la propia APN o que requieran su autorización

### 10.2.3. Marco Provincial

- *Ley Provincial 3.266 – Evaluación de Impacto Ambiental:* Tiene por objeto regular el procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental como instituto necesario para la conservación del ambiente en todo el territorio de la provincia a los fines de resguardar los recursos naturales dentro de un esquema de desarrollo sustentable, remarcando la equidad intergeneracional, la protección de los ecosistemas y sus elementos integrantes, el ordenamiento normativo provincial y municipal en sus actos administrativos de acuerdo a un criterio ambiental, con un enfoque científico inter y multidisciplinario.
- *Ley Provincial 2.600 – Preservación del Patrimonio y los Recursos Genéticos:* Se reconoce como dominio público de la Provincia de Río Negro el patrimonio los recursos genéticos, acuáticos, terrestres y aéreos originados en territorio rionegrino. Dictando la reglamentación necesaria para su registración y administración sustentable.
- *Ley Provincial 2.626 – Concertación de un Pacto Ambiental Patagónico:* Se declara de interés provincial la concertación de un Pacto Ambiental Patagónico, a efectos de discutir temas como: la unificación de las legislaciones vinculadas al medio ambiente en cuanto tengan homogeneidad, el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, el incremento de las partidas presupuestarias provinciales destinadas al mejoramiento y preservación del medio ambiente, entre otras.
- *Ley Provincial 2.631 – Adhesión a los Principios del Desarrollo Sustentable:* La Provincia de Río Negro adhiere, adopta y declara de interés social y económico a los principios de desarrollo sustentable como modo de generación de riqueza, distribución equitativa de la misma y protección del medio ambiente y como vehículo del bienestar general de la sociedad.

- *Ley Provincial 2.952 – Aprobación del Código de Aguas:* En el Libro Tercero “Régimen de Protección y Conservación de los Recursos Hídricos” se establecen las bases del compromiso provincial para mejorar, conservar y recuperar la calidad de los recursos hídricos, conocer la capacidad de sustentabilidad de los mismos en relación con las acciones generadas por las actividades industriales e implementar medidas preventivas y correctivas. Asimismo decreta que todo establecimiento industrial radicado o a radicarse en el territorio provincial debe adecuar sus desagües a las disposiciones del Código, a fin de obtener la autorización correspondiente de la autoridad de aplicación (DPA).
- *Ley Provincial 3.250 – Gestión de los residuos especiales:* tiene por objeto regular todas las etapas de gestión de los residuos especiales, tendiendo a la prevención a través de la minimización de la cantidad y de la peligrosidad de los residuos generados. Define los registros de generadores, transportistas y plantas de tratamiento y disposición final, como así también la autoridad de aplicación competente.

#### 10.2.4. Marco Municipal

- *Carta orgánica de San Carlos de Bariloche*

En su Artículo 14, la carta orgánica de la municipalidad de S. C. de Bariloche establece como derecho el acceso “a la salud, al trabajo, a la educación, a la cultura, a la promoción social, al ambiente sano, al desarrollo sustentable, a la convivencia pacífica, a la práctica deportiva y a la recreación”, en tanto que en su Artículo 20 define como uno de los deberes de los habitantes: “Preservar el ambiente, evitar su contaminación, participar en la defensa ecológica de la ciudad y reparar los daños causados”

Como función del municipio se expresa en el Artículo 29.23: “Asegurar el derecho de los habitantes a disfrutar de un ambiente adecuado, manteniendo y protegiendo el sistema ecológico, penalizando su desequilibrio y exigiendo prioritariamente la obligación de recomponer”

En su Capítulo II, en relación al Ambiente propiamente dicho, se manifiesta en el Artículo 177 que “La Municipalidad adhiere a la Ley General del Ambiente y en particular a los siguientes principios expresados en ella: Principio de Congruencia, de Prevención, de Equidad Intergeneracional, de Progresividad, de Responsabilidad, de Subsidiariedad, de Sustentabilidad, de Solidaridad y de

Cooperación”. Por otro lado, en el Artículo 180 se definen como funciones municipales en relación al ambiente:

1. *Asegurar la calidad del aire, agua, suelo y subsuelo en su territorio*
2. *Preservar la flora y la fauna autóctonas, la biodiversidad, los ecosistemas naturales y el suelo orgánico*
3. *Asegurar que el desarrollo productivo sea compatible con la calidad ambiental*
4. *Promover el uso de tecnologías no contaminantes y alentar tecnologías alternativas que prioricen el uso racional y eficiente de la energía y de los recursos naturales*
5. *Regular los usos del suelo, la localización de las actividades y las condiciones de habitabilidad sin riesgo para el ambiente y las personas en el espacio público y privado*
6. *Promover la educación ambiental*
7. *Establecer programas y políticas de gestión ambiental*
8. *Preservar y restaurar el patrimonio natural, paisajístico, urbanístico, arquitectónico y la calidad visual y sonora*
9. *Proteger los bosques nativos y permanentes a fin de preservar su calidad de protectores*
10. *Proteger e incrementar los espacios públicos de acceso libre y gratuito, espacios verdes, áreas protegidas, intangibles e inalienables y reservas naturales, preservando su diversidad biológica*
11. *Reducir progresivamente volúmenes y peligrosidad en la generación, transporte y tratamiento de todo tipo de residuos y promover la clasificación y recuperación de los mismos*
12. *Minimizar la contaminación atmosférica producida por el transporte, promoviendo el uso de energías alternativas*
13. *Concurrir con otros organismos en defensa y protección del ambiente*
14. *Promover acciones públicas y privadas tendientes a la recuperación ecológica de áreas degradadas ambientalmente*
15. *Fomentar la forestación con especies autóctonas*

Finalmente, en el Artículo 181, Políticas generales de ambiente, se expresa *“La obligatoriedad de los estudios de impacto ambiental de emprendimientos públicos o privados y su discusión en audiencia pública, según lo regule la normativa específica”*

- *Ordenanza Municipal 217-C-87 – Impacto Ambiental:* Establece la política de evaluación del impacto ambiental de los proyectos que supongan la realización de obras o actividades susceptibles de afectar la vida y la salud humana, o la conservación y desarrollo de los recursos naturales en el ámbito del ejido municipal de la ciudad. Establece los lineamientos de las evaluaciones de impacto ambiental de los proyectos que se desarrollen en el ejido municipal.
- *Ordenanza Municipal 1660-CM-06 – Cesión de parcela para planta de compostado:* Autoriza al Poder Ejecutivo Municipal a ceder en comodato al Departamento Provincial de Aguas la parcela 19-2-M-M10-10B para la implantación de la Planta de Compostado de Lodos Cloacales de San Carlos de Bariloche. Además establece que la Dirección de Medio Ambiente deberá formular un informe anual sobre el estado medioambiental del área cedida.

### 10.3. Diagnóstico ambiental

#### 10.3.1. Determinación del área de influencia

Se considera como área de influencia a la zona en donde se manifiestan los posibles impactos, tanto positivos como negativos, producto del desarrollo del proyecto. Se establece en base a aspectos biofísicos y socioeconómicos que pueden ser afectados por las actividades de las diferentes etapas consideradas. Se distingue entre área de influencia directa (AID) y área de influencia indirecta (AII). La primera se define como el espacio que será ocupado de forma permanente o temporal durante la fase de construcción y de operación de toda la infraestructura necesaria, así como todos los espacios ocupados por las facilidades anexas. En este caso, se puede considerar como AID al sector del lote total ocupado por el sistema de tratamiento (Figura 10.2). El área de influencia indirecta se define como el espacio físico en el que un componente ambiental afectado directamente, afecta a su vez a otros componentes ambientales no relacionados con el proyecto. En este caso, teniendo en cuenta la escala del proyecto, la naturaleza de las actividades previstas en las diversas etapas, la cercanía de lotes vecinos, la dirección predominante de los vientos, la pendiente del terreno y la presencia de cursos de agua temporales, se ha seleccionado un AII de 100m (Figura 10.3). Se ha elegido este valor también por experiencia propia, siendo aproximadamente la distancia a la que comienzan a notarse los impactos de la actividad actual de compostaje de lodos (olores, ruidos, tránsito de vehículos, entre otros).

### 10.3.2. Determinación del área de sensibilidad

Dentro del área de influencia (detallada en la Figura 10.4), los diversos componentes ambientales tienen diferentes grados de vulnerabilidad, en función de las características propias del ambiente y de las actividades definidas en el proyecto. Los componentes analizados son: físico (aire, suelo, agua), biótico (flora y fauna) y socio-económico, y se les asigna sensibilidad alta (grandes cambios), media (cambios moderados) y baja (pocos cambios) (Tabla 10.1)

Componente	Subcomponente	Sensibilidad	Justificación
ABIÓTICOS	Aire	Media	- Emisión de material particulado y generación de ruidos (etapa de construcción) - Olores en caso de mal funcionamiento
	Suelos	Alta	- Movimiento de suelos - Establecimiento de infraestructura permanente - Cambios en la composición en el sector irrigado
	Agua	Media	- Cambios en la escorrentía superficial - Cambios en la infiltración en el sector ocupado por el sistema - Contaminación de las aguas superficiales y subterráneas en caso de mal funcionamiento
BIÓTICOS	Flora	Media	- Remoción de la vegetación para obra (etapa de construcción) - Forestación con especies exóticas en sector irrigado - Mejoramiento de las condiciones para el establecimiento de otras especies en el sector irrigado
	Fauna	Media	- Se trata de una zona ya intervenida, es habitual el uso de maquinaria y el tránsito de personas en el sitio - Atracción de animales por la presencia de los humedales, del estanque de almacenamiento y por cambios en la vegetación
SOCIO-ECONÓMICOS	Sociales	Alta	- Contratación de mano de obra para obra (etapa de construcción) - Contratación de gestores y mano de obra para la restauración del área (etapa de cierre) - Ya no se requiere de los servicios del camión cisterna
	Económicos	Media	- Cambios en el valor de la propiedad - Cambios en los bienes y servicios ecosistémicos

Tabla 10.1 – Sensibilidad de los diversos componentes del ambiente considerados

### 10.3.3. Línea de base ambiental

Definiendo una línea de base ambiental se busca establecer las características actuales del ambiente biofísico y socio-económico para luego identificar y evaluar correctamente los impactos esperados. Se ha utilizado información bibliográfica, cartografía temática y visitas al área de sensibilidad para definir este estado de situación. Además se ha utilizado información obtenida previamente para el Informe de Factibilidad Ambiental de la planta de compostaje de biosólidos.



Figura 10.2 – Área de influencia directa del proyecto



Figura 10.3 – Área de influencia indirecta del proyecto



Figura 10.4 – Detalle del área de influencia del proyecto propuesto, elaborado a partir de imagen satelital de Google Earth y el esquema de la Figura 9.7. Se observa el área ya intervenida por el proceso de compostaje de lodos cloacales

- *Medio abiótico*

- *Geología y geomorfología:* Según SEGEMAR (2005), el área de influencia se encuentra sobre la Formación Ñirihuau. El sustrato está constituido por sedimentitas clásticas con participación piroclástica y carbonática. El sitio se encuentra cerca de la morena Nahuel Huapi correspondiente a la máxima expansión glaciario, encontrándose restos en el predio. En el sector se encuentran también sedimentos glacialacustres y acumulaciones glacialfluviales.
- *Suelos:* Predominan los suelos desarrollados a partir de cenizas volcánicas y sedimentos glaciarios (suelos de ambiente erosivo-deposicional glaciario). El perfil característico presenta un horizonte mineral A de color pardo oscuro, rico en materia orgánica; un horizonte B cámbico de color pardo amarillento de textura media; un horizonte mineral C muy semejante al material parental, de color pardo amarillento claro, apoyado sobre sedimentos glaciarios, glacialfluviales y/o rocas sedimentarias. Son suelos de buena permeabilidad, buen drenaje, baja densidad aparente ( $< 0,90 \text{ g/cm}^3$ ) y valores de pH en NaF entre 9-10 (lo que indica presencia de material alofánico)
- *Clima:* La caracterización climática puede hacerse utilizando la información de dos de las estaciones más cercanas al sitio, teniendo en cuenta que podría haber diferencias debido a la topografía y la altitud del sitio. Los datos de las Tablas 10.2, 10.3 y 10.4 fueron tomados del sitio del Sistema de Información Patagonia Norte dependiente del INTA<sup>1</sup>. Reúne datos de la EEA INTA Bariloche y del Aeropuerto Internacional Bariloche Teniente Luis Candelaria del periodo 1982-2004. Según datos del DPA para el periodo 1999-2011 los vientos predominantes de la región son en dirección NO casi todo el año, cambiando a SO en los meses de invierno.
- *Hidrología:* El sitio se encuentra ubicado en la cuenca hidrográfica del Arroyo Ñireco. El área cuenta con una red de drenaje conformada principalmente por arroyos no permanentes con una vía de drenaje ubicada en el sector occidental (en el Cañadón de los Loros, Figura 10.5). La presencia de sedimentos gruesos, porosos y en general permeables favorece la infiltración profunda. Se estima que la capa freática se encontraría en profundidad en la zona de la planta de compostaje, aunque se acercaría

---

<sup>1</sup> [www.sipan.inta.gob.ar](http://www.sipan.inta.gob.ar)

a la superficie hacia el Norte, en donde existe una zona mallinosa (fuera del área de influencia)

- o *Relieve*: El sitio se encuentra sobre la ladera inferior Noreste del Cerro Carbón, con una altitud promedio de 925 msnm (Figura 10.6). Las pendientes son suaves (5-15%) con dirección predominante Sur-Norte (SEGEMAR, 2005). Inmediatamente al Norte de las plateas de compostaje hay un importante desnivel topográfico, estabilizado en un sector con gaviones.

	Precipitaciones	Evaporación-tanque	Evapotranspiración	Días con heladas	Días con precipitaciones
	mm	mm	mm	d	d
Enero	15,9	206	143,9	4,3	3,5
Febrero	19,3	148	115	1,2	3,7
Marzo	37,5	119	92,4	4,2	6
Abril	59,3	70,9	59,3	8	8
Mayo	138,7	54,9	39,2	10,2	12,4
Junio	169,7	34,9	24,3	14,5	12,4
Julio	120	36,3	25,9	18,2	11,3
Agosto	97,6	48,7	37,7	16,5	11,7
Septiembre	62,8	66,9	48,3	13,1	8,8
Octubre	52,9	120	64,2	8,7	7,6
Noviembre	28,2	149	96,4	5,4	3,9
Diciembre	24,6	185	129,5	2,2	3,4
Año	826,5	1.239	876	113,1	92,7

Tabla 10.2 – Resumen de datos meteorológicos de S. C. de Bariloche (1982-2004) (de [www.sipan.inta.gob.ar](http://www.sipan.inta.gob.ar))

	Temperatura media	Promedio temperatura máxima	Promedio temperatura mínima	Temperatura máxima absoluta	Temperatura mínima absoluta
	°C	°C	°C	°C	°C
Enero	13,9	20,4	7,8	31,5	-1,2
Febrero	14	19,8	7,7	32,5	-4,5
Marzo	12	18	5,9	29,5	-6,2
Abril	8,8	14,1	3,7	23	-8,8
Mayo	6,2	10,3	2,1	19,5	-10
Junio	3,9	6,9	-0,4	15,5	-14
Julio	3,1	7,4	-1,2	15,5	-15,5
Agosto	4,1	8,6	-0,4	19	-14
Septiembre	5,8	10,5	0,5	19	-10,3
Octubre	8	13	2,3	28	-7,8
Noviembre	10,1	15,7	4	28	-6,5
Diciembre	12,5	19	6,9	32,5	-4,8
Año	8,5	13,6	3,2	32,5	-15,5

Tabla 10.3 – Resumen de datos meteorológicos de S. C. de Bariloche (1982-2004) (de [www.sipan.inta.gob.ar](http://www.sipan.inta.gob.ar))

	Humedad relativa	Humedad relativa máxima	Humedad relativa mínima	Heliofanía efectiva	Radiación solar	Viento
	%	%	%	h	kJ/m <sup>2</sup> /d	km/h
Enero	66	79	56	10,63	27.556	11,5
Febrero	66	77	56	9,9	23.683	10,1
Marzo	70	82	61	7,54	16.726	10,1
Abril	73	87	65	5,76	11.814	10,2
Mayo	77	88	65	3,74	7.663	10
Junio	79	87	72	2,82	5.154	9,6
Julio	77	89	68	3,92	5.991	9,4
Agosto	76	88	69	4,96	10.042	10,2
Septiembre	71	81	60	6,72	16.105	10
Octubre	71	81	62	7,83	20.243	10,9
Noviembre	68	79	61	9,88	25.219	11,1
Diciembre	68	79	59	10,78	27.418	11
Año	72	83	63			10,3

Tabla 10.4 – Resumen de datos meteorológicos de S. C. de Bariloche (1982-2004), excepto Radiación Solar (7 años) (de [www.sipan.inta.gov.ar](http://www.sipan.inta.gov.ar))

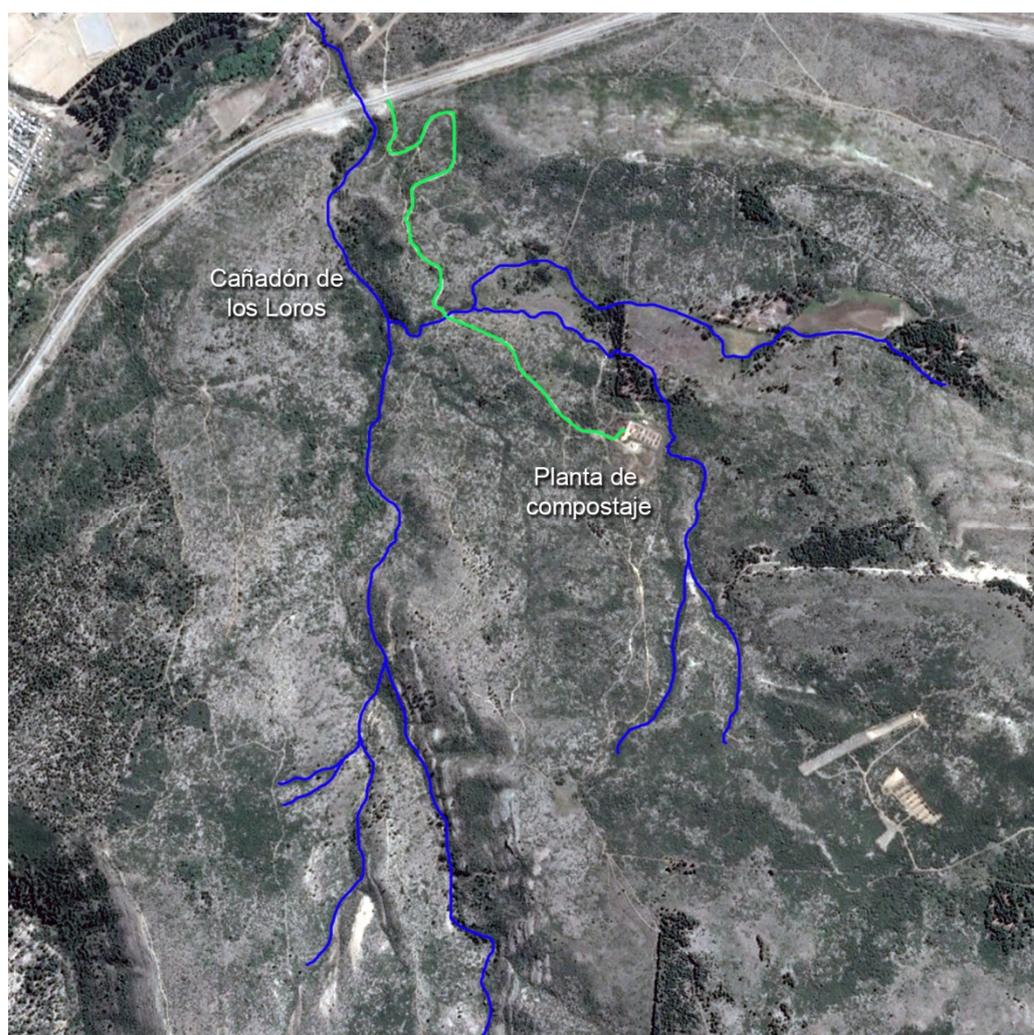


Figura 10.5 – Red de drenaje del área (azul) y camino de acceso a la Planta de Compostaje (verde), elaboración propia en base a información obtenida de SEGEMAR (2009)

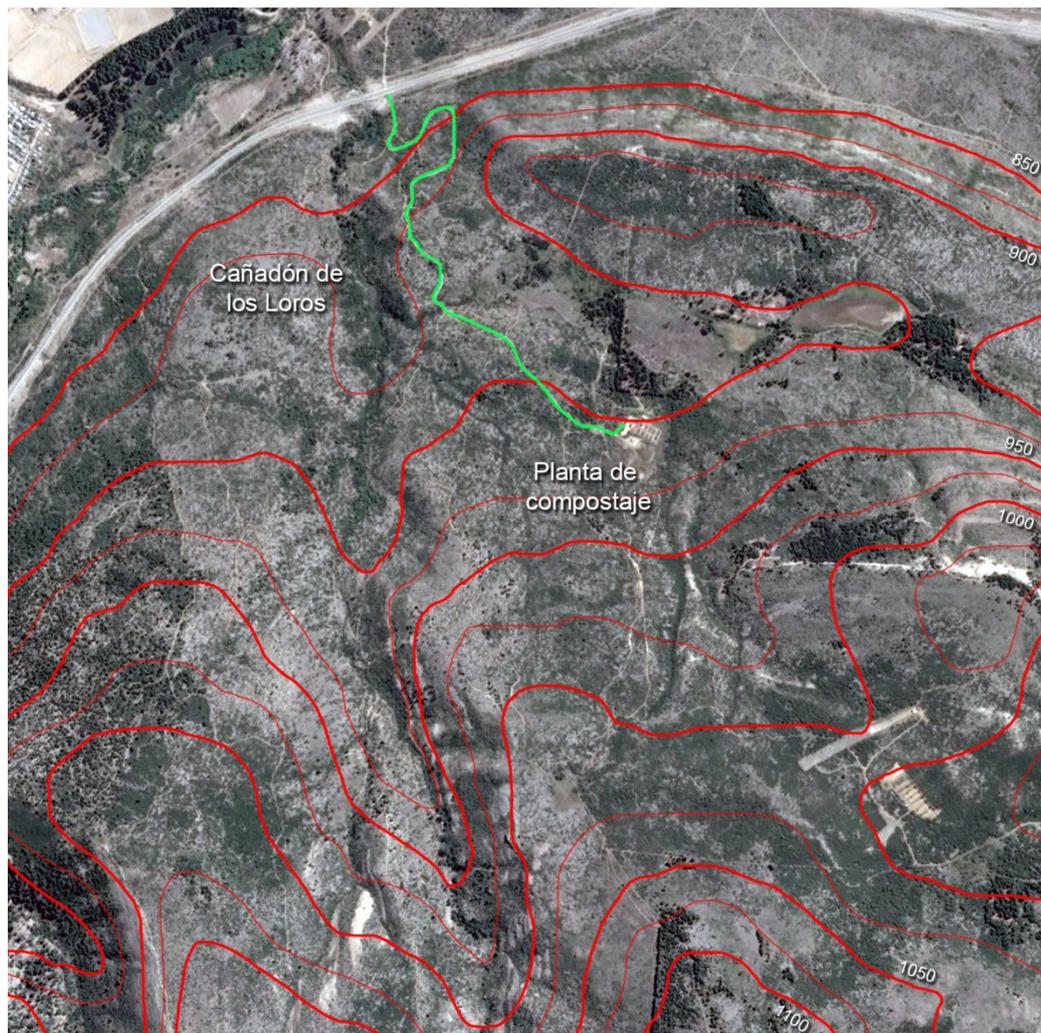


Figura 10.6 – Líneas de nivel topográfico del área (rojo) y camino de acceso a la Planta de Compostaje (verde), elaboración propia en base a información obtenida de SEGEMAR (2009)

- *Medio biótico*
  - *Flora*: La vegetación característica es la de un matorral mixto dominado por ñire (*Nothofagus antarctica*), acompañado de arbustos altos como retamo (*Diostea juncea*), maitén (*Maytenus boaria*), espino negro (*Colletia spinosissima*), laura (*Schinus patagonicus*), radal (*Lomatia hirsuta*) y chacay (*Discaria trinervis*). También hay sectores con arbustos de menor tamaño como neneo (*Mulinum spinosum*) y *Acaena splendens*, seguido por un estrato herbáceo. El sitio no está muy afectado por la presencia de exóticas, excepto algunas plantaciones cercanas de pino (*Pinus ponderosa*).
  - *Fauna*: El sector se encuentra en una zona ecotonal entre bosque y estepa, con proximidad de algunos arroyos y mallines, por lo que la fauna de vertebrados es relativamente rica y abundante. El compostaje de lodos, por otro lado, tiene asociado una trama trófica de invertebrados bastante extensa y de varios niveles, que atraen a

vertebrados. Entre las especies de aves insectívoras, por ejemplo, se encuentran *Cinclodes patagonicus*, *Xolmis pyrope*, *Turdus falklandi*, *Curaeus curaeus*, *Sturnella loyca*, *Tachycineta leucopyga*, *Notiochelidon cyanoleuca*, *Vanellus chilensis* y *Theristicus caudatus*. También puede haber presencia de aves oportunistas, como *Polyborus chimango*, *Polyborus plancus*, *Larus dominicanus* y *Coragyps atratus*. También es posible encontrar algunos mamíferos pequeños como *Chaetophractus villosus*, *Conepatus humboldti* y *Lepus europaeus*.

- *Medio socioeconómico*
  - *Vecinos*: el lote en el que se encuentra la planta de compostaje limita con otros cinco lotes (Figura 10.7), de los cuales dos poseen un sector dentro del área de influencia definida para el proyecto. Actualmente, según información de la empresa, la única situación conflictiva se originó por la servidumbre de paso desde la Ruta de Circunvalación al lote de la planta. El vecino en cuestión demanda seguridad y forestación, para lo cual se está construyendo una garita para controlar el acceso y se están analizando opciones para forestar.
  - *Actividad económica*: si bien el predio es de la Provincia de Río Negro, específicamente del Departamento Provincial de Aguas (DPA) y el servicio de depuración de aguas residuales está concesionado a la Cooperativa Eléctrica Bariloche (CEB), el proceso de compostaje de lodos está tercerizado a un privado. Un empleado se encarga del transporte de lixiviados y reparto del compost producido, mientras que otras dos personas operan la maquinaria necesaria para el proceso. El compost se comercializa a granel por pedido (información suministrada por personal de la planta).

## 10.4. Etapas del proyecto

Para el desarrollo del proyecto se prevén tres etapas (construcción, operación y cierre), cada una con diferentes actividades.

*10.4.1. Etapa de construcción*: la construcción y el ensamblado del sistema de tratamiento pueden ser llevados a cabo por personal de la CEB con experiencia en redes cloacales. Puede requerirse la

contratación de mano de obra externa para las tareas de limpieza del terreno, colocación de plantas y soldadura de geomembrana. Las actividades previstas son:

- A. *Desbroce y limpieza*: eliminación de la vegetación que se encuentre ocupando el sitio de construcción, tanto donde se emplazarán las obras como los sitios destinados a las tareas de construcción. La vegetación retirada será utilizada en el proceso de compostaje.

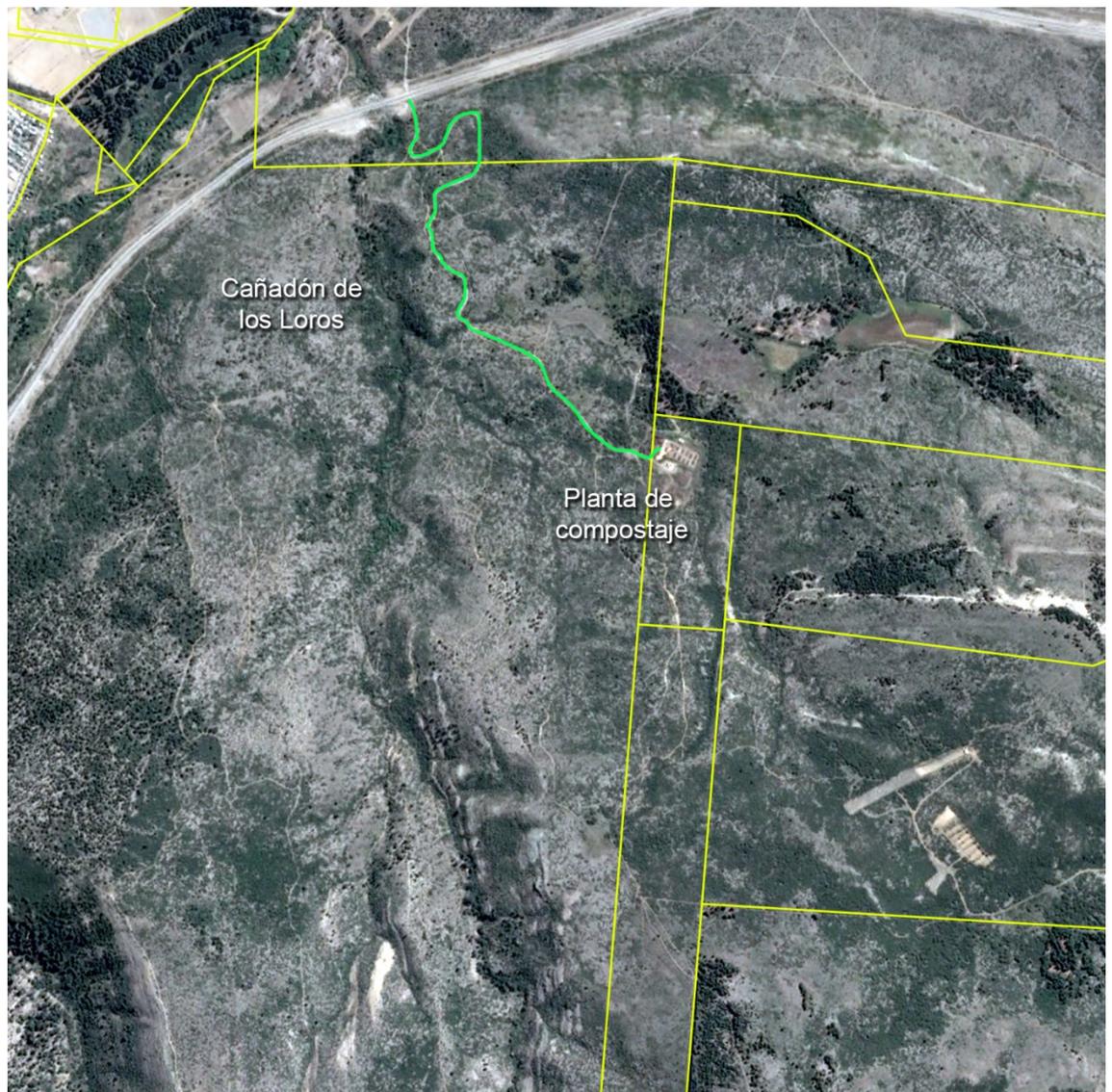


Figura 10.7 – Catastro municipal (amarillo) y camino de acceso a la Planta de Compostaje (verde)

- B. *Tránsito de maquinaria pesada*: uso de camiones y una pala mecánica para el movimiento de suelos y el llenado de los humedales con el sustrato. Se deben utilizar los caminos ya disponibles dentro del predio, que se consideran adecuados para las maniobras previstas.

- C. *Transporte de materiales*: consiste en el transporte del material de relleno de los humedales, de la geomembrana, del sistema de drenaje (tubos de PVC), de las plantas que serán utilizadas y de las herramientas necesarias.
- D. *Movimiento de suelos*: excavación de la fosa para los humedales y el estanque, acomodamiento de pendientes de acuerdo al diseño y compactación de las bases. Se prevé el movimiento de aproximadamente 1200 m<sup>3</sup> de suelo.
- E. *Colocación de geomembranas*: en los humedales y el estanque.
- F. *Colocación del sustrato*: en los humedales, en sectores con grava gruesa y otros con grava fina, de acuerdo al diseño propuesto.
- G. *Construcción de cámaras de salida*: cámara impermeable para contener la salida y regular la altura del nivel de líquido en los humedales, según el diseño.
- H. *Armado del sistema de drenaje y aplicación*: sistema de tuberías para el movimiento de los lixiviados dentro del sistema de tratamiento y para la aplicación distribuida en los humedales.
- I. *Plantación de Vetiver*: colocación de las plantas en los humedales.
- J. *Plantación de especies arbóreas*: colocación de los ejemplares de álamo criollo (*Populus nigra cv "Itálica"*) que serán regados con los lixiviados tratados.

10.4.2. *Etapa de operación*: la operación del sistema de tratamiento no requiere de dedicación exclusiva ni mano de obra especializada, por lo que inicialmente podría ser llevada a cabo por personal ya disponible en planta. Se podría contratar mano de obra externa para tareas de mantenimiento del predio y servicios de monitoreo ambiental. Las actividades se clasifican en:

- K. *Captación de lixiviados*: recolección de los lixiviados generados sobre las plateas de compostaje, mediante canaletas y tuberías ya disponibles.
- L. *Tratamiento de lixiviados en Humedal 1*: reducción de la carga contaminante de los lixiviados en el Humedal 1.
- M. *Tratamiento de lixiviados en Humedal 2*: reducción de la carga contaminante de los lixiviados en el Humedal 2.
- N. *Almacenamiento de lixiviados en tanques*: en meses de máxima generación, almacenamiento de 112 m<sup>3</sup> de lixiviados para tratarlos durante los meses de menor generación. Estos tanques son parte de la infraestructura disponible actualmente.

- O. *Almacenamiento de lixiviados tratados en estanque*: reserva de lixiviados tratados para ser utilizados para riego en los meses de déficit hídrico.
- P. *Riego con lixiviados tratados*: uso de los lixiviados tratados para riego de ejemplares de *Populus nigra*.
- Q. *Mantenimiento y limpieza del sistema de tratamiento*: eventualmente reemplazo del sustrato saturado, reemplazo de la vegetación muerta, desobstrucción del sistema de drenaje, remoción de los sólidos sedimentados en el estanque.
- R. *Mantenimiento y limpieza del sector*: mantenimiento de la vegetación lindera al sistema de tratamiento.

10.4.3. *Etapa de cierre*: para la etapa de cierre se recomienda la contratación de servicios ambientales que evalúen la situación en ese momento, a fin de ejecutar correctamente las tareas de limpieza, restauración y monitoreo del área. Se proponen las siguientes actividades:

- S. *Remoción de infraestructuras*: remoción completa del sistema de tratamiento, con excepción de las plantas regadas con lixiviados tratados.
- T. *Limpieza del sector*: remoción de todo el material retirado y disposición según lo designe la Subsecretaría de Medio Ambiente de la Municipalidad de S. C. de Bariloche.
- U. *Restauración del área*: relleno de las fosas con material original, restauración ecológica del sitio y restablecimiento del drenaje natural.
- V. *Vigilancia y monitoreo*: se debe llevar a cabo un programa de monitoreo y vigilancia de la etapa de cierre del proyecto durante el tiempo que se considere necesario en función de la normativa vigente en ese momento y a lo dispuesto por la autoridad de aplicación competente. Debería servir para controlar, verificar y reajustar las medidas tomadas para la restauración del área.

## 10.5. Análisis de riesgos

El análisis de riesgos tiene por objeto identificar los principales riesgos que podrían estar presentes durante el desarrollo del proyecto, cada cual con diferente grado de severidad y frecuencia. Para este análisis los riesgos se han clasificado en naturales y antrópicos. Con respecto a los primeros,

el control de los riesgos excede al proyecto por su magnitud, aunque se puede estar preparado ante su eventual ocurrencia. Incluyen los incendios forestales, sismos, explosiones volcánicas, derrumbes y zoonosis. Los riesgos antrópicos son aquellos que se originan por las actividades que realizan las personas y pueden originar tanto daños a la salud como a la infraestructura. A diferencia de los naturales, éstos pueden ser prevenidos, controlados y corregidos. Incluyen los incendios, derrames y accidentes personales de todo tipo, pero también la oposición de los vecinos a la ejecución del proyecto.

#### 10.5.1. Riesgos naturales

- *Incendios forestales*: debido a la alta carga de fuego estacional de alta inflamabilidad, a la topografía irregular y a la escasez de agua; y teniendo en cuenta los episodios recientes de incendios forestales, se considera que existe un Riesgo Alto de incendios forestales.
- *Sismos*: según Defensa Civil, la ciudad de Bariloche se encuentra en una zona de Riesgo Moderado, con episodios de baja a moderada intensidad, poco frecuentes y con baja capacidad destructiva.
- *Erupciones volcánicas*: debido a la frecuencia de ocurrencia de los eventos volcánicos y el efecto que pueden llegar a tener en el sitio, se considera una zona de Riesgo Bajo. En las últimas dos erupciones, en el 2011 del Volcán Puyehue-Cordón Caulle y en el 2015 del Volcán Calbuco, se acumularon pocos centímetros de ceniza en el sitio, ocasionando problemas menores.
- *Derrumbes*: considerando las pendientes pronunciadas que se encuentran en algunos sectores y que pueden afectar a la infraestructura, se considera que existe un Riesgo Moderado.
- *Zoonosis*: al tratarse de una zona agreste con zonas de pastizales, el principal riesgo de zoonosis es el contagio de Hantavirus transmitido por roedores infectados: ratón colilargo (*Oligoryzomys longicaudatus*), ratón pelilargo (*Abrothrix longipilis*) y la rata de agua (*Rattus norvegicus*). El virus produce la enfermedad conocida como Síndrome Pulmonar de Hantavirus (SPH). Según el Ministerio de Salud de la Nación, la región de S. C. de Bariloche posee un Riesgo Alto aunque con bajas infecciones informadas (menos de veinte entre 1989 y 2005).

#### 10.5.2. Riesgos antrópicos

- *Incendios*: se considera que el riesgo de incendios de origen antrópico es Moderado, pudiendo ocurrir en casos de descuido, mal funcionamiento de la maquinaria o por focos intencionales.

- *Derrames*: los derrames producidos por descuidos, accidentes o falta de mantenimiento (tales como derrames de combustibles, aceites, pinturas, plaguicidas, fertilizantes, productos de limpieza, entre otros) como así también derrames del líquido en tratamiento, que puedan contaminar o afectar la salud o la integridad de las estructuras, se consideran de Riesgo Bajo.
- *Accidentes personales*: durante las diferentes etapas del proyecto se debería hacer énfasis en la prevención de riesgos de trabajo, con el fin de evitar accidentes laborales que puedan comprometer la salud de los trabajadores y la integridad de las estructuras. Sin embargo, siempre hay factores imponderables, por lo que se asume un Riesgo Moderado.
- *Oposición de los vecinos*: se considera un Riesgo Bajo puesto que el sitio ya se encuentra intervenido por actividades semejantes. Además hay pocos vecinos y dispersos, y el proyecto podría mejorar las condiciones del sitio en general.

### 10.5.3. Evaluación de riesgos

En base a la intensidad de los efectos y a la probabilidad de ocurrencia, los riesgos se han clasificado en (Tabla 10.5):

Riesgos	Probabilidad de ocurrencia		
<b>Naturales</b>	Incendios forestales	Alto	Red
	Sismos	Moderado	Orange
	Erupciones volcánicas	Bajo	Yellow
	Derrumbes	Moderado	Orange
	Zoonosis	Alto	Red
<b>Antrópicos</b>	Incendios	Moderado	Orange
	Derrames	Bajo	Yellow
	Accidentes personales	Moderado	Orange
	Oposición de los vecinos	Bajo	Yellow

Tabla 10.5 – Probabilidad de ocurrencia de riesgos estimada para el proyecto

A continuación se detallan las medidas a adoptar en cada etapa del proyecto para minimizar los riesgos y mitigar los daños que estos podrían provocar si ocurriesen. Básicamente consisten en una serie de medidas estructurales y no estructurales, cuyo objetivo es brindar un espacio más seguro y una respuesta más eficiente durante cualquier eventualidad (Tabla 10.6):

Riesgos	Medidas recomendadas	
Naturales	Incendios forestales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantener la limpieza del predio</li> <li>- Alerta temprana al SPLIF en caso de incendio</li> <li>- Evitar quemas de residuos</li> <li>- Disponer de matafuegos en las maquinarias utilizadas y revisar su vencimiento con frecuencia</li> <li>- Disponer de tanques con agua</li> </ul>
	Sismos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacitar al personal contratado para responder eficientemente ante un sismo</li> <li>- Verificar la integridad estructural luego de un evento</li> </ul>
	Erupciones volcánicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacitar al personal contratado para responder eficientemente ante una erupción volcánica</li> <li>- Mantener limpio el sistema de drenaje y captación de lixiviados para evitar obstrucciones por ceniza</li> </ul>
	Derrumbes	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evitar la acumulación de material no consolidado</li> <li>- Estabilizar taludes con gaviones o vegetación</li> <li>- Mantener la cobertura vegetal</li> </ul>
	Zoonosis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar desratizaciones periódicas</li> <li>- Mantener la limpieza del predio</li> <li>- Capacitar al personal contratado para evitar la exposición de las heces y orina de los roedores</li> </ul>
Antrópicos	Incendios	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacitar al personal contratado para responder eficientemente ante incendios</li> <li>- Manipular correctamente el combustible utilizado</li> <li>- Evitar quemas de residuos</li> <li>- Alerta temprana al SPLIF en caso de incendio</li> <li>- Disponer de matafuegos en las maquinarias utilizadas y revisar su vencimiento con frecuencia</li> <li>- Disponer de tanques con agua</li> </ul>
	Derrames	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantener limpio el sistema de drenaje y captación de lixiviados para evitar desbordes</li> <li>- Manipular correctamente el combustible utilizado en las maquinarias</li> <li>- Proteger el suelo de cualquier sitio de almacenamiento de productos químicos</li> <li>- Operar correctamente el sistema de tratamiento</li> </ul>
	Accidentes personales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adoptar todas las medidas de protección y reducción de riesgos, en función de la actividad que se esté desarrollando y en concordancia con la Ley Nacional de Riesgos de Trabajo Nº24.557/95 y su Decreto Reglamentario 351/79</li> <li>- Disponer de elementos de protección personal para cada actividad particular</li> <li>- Capacitar al personal contratado para responder eficientemente ante los accidentes personales</li> <li>- Disponer de Seguros Personales para todos los empleados</li> </ul>
	Oposición de los vecinos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar audiencias públicas</li> <li>- Brindar información que los vecinos o la comunidad requieran</li> <li>- Mantener el respeto con los vecinos</li> </ul>

Tabla 10.6 – Propuestas de manejo de riesgos del proyecto

## 10.6. Impacto ambiental

La identificación y la evaluación de impactos ambientales es una herramienta que permite predecir los potenciales impactos que podrían provocar las diferentes actividades del proyecto sobre los factores ambientales que conforman el área de influencia sobre la que se desarrolla. Los resultados obtenidos permiten estructurar planes y programas de manejo ambiental para optimizar, prevenir y mitigar las diversas situaciones que podrían presentarse durante la ejecución del proyecto.

### 10.6.1. Identificación de los impactos ambientales

En base a las características ambientales se han definido una serie de factores de cada componente ambiental (Tabla 10.7). Sobre estos factores se evalúan los potenciales impactos de cada actividad, tanto de forma cualitativa (positivos o negativos) como cuantitativa.

La identificación de los posibles impactos se presenta en la matriz de identificación (Tabla 10.10), en donde se clasifican en impactos positivos o negativos, según si se prevén consecuencias beneficiosas o adversas, respectivamente.

Componente	Subcomponente	Factor ambiental	Definición
Abiótico	Aire	1. Calidad del aire	Presencia en el aire de agentes contaminantes que afectan su calidad, como gases, vapores o material particulado
		2. Nivel sonoro	Incremento de los niveles de ruido
	Suelo	3. Calidad del suelo	Alteración de las características edafológicas de los suelos originales
		4. Erosión	Aumento de los procesos erosivos, tanto por acción del agua como del viento
	Agua	5. Calidad de aguas superficiales	Alteración de las características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas superficiales
		6. Suministro de aguas superficiales	Modificaciones en las cantidades disponibles de agua superficial
		7. Calidad de aguas subterráneas	Alteración de las características fisicoquímicas y microbiológicas de las aguas subterráneas
		8. Suministro de aguas subterráneas	Modificaciones en las cantidades disponibles de agua subterránea
	Paisaje	9. Calidad del paisaje	Alteración del paisaje natural
	Biótico	Flora	10. Cobertura vegetal
11. Biodiversidad de la flora			Disminución de la cantidad de especies diferentes de plantas nativas, ya sea por remoción, plagas introducidas, o por competencia de especies exóticas

	Fauna	12. Biodiversidad de la fauna	Disminución de la cantidad de especies diferentes de animales nativos, por afectación de su hábitat (eliminación de guaridas y sitios de nidificación, aumento del ruido y presencia humana, caza, disminución del alimento disponible) o por competencia de especies exóticas
		13. Bienestar	Modificaciones de la calidad de vida de los vecinos, definida como el nivel de satisfacción percibido (contento-descontento)
Socio-económico	Social	14. Salud	Modificaciones de la salud pública de los vecinos y de los trabajadores que desempeñen tareas en las diferentes etapas del proyecto
		15. Seguridad	Modificaciones de los niveles de seguridad de los vecinos y de los trabajadores que desempeñen tareas en las diferentes etapas del proyecto
		16. Empleo	Contratación de mano de obra y servicios, de forma temporal o permanente
	Económico	17. Valor del sitio	Modificaciones en el valor económico del sitio
		18. Bienes y servicios ecosistémicos	Modificaciones en la capacidad del ecosistema de proveer bienes y servicios

Tabla 10.7 – Factores ambientales identificados

### 10.6.2. Evaluación de impacto ambiental

La valoración de los impactos ambientales (VIA), entendida como la medición de los efectos en su importancia y magnitud, es útil para cuantificar el impacto de cada actividad sobre cada factor ambiental, lo que permite compararlos y jerarquizarlos. De esta manera, se puede dirigir la atención hacia aquellas actividades que produzcan los mayores impactos y hacia los factores ambientales más susceptibles de ser afectados. Existen diversos métodos para realizar este análisis cuantitativo y seleccionar el más adecuado depende del tipo de ambiente, del tamaño del proyecto, de los recursos disponibles, de la disponibilidad de información, de la experiencia técnica y de las exigencias legales.

Para este caso se ha optado por el método de los Criterios Relevantes Integrados (CRI) propuesto por Buroz (1994), y que se basa en un análisis multicriterio según diferentes aspectos que se consideran destacados, asignándoles coeficientes para ponderar el efecto de cada uno en el valor final del impacto. Típicamente se expresa según la intensidad (I), la extensión (E), la duración (D), la reversibilidad (R) y la probabilidad (P), y los pesos (W) respectivos:

$$VIA = I \times W_I + E \times W_E + D \times W_D + R \times W_R + P \times W_P \quad [10.1]$$

- *Intensidad (I)*: se refiere al grado con el que un impacto altera a un determinado elemento del ambiente y la facilidad con la que los cambios se producen, está estrechamente relacionada con la fragilidad y la sensibilidad de dicho elemento.
- *Extensión (E)*: es el espacio en el que se presenta el impacto en relación al área de influencia indirecta del proyecto.
- *Duración (D)*: se refiere al tiempo que permanecería el efecto del impacto desde su aparición en el ambiente.
- *Reversibilidad (R)*: se define como la capacidad del sistema de retornar a una situación de equilibrio similar o equivalente a la inicial.
- *Probabilidad (P)*: es la posibilidad real o potencial de que se produzca el impacto.

Los criterios de valoración para los parámetros considerados y los pesos asignados a cada uno son los siguientes (Tabla 10.8):

Valor	Intensidad	Extensión	Duración	Reversibilidad	Probabilidad
10	Muy alta	Generalizada > 75% All	Larga > 10 años	Irreversible	Muy alta > 75%
7	Alta	Extensiva 35-75% All	Larga 5-10 años	Parcialmente irreversible	Alta 50-75%
5	Media	Local 10-35% All	Media 2-5 años	Reversible a largo plazo	Media 10-50%
2	Baja	Puntual < 10% All	Corta < 2 años	Reversible a corto plazo	Baja < 10%
<b>Peso</b>	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2

Tabla 10.8 – Valores asignados a los parámetros del método CRI

El método requiere la conformación de un grupo de trabajo compuesto por especialistas de diferentes áreas con el fin de lograr una visión global e interdisciplinaria. En este caso se ha optado por consultas a profesionales, visitas al sitio, comparaciones con otros proyectos y suposiciones basadas en aspectos teóricos, debido a que no se pudo disponer de los recursos humanos y económicos, a menudo considerables, que se destinan habitualmente a las evaluaciones formales de impacto ambiental. De este modo, utilizando los valores de la Tabla 10.8, se han elaborado las matrices de intensidad (Tabla 10.11), de extensión (Tabla 10.12), de duración (Tabla 10.13), de reversibilidad (Tabla 10.14) y de

probabilidad (Tabla 10.15). Finalmente, usando la Ecuación [10.1] se ha elaborado la matriz de valor de impacto ambiental (Tabla 10.16), en la que los impactos se han clasificado según el siguiente criterio:

Tipo de impacto	Categoría	Descripción	VIA	Color
Positivo	Beneficioso	Cambios positivos para el ambiente, mejorando la calidad, resolviendo algún problema, conservando las condiciones originales, mitigando algún efecto, restaurando o rehabilitando	1-10	
Negativo	No significativo	Impactos intrascendentes que pueden corregirse plenamente, reversibles, breves y puntuales	1-3	
	Significativo	Impactos a tener en cuenta, factibles de corrección, de extensión local y de mediano plazo	3-7	
	Altamente significativo	Impactos considerables, de elevada incidencia, difíciles de corregir, de extensión generalizada, irreversibles y de largo plazo o permanentes	7-10	

Tabla 10.9 - Criterio de clasificación de los impactos ambientales















Para el proyecto propuesto se han contabilizado 69 impactos positivos y 127 impactos negativos, de los cuales 13 serían no significativos (10,2%), 96 serían significativos (75,6%) y 18 serían altamente significativos (14,2%).

Como se observa en la Figura 10.8, la mayoría de los factores ambientales considerados se verían afectados en la etapa de construcción y en menor medida durante la de operación. En cuanto a las actividades de cada etapa, como se ve en la Figura 10.9, nuevamente la etapa de construcción generaría el mayor impacto. En las etapas de operación y de cierre sólo algunas de las actividades podrían generar un impacto importante, como la captación de lixiviados y el almacenamiento en los tanques, la remoción de la infraestructura y la limpieza del sitio previo a la restauración.

Con el propósito de reducir los impactos generados en las diferentes etapas del proyecto se proponen una serie de medidas de prevención, corrección y compensación, de acuerdo a la trascendencia y la incidencia de cada impacto. Estas medidas se aplican según correspondan en las diferentes fases del proyecto (Tabla 10.17):

- *Medidas preventivas:* evitan la aparición del impacto modificando la actividad (tecnología, diseño, insumos, localización).
- *Medidas correctoras:* se enfocan sobre los impactos recuperables y están dirigidas a anular, atenuar, corregir o modificar las acciones sobre procesos constructivos, condiciones de funcionamiento, factores del medio, entre otros.
- *Medidas compensatorias:* se aplican sobre impactos irrecuperables o inevitables, buscando compensar de alguna manera la modificación del factor ambiental.

Las propuestas de manejo ambiental tienen por objeto establecer un conjunto de buenas prácticas y procedimientos a tener en cuenta durante la ejecución del proyecto, con el fin de minimizar los impactos que las diferentes actividades puedan provocar y brindarle al responsable del proyecto alternativas para ajustarlo a la normativa ambiental vigente. Asimismo es recomendable llevar a cabo medidas de monitoreo ambiental y seguimiento del proceso para garantizar la minimización del impacto producido.

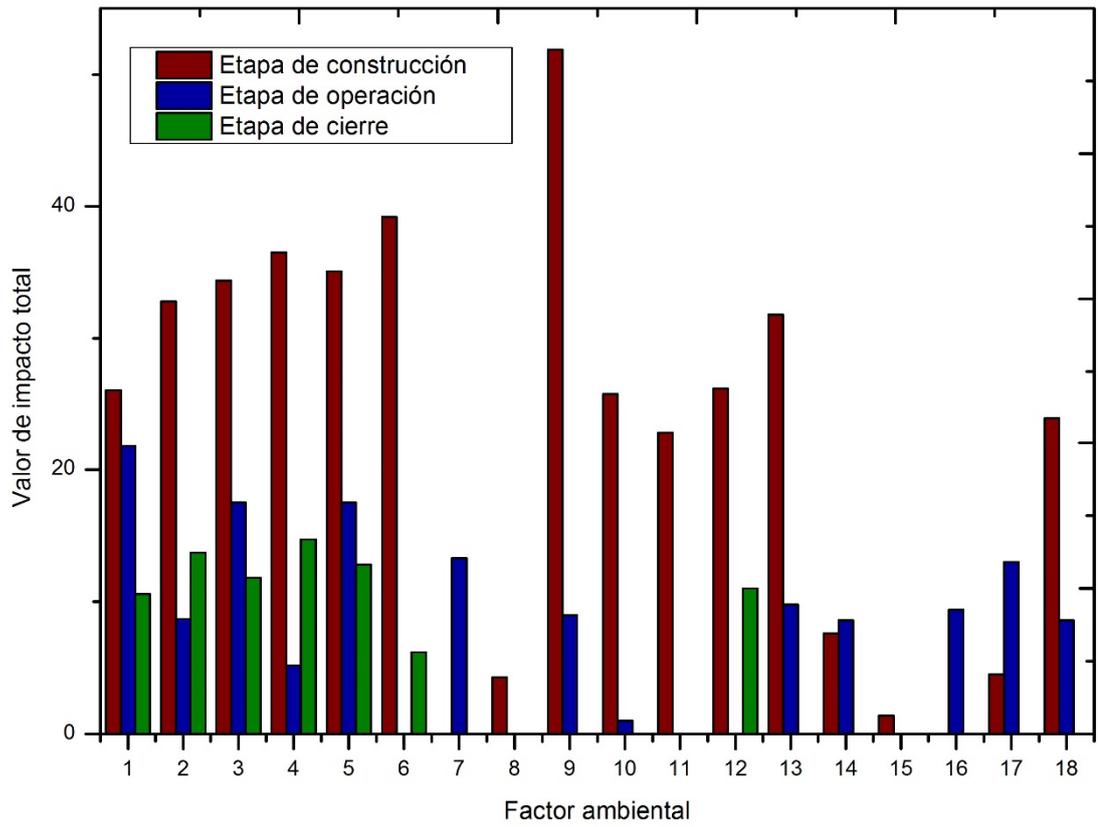


Figura 10.8 – Valor de impacto total sobre cada factor ambiental

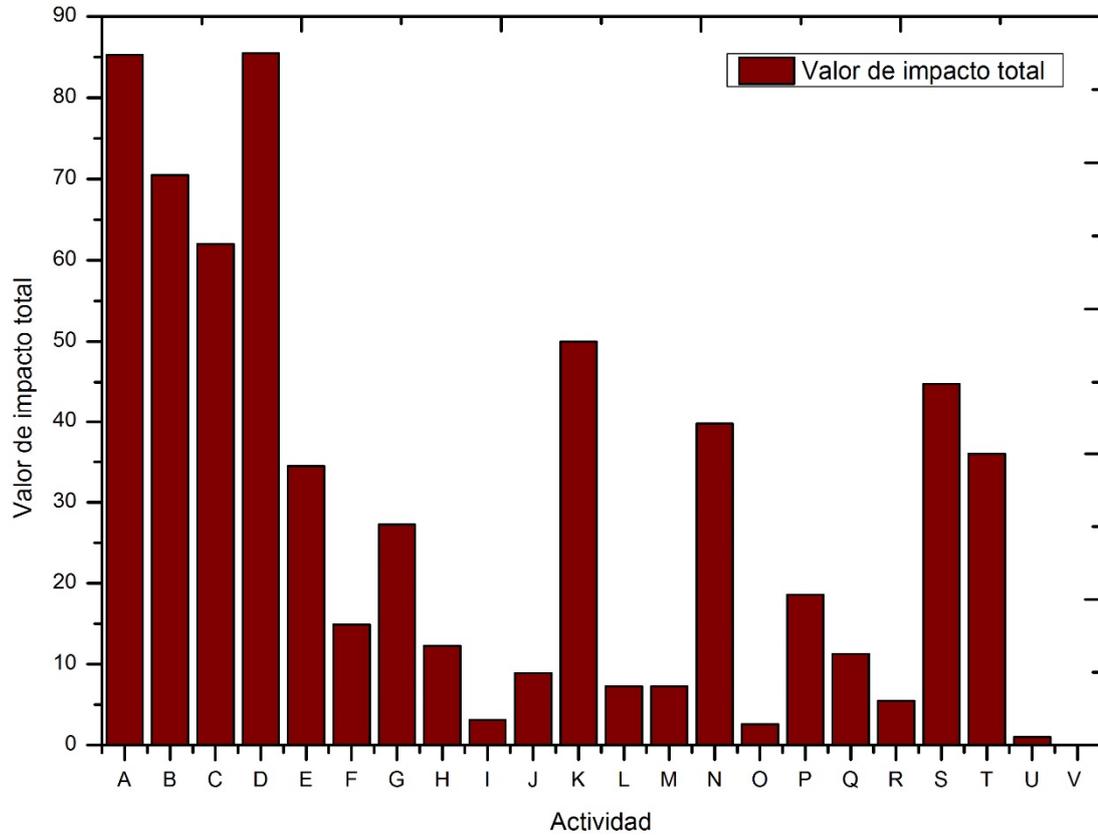


Figura 10.9 – Valor de impacto total de cada actividad

Medidas	Objetivo	Actividades
Para preservar la calidad del aire	Reducir las emisiones producidas por maquinarias	- Realizar la revisión técnica de la maquinaria utilizada
	Reducir las emisiones de material particulado	- Transportar material cubierto - Al remover cobertura vegetal y/o el suelo, mantenerlo humedecido, principalmente en verano - Evitar quemas de residuos
	Reducir los olores	- Evitar obstrucciones del sistema de drenaje y captación de lixiviados - Capacitar al personal contratado para operar correctamente el sistema de tratamiento de lixiviados - Evitar quemas de residuos
	Reducir la contaminación sonora por ruidos y vibraciones	- Realizar la revisión técnica de la maquinaria utilizada - Restringir las actividades que puedan ocasionar ruidos molestos en la franja horaria de 08:00 a 18:00 de lunes a viernes - Cumplir con los límites de velocidad para los vehículos utilizados
Para preservar la calidad del suelo	Reducir la contaminación del suelo	- Evitar desbordes de lixiviados por obstrucción del sistema de drenaje o captación - Revisar la impermeabilidad del sistema de tratamiento y de los tanques de almacenamiento - Controlar la infiltración de lixiviados, evitando descargar volúmenes excesivos - Realizar análisis de suelo frecuentemente, particularmente en los sectores donde podrían ocurrir desbordes, pérdidas, lixiviación o infiltración
	Reducir la erosión	- Proteger los sitios desprovistos de vegetación hasta tanto sean ocupados por estructuras o revegetados nuevamente - Estabilizar los taludes con gaviones o vegetación - Reducir la velocidad de las escorrentías producto del riego con lixiviados o de las precipitaciones - Restringir el uso de maquinaria a sectores establecidos para tal fin
Para preservar la calidad del agua	Reducir la contaminación del agua superficial	- Evitar desbordes de lixiviados por obstrucción del sistema de drenaje o captación - Evitar la acumulación de residuos - Realizar análisis de agua frecuentemente, particularmente en los sectores donde podrían ocurrir desbordes, pérdidas, lixiviación o infiltración
	Reducir la contaminación del agua subterránea	- Evitar desbordes de lixiviados por obstrucción del sistema de drenaje o captación - Revisar la impermeabilidad del sistema de tratamiento y de los tanques de almacenamiento - Controlar la infiltración de lixiviados, evitando descargar volúmenes excesivos

Para la protección de la flora	Preservar la cobertura vegetal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restablecer la cobertura vegetal una vez finalizadas las tareas de construcción</li> <li>- Evitar lugares desprovistos de vegetación</li> </ul>
	Proteger la biodiversidad de la flora	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evitar la propagación de los álamos hacia el sector ocupado con matorral nativo</li> <li>- Evitar el uso de especies nativas o exóticas invasoras o que puedan atraer vectores de enfermedades</li> </ul>
Para la protección de la fauna	Proteger la biodiversidad de la fauna	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Limitar las actividades a los sectores destinados, evitando interferir con el hábitat de los animales en otros sitios</li> <li>- Evitar la intensificación de ruidos, manteniendo periódicamente el buen funcionamiento de las maquinarias</li> <li>- Evitar ruidos en épocas de reproducción o nidificación, o en cualquier otro periodo de mayor vulnerabilidad de las especies autóctonas</li> <li>- Tomar las medidas necesarias para la proliferación de plagas</li> <li>- Mantener la cobertura vegetal</li> </ul>
Para mejorar la percepción de los vecinos	Reducir el descontento con el proyecto	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evitar la contaminación del medio abiótico y biótico propiedad de los vecinos</li> <li>- Evitar ruidos molestos durante los horarios mencionados</li> <li>- Garantizar el respeto a los vecinos</li> <li>- Brindar información requerida</li> <li>- Mantener limpio el sitio y las condiciones de operación del sistema de tratamiento</li> <li>- Mantener el paisaje natural aledaño</li> </ul>
Para garantizar la salud	Reducir los focos de infección	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantener limpio el sitio y las condiciones de operación del sistema de tratamiento</li> <li>- Realizar desratizaciones periódicas</li> </ul>
	Reducir el riesgo de accidentes personales	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Adecuarse a los lineamientos de la política de Riesgo de Trabajo de la Argentina</li> <li>- Utilizar elementos de protección personal</li> </ul>
Para garantizar la eficiencia y periodicidad del mantenimiento	Aumentar la eficiencia y periodicidad de las tareas de mantenimiento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Realizar las tareas de limpieza con la frecuencia requerida según las actividades que se realicen</li> <li>- Revisar el correcto funcionamiento del sistema de tratamiento</li> <li>- Realizar las tareas de mantenimiento periódicamente</li> <li>- Disponer de un registro de las actividades de limpieza y mantenimiento realizadas</li> </ul>
Para el cierre y seguimiento	Abandonar el sitio y realizar una restauración ecológica del mismo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificar todas las maquinarias e infraestructuras a retirar</li> <li>- Garantizar las condiciones de seguridad laboral durante las tareas de remoción</li> <li>- Realizar un relevamiento de la situación inicial que ayudará a establecer los resultados esperados de la restauración</li> <li>- Realizar un seguimiento de la evolución de las tareas de restauración</li> <li>- Realizar un informe final de las condiciones alcanzadas luego de la recuperación</li> </ul>

Tabla 10.17 – Propuestas de manejo ambiental del proyecto

## 10.7. Análisis económico

Una de las razones por las que se busca una alternativa al tratamiento de los lixiviados generados en la planta de compostaje es el elevado costo que significa para la empresa el transporte de esos volúmenes desde el sitio de generación hasta la planta depuradora. Según datos de la empresa, el costo del servicio de transporte en el año 2014 tuvo un valor promedio de \$126 por metro cúbico de lixiviado transportado, lo que implica un gasto anual cercano a los \$190.000 (Figura 10.10).

En la evaluación económica de los proyectos de inversión se busca optimizar la asignación de recursos disponibles mediante la selección de proyectos convenientes, que no sólo son viables técnica y legamente, sino también desde el punto de vista económico (Ross, 2010).

En el caso del sistema de tratamiento propuesto en este trabajo, el presupuesto estimado para la obra se resume en la Tabla 10.18. En el cálculo sólo se ha considerado el costo de los materiales y la mano de obra no especializada. Se ha pedido cotización en corralones de la ciudad de S. C. de Bariloche y en otras empresas del país (con el costo del transporte incluido). Se ha hecho la suposición de que la maquinaria pesada necesaria para la obra se encuentra disponible en la planta de compostaje. Tampoco se han tenido en cuenta gastos administrativos y legales que podrían presentarse en la ejecución del proyecto.

Una vez concretada la obra, los costos asociados al proyecto se deben a la operación del sistema de tratamiento y a las tareas de mantenimiento y monitoreo del proceso. Como se mencionó anteriormente, la operación no requiere dedicación exclusiva e inicialmente puede ser llevada a cabo por personal de la planta, al igual que la recolección y el transporte de las muestras. Éstas pueden ser incorporadas a las determinaciones de rutina que se realizan en la planta depuradora. Las tareas de mantenimiento y los servicios de monitoreo que deben ser realizados por terceros, representan un costo anual aproximado de \$35.000, según cotizaciones solicitadas a empresas e instituciones locales.

Si se compara el presupuesto estimado con el costo actual que tiene el tratamiento de los lixiviados, se puede concluir que el proyecto resulta conveniente desde el punto de vista económico. El tiempo estimado para recuperar la inversión es de poco más de ocho meses si la obra comienza en noviembre (lo que sería recomendable debido al clima favorable y la posibilidad de adaptar las plantas antes de los meses de invierno), teniendo en cuenta que ya no sería necesario transportar los lixiviados a la planta depuradora.

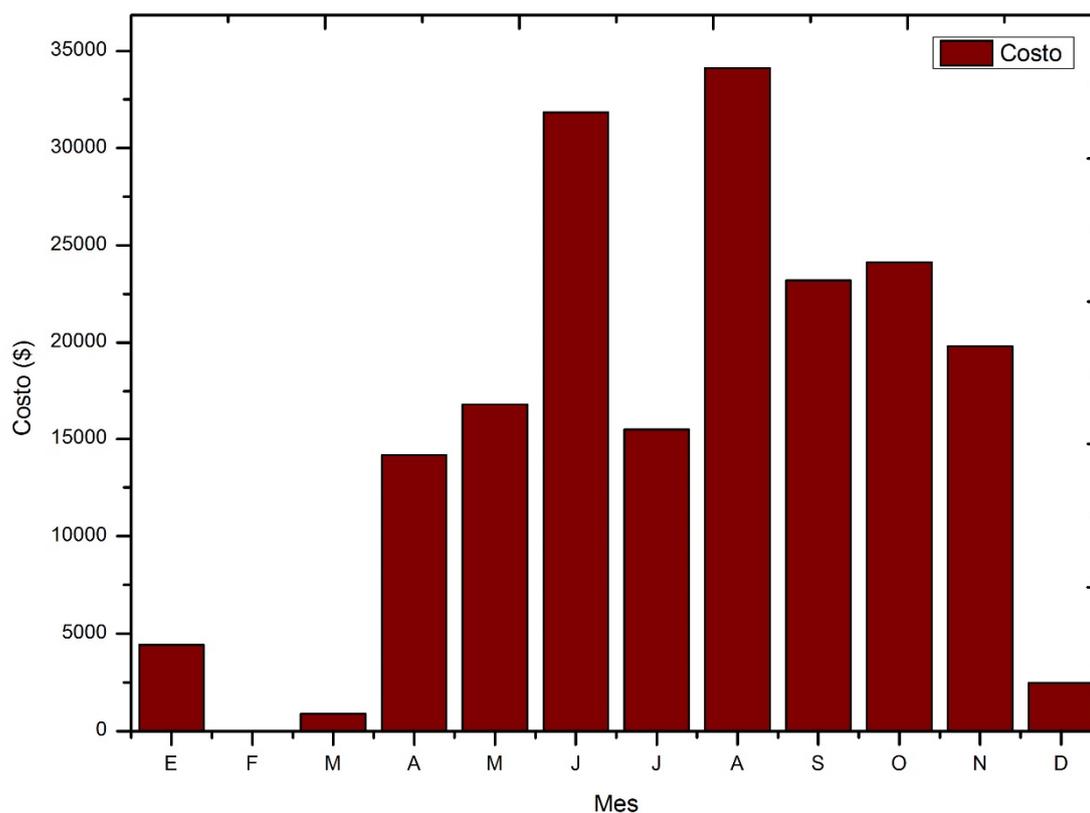


Figura 10.10 – Costo mensual para el transporte de los lixiviados desde el sitio de generación hacia la planta depuradora en el año 2014, según datos de la empresa

	Cantidad	Precio unitario \$ARS	Total \$ARS
Codo PVC 110 90 (MH)	7	52,0	364,0
T PVC 110 90 (HHH)	4	72,7	290,8
Tapa PVC 110 (M)	4	15,5	62,0
Válvula esférica roscada 63 (HH)	5	317	1.585,0
Tubo PVC 110 6m	6	69,7	418,2
Tubo PVC 110 ranurado para drenaje 6m	4	69,7	278,8
Geomembrana 800 micrones 300m2	3	10417,5	31.252,6
Plantines Vetiver	435	50,0	21.750,0
Manguera para riego por goteo 100m 1"	1	390,0	390,0
Gotero de 1,5 L/h	60	3,0	180,0
Tapón para manguera	2	4,5	9,0
T espiga triple PVC 1"	1	4,0	4,0
Cupla de reducción 110/63	5	32,3	161,5
Cupla de reducción 63/25	1	14,0	14,0
Ladrillos 12x18x33	170	10,0	1.700,0
Bolsas de cemento portland 50kg	2	111,1	222,2
Álamo criollo	60	20,0	1.200,0
Horas Hombre	400	100,75	40.300,0
<b>TOTAL</b>			<b>100.182,1</b>

Tabla 10.18 – Presupuesto estimado de la obra, según cotización de materiales y mano de obra en abril 2015. El costo de la Hora Hombre fue estimado para Bariloche, incluyendo las cargas sociales



# 11. Conclusiones



De acuerdo a los datos suministrados por la empresa, la generación de lixiviados en el proceso de compostaje de biosólidos está relacionada con las precipitaciones caídas en el sitio. Las muestras analizadas permiten concluir que las concentraciones de sólidos, materia orgánica, nutrientes y metales pueden variar notablemente y en ocasiones alcanzar valores que exceden los límites permitidos para la descarga directa al ambiente.

No se observaron diferencias estadísticamente significativas en el crecimiento, desarrollo de hojas nuevas y análisis de tejido vegetal en ejemplares de Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) bajo riego con diferentes concentraciones de lixiviados, por lo que se concluye que es una especie tolerante al efluente y es factible su utilización en un sistema de tratamiento por fitorremediación.

A partir de modelos de remoción de contaminantes se diseñó un sistema conformado por dos humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal en serie de acuerdo a las características de los lixiviados, las condiciones ambientales y los parámetros de vuelco requeridos para riego forestal con acceso restringido. El modelo predice que estos niveles serían alcanzados aun en las condiciones más desfavorables para los procesos de remoción.

El proyecto propuesto fue evaluado en términos del impacto ambiental que podrían provocar las actividades previstas, y se identificaron los impactos más significativos que podrían ocurrir. La mayoría de estos impactos se darían en las etapas de construcción del sistema de tratamiento por lo que se recomendaría tomar medidas para su minimización.

El presupuesto estimado para la obra resultó ser aproximadamente la mitad del costo anual que tiene el tratamiento actual de los lixiviados, y debido a que los costos de mantenimiento y operación previstos son mínimos en comparación, el proyecto resulta conveniente desde el punto de vista económico.

Debido a las deficiencias expuestas en el tratamiento actual se destaca la necesidad de plantear otra solución a la problemática de la generación de lixiviados en la planta de compostaje de lodos cloacales. Por lo mencionado anteriormente se concluye que el proyecto representa una opción viable para el tratamiento, siendo una alternativa económicamente conveniente, tecnológicamente posible y ambientalmente aceptable.



## 12. Bibliografía



- APHA American Public Health Association – (1992) – *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* – 18ª Edición, APHA, AWWA, WWCW, Washington, Estados Unidos
- Arvizu J. & R. González – (2005) – *Detección de lixiviados en un Vertedero de Residuos Sólidos Urbanos* – V Congreso Nacional de Aguas Subterráneas – Hermosillo, México
- Ayers R. S. & D. W. Westcot – (1994) – *Water quality for agriculture* – FAO Irrigation and Drainage Paper, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma
- Bitton G. – (2005) – *Wastewater Microbiology* – Tercera Edición, Wiley Series in Ecological and Applied Microbiology, Estados Unidos
- Brix H. – (1994) – *Functions of macrophytes in constructed wetlands* – Water Science and Technology 29(4): 71-78
- Buroz E. – (1994) – *Métodos de evaluación de impactos* – En: FLACAM Foro Latinoamericano de Ciencias Ambientales – *II Curso de Postgrado sobre Evaluación de Impactos Ambientales*, La Plata, Argentina
- Bwire K. M., Njau K. N. & R. J. A. Minja – (2011) – *Use of vetiver grass constructed wetland for treatment of leachate* – Water Science & Technology, 63(5):924-930
- Canet Castelló R. – (2005) – *El compostaje de los residuos orgánicos. Fundamentos teóricos y prácticos* – Departamento de Recursos Naturales, IVIA Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, España
- Chatterjee N., Flury M., Hinman C. & C. G. Cogger – (2013) – *Chemical and Physical Characteristics of Compost Leachates. A Review* – Washington State University
- Christensen T. H. – (1983) – *Leaching from land disposed municipal compost: 2. Nitrogen* – Waste Management & Research, 1:115-125
- Christensen T. H. – (1984) – *Leaching from land disposed municipal compost: 3. Inorganic ions* – Waste Management & Research, 2:63-74
- Christensen T. H. & C. W. Nielsen – (1983) – *Leaching from land disposed municipal compost: 1. Organic matter* – Waste Management & Research, 1:83-94
- Christensen T. H. & J. C. Tjell – (1984) – *Leaching from land disposed municipal compost: 4. Heavy metals* – Waste Management & Research, 2:347-357

- COHIFE Consejo Hídrico Federal – (2003) – *Principios Rectores de la Política Hídrica de la Argentina: Fundamentos del Acuerdo Federal del Agua* – Buenos Aires, Argentina
- Colomer F. J. – (2008) – *Un nuevo método evalúa el riesgo ambiental de las balsas que contienen líquidos contaminantes* – Universidad de Castellón
- Cooper P. F., Job G. D., Green M. B. & R. B. E. Shutes – (1996) – *Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment* – WRc Publications, Medmenham, Reino Unido
- Dahn L. T., Truong P., Mammucari R., Tran T. & N. Foster – (2009) – *Vetiver grass, Vetiveria zizanioides: A choice plant for phytoremediation of heavy metals and organic wastes* – International Journal of Phytoremediation, 11:8, 664-691
- Del Bubba M., Arias C. & H. Brix – (2003) – *Phosphorus adsorption maximum of sands for use as media in subsurface flow constructed reed beds as measured by the Langmuir isotherm* – Water Research 37:3390-3400
- Delgadillo O., Camacho A., Pérez L. F. & M. Andrade – (2010) – *Depuración de aguas residuales por medio de humedales artificiales* – Universidad Mayor de San Simón (Bolivia) y Universidad de Barcelona (España)
- Dhanya G. & D. S. Jaya – (2013) – *Pollutant Removal in Wastewater by Vetiver Grass in Constructed Wetland System* – IJERT International Journal of Engineering Research & Technology, 2:1361-1368
- Falola O. O., Alasa M. C., Amuda A. J. & O. J. Babayemi – (2013) – *Nutritional and Antinutritional Components of Vetiver Grass (Chrysopogon zizanioides L. Roberty) at Different Stages of Growth* – Pakistan Journal of Nutrition 12(11): 957-959
- Fernández P., Sorá G., Alemanni M. E., Tanzer L., Magnin S., Riat M., Laos F., Giovannardi F. & P. Kozakiewicz – (2013) – *Estudio, evaluación y lineamientos generales para la aplicación de las aguas residuales tratadas en San Carlos de Bariloche* – Universidad Nacional de Río Negro, Departamento Provincial de Aguas, Autoridad Interjurisdiccional de las Cuencas de los ríos Limay, Neuquén y Negro, y Municipalidad de San Carlos de Bariloche
- Hengchaovanovich D. – (2000) – *VGT: A Bioengineering and Phytoremediation Option for the New Millenium* – Second International Vetiver Conference, Thailand

- Hopkinson J. – (2002) – *The Potential of Vetiver Grass to Produce Fertile Seeds When Used for Roadside Satbilisation in Cook Shire* – Report to Paul Graham (Main Roads Dept, Cairns) Australia
- INIA Instituto de Investigaciones Agropecuarias – (2006) – *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile* – Revisión 2006, Series Actas INIA N°34, Ministerio de Agricultura, Chile
- INIA Instituto de Investigaciones Agropecuarias – (2007) – *Métodos de análisis de tejidos vegetales* – Segunda Edición, Series Actas INIA N°40, Ministerio de Agricultura, Chile
- Iqbal M. K., Shafiq T. & K. Ahmed – (2010) – *Characterization of bulking agents and its effects on physical properties of compost* – Bioresource Technology 101:1913-1919
- Izquierdo F., Velasco V. & A. Nasif – (2009) – *Montes leñeros y cortinas de reparo en la región sur de Río Negro* – EEA INTA Bariloche, ENTE para el Desarrollo de la Línea y Región Sur de Río Negro, Argentina
- Kadlec R. H. – (2003) – *Effect of pollutant speciation in treatment wetlands design* – Ecological Engineering, 20:1-16
- Kadlec R. H. & S. D. Wallace – (2009) – *Treatment Wetlands* – Segunda Edición, CRC Press/Taylor & Francis Group
- Kantawanichkul S., Sattayapanich S. & F. van Dien – (2013) – *Treatment of domestic wastewater by vertical flow constructed wetland planted with umbrella sedge and Vetiver grass* – Water Science & Technology, 68:1345-1351
- Laos F., Mazzarino M. J., Satti P., Roselli L., Moyano S., Ruival M. & L. Moller Poulsen – (2000) – *Planta de compostaje de biosólidos: investigación y desarrollo en Bariloche, Argentina* – Ingeniería Sanitaria y Ambiental, N°50, pp 86-89
- Lavado, R. – (2012) – *Origen del compost, proceso y compostaje y potencialidad de uso* – En: Mazzarino M. J. & P. Satti (Eds.) – *Compostaje en la Argentina: Experiencias de producción, calidad y uso* – UNRN Universidad Nacional de Río Negro – Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, pp 3-12
- Liao X. – (2000) – *Studies on plant ecology and system mechanisms of constructed wetland for pig farm in South Africa* – South China Agricultural University, Guangzhou, China

- Liehr S. K., Kozub D. D., Rash J. K. & G. M. Sloop – (2000) – *Constructed wetlands treatment for high nitrogen landfill leachate* – Water Environment Research Foundation, Virginia, Estados Unidos
- Lorenzo E. V., Llanes Ocaña J. G., Fernández L. A. & M. B. Venta – (2009) – *Reúso de aguas residuales domésticas para riego. Valoración crítica* – Revista CENIC Ciencias Biológicas, 40,1,p35-44, Cuba
- Mane A. V., Karadge B. A., Suroshi V. N. & J. S. Samant – (2013) – *Changes in inorganic constituents in the leaves of *Vetiveria zizanioides* (L.) Nash under the influence of NaCl salinity* – Octa Journal of Environmental Research 1(4): 336-345
- Mazzarino M. J., Satti P. & L. Roselli – (2012a) – *Indicadores de estabilidad, madurez y calidad del compost* – En: Mazzarino M. J. & P. Satti (Eds.) *Compostaje en la Argentina: Experiencias de producción, calidad y uso* – UNRN Universidad Nacional de Río Negro – Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, pp 13-28
- Mazzarino M. L., Satti P., Laos F., Roselli L., Crego M. P., Kowaljew E., Fernández H. & L. Poulsen – (2012b) – *Compostaje de biosólidos: 12 años de la Planta de Bariloche* - En: Mazzarino M. J. & P. Satti (Eds.) *Compostaje en la Argentina: Experiencias de producción, calidad y uso* – UNRN Universidad Nacional de Río Negro – Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, pp 99-106
- Metcalf & Eddy Inc – (1994) – *Ingeniería Sanitaria: tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales* – Tercera Edición, Editorial Labor SA, Colombia
- Mujeriego R. – (2006) – *La reutilización planificada del agua para regadío: aspectos conceptuales, técnicos, reglamentarios y de gestión* – Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Cataluña
- Nilsson C. & H. Dahlström – (2005) – *Treatment and Disposal Methods for Wastewater Sludge in the Area of Beijing, China* – Lund University, Department of Water and Environmental Engineering
- OMS Organización Mundial de la Salud – (2006) – *Safe use of wastewater, excreta and greywater, Volume II: wastewater use in agriculture* – World Health Organization (WHO), United Nations Environment Programme (UNEP), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Francia

- Peralta E., González R., von Haefen G., Comino A. P., Gayoso G., Vergara S., Genga G. & M. Scagliola – (2012) – *El compostaje aplicado a los barros cloacales primarios de la ciudad de Mar del Plata* – En: Mazzarino M. J. & P. Satti (Eds.) *Compostaje en la Argentina: Experiencias de producción, calidad y uso* – UNRN Universidad Nacional de Río Negro – Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires, pp 107-123
- Reddy K. R. & W. H. Patrick – (1984) – *Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments* – CRC Critical Reviews in Environmental Control, 13:273-309
- Reeds S. C., Middlebrooks J. & R. W. Crites – (2006) – *Natural Wastewater Treatment Systems* – Primera Edición, CRC Press/Taylor & Francis Group
- Ross S. A., Westerfield R. W. & B. D. Jordan – (2010) – *Fundamentos de finanzas corporativas* – Novena Edición, McGraw-Hill, México
- Sas-Nowosielska A., Kucharski R., Malkowski E., Pogrzeba M., Kuperberg J. M. & K. Krynski – (2004) – *Phytoextraction crop disposal – an unsolved problem* – Environmental Pollution, 128: 373-379
- SEGEMAR Servicio Geológico Minero Argentino – (2005) – *Estudio geocientífico aplicado al ordenamiento territorial: San Carlos de Bariloche* – Anales Nº42, Buenos Aires, Argentina
- Seyedbagheri M. – (2010) – *Compost: Production, Quality, and Use in Commercial Agriculture* – University of Idaho Extension, Estados Unidos
- Shamma N. K. & L. K. Wang – (2009) – *Biosolids composting* – En: Wang L. K., Pereira N. C., Shamma N. K. & Y. Hung (Eds.) – *Biological Treatment Processes* – Handbook of Environmental Engineering, Volume 8 – Humana Press, Springer, pp 669-714
- Spellman F. R. – (1997) – *Wastewater Biosolids to Compost* – Technomic Publishing Company, Estados Unidos
- SSSA Soil Science Society of America – (1995) – *Soil Testing and Plant Analysis* – SSSA Book Series 3, Wisconsin, Estados Unidos
- SSSA Soil Science Society of America – (1996) – *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods* – SSSA Book Series 5, Wisconsin, Estados Unidos
- Stegmann R., Heyer K. U. & R. Cossu – (2005) – *Leachate Treatment* – X International Waste Management and Landfill Symposium – Environmental Sanitary Engineering Centre, Italy

- Truong P. & B. Hart – (2001) – *Vetiver System for Wastewater Treatment* – Technical Bulletin 2001/21, Pacific Rim Vetiver Network, Office of the Royal Development Projects Board, Bangkok, Tailandia
- Truong P. & C. Smeal – (2003) – *Research, Development and Implementation of Vetiver System for Wastewater Treatment*. GELITA, Australia. Pacific Rim Vetiver Network Technical Bulletin, 3.
- Truong P., Tan Van T. & E. Pinnars – (2008) – *The Vetiver System for Improving Water Quality* – Primera Edición, TVNI The Vetiver Network International
- Turovskiy I. S. & P. K. Mathai – (2006) – *Wastewater Sludge Processing* – Wiley Interscience, Estados Unidos
- USDA United States Department of Agriculture – (1999) – *Soil Quality Test Kit Guide* – Agricultural Research Service, Natural Resources Conservation Services, Soil Quality Institute, Estados Unidos
- USEPA United States Environmental Protection Agency – (1993a) – *Design Manual: Nitrogen Control* – EPA 625/R-93/010, Office of Research and Development, Office of Water, Washington DC
- USEPA United States Environmental Protection Agency – (1993b) – *Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge* – Fed. Reg. 58(32): 9248-9415, Washington DC, Estados Unidos
- USEPA United States Environmental Protection Agency – (1994) – *Biosolids Recycling: Beneficial Technology for a Better Environment* – EPA 832-R-94-009, Office of Water, Washington DC, Estados Unidos
- USEPA United States Environmental Protection Agency – (1995) – *A handbook of constructed wetlands. Volume 1: General considerations* – EPA 843F00000, Pennsylvania, Estados Unidos
- USEPA United States Environmental Protection Agency – (1999) – *Manual: Constructed Wetlands Treatment of Municipal Wastewater* – EPA 625/R-99/010, Ohio, Estados Unidos
- USEPA United States Environmental Protection Agency – (2000) – *Introduction to Phytoremediation* – National Risk Management Research Laboratory, Ohio, Estados Unidos

- USEPA United States Environmental Protection Agency – (2002) – *Biosolids Technology Fact Sheet: Use of composting for biosolids management* – EPA 832-F-02-024, Office of Water, Washington DC, Estados Unidos
- USEPA United States Environmental Protection Agency – (2012) – *Guidelines for Water Reuse* – EPA/600/R-12/618, Office of Wastewater Management, Office of Water, Washington DC, Estados Unidos
- Vymazal J. & L. Kröpfelová – (2009) – *Removal of organics in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review of the field experience* – *Science of the Total Environment*, 409:3911-3922
- Vymazal J., Brix H., Cooper P. F., Haberl R., Perfler R. & J. Laber – (1998) – *Removal mechanisms and types of constructed wetlands* – En: Vymazal J., Brix H., Cooper P. F., Green M. B. & R. Haberl (Eds) – *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe* – Backhuys Publishers, Holanda, pp 17-66
- Wagner S., Truong P. & A. Vieritz – (2003) – *Response of Vetiver Grass to Extreme Nitrogen and Phosphorus Supply* – *Proceedings of the Third International Conference on Vetiver and Exhibition, Guangzhou, China*
- Wallace S. D. & R. L. Knight – (2006) – *Small Scale Constructed Wetland Treatment Systems: feasibility, design criteria and O&M requirements* – Water Environment Research Foundation
- Xia H. P., Liu S. & H. Ao – (2000) – *Study on Purification and Uptake of Vetiver Grass to Garbage Leachate* – *Second International Vetiver Conference, Tailandia*
- Zbytniewski R. & B. Buszewski – (2005) – *Characterization of natural organic matter (NOM) derived from sewage sludge compost. Part 1: Chemical and spectroscopic properties* – *Bioresource Technology*, 96:471-478
- Zucconi F. & M. de Bertoldi – (1987) – *Compost specifications for the production and characterization of compost from MSW* – En: de Bertoldi M., Ferranti M. P., L'Hermite P. & F. Zucconi (Eds.) *Compost: Production, Quality and Use* – Comm. of the European Communities – Elsevier Applied Science, London, pp 30-50