

Trabajo Final Integrador de Ingeniería Ambiental

Evaluación de impacto del enriquecimiento de nitrógeno en suelos regados con aguas residuales tratadas de la planta de tratamiento de la Ciudad de Ingeniero Jacobacci (Río Negro)

Autor: Catenazzo, Carlos Joaquín

Directora: Ing. Cremona, María Victoria

Co-Directora: Ing. Riat, Martha



San Carlos de Bariloche - Río Negro
Septiembre - 2022

Agradecimientos

A la UNRN por brindar la posibilidad a la comunidad de estudiar de forma gratuita, y a todos sus trabajadores. A los docentes por su dedicación y compromiso, en especial a la Dra. Graciela Calabrese por su confianza y apoyo, y a todos mis compañeros a lo largo de los años, de todos algo aprendí.

A Viqui y Martha, por su tiempo, dedicación y por compartir siempre sus valiosos conocimientos y experiencias para ayudarme a seguir formándome como profesional. También a Alejandra Arroyo por su necesario aporte.

A mi familia toda, mis padres, hermanas, sobrinos, tíos y primos, siempre con amor y comprensión, apoyando y brindando oportunamente lo necesario...una palabra, un silencio, desde una compu hasta un abrazo...lo que hiciera falta.

A mis amigos (los que están y el que no), por acompañar, por viajar, llamar, prender el fuego y poner la pava.

Y principalmente a mi compañera Luci y nuestros hijos, Elo y Jero, muchas gracias por el apoyo incondicional, por acompañar, ayudar, por su paciencia, su tiempo. Esto empezó como un proyecto personal y termina como un trabajo en equipo.

“Salud y que, en las sumas y restas, gane el mañana” S.M.

Resumen

La reutilización de agua residual tratada (RART) para riego agrícola, es de especial interés en regiones áridas y semiáridas, ya que disminuye la presión sobre el recurso agua y cierra el ciclo hidrológico a pequeña y mediana escala. Por otro lado, se aprovechan agua y nutrientes para cultivos en ambientes donde su disponibilidad para actividades humanas es muy limitante. Si bien es una tendencia creciente a nivel mundial y regional, que presenta numerosas ventajas, existen algunos riesgos ambientales que es necesario monitorear, entre ellos el enriquecimiento del suelo en distintas formas de nitrógeno.

El presente trabajo tiene por objeto plantear un balance de Nitrógeno (N), evaluar su ajuste y proponer un plan de monitoreo del comportamiento del N, en sus diferentes formas dentro del sistema.

Se plantea como hipótesis que la RART para riego va a aumentar la concentración de Nitrógeno el suelo, pero a su vez, la cosecha de biomasa permitirá mantener los niveles de Nitrógeno mineral en valores admisibles para los cultivos y evitar el movimiento excesivo de nutrientes en el suelo.

Se trabajó sobre un ensayo instalado desde 2016 (UNRN, INTA-EEA Bariloche, DPA). En convenio con otras instituciones y organismos municipales y provinciales), junto a la planta de tratamiento de aguas residuales domiciliarias (lagunas facultativas) de Ingeniero Jacobacci, en el que se compara el efecto de riego con agua residual tratada (ART) con agua de perforación (AL), en dos tipos de vegetación: cultivo de alfalfa (A) y campo natural (CN-vegetación espontánea). En cada parcela se midió el N en suelo al inicio del ensayo y luego de la segunda temporada de riego, se cosecho biomasa en tres ocasiones por temporada, se registró la lámina entregada considerando el contenido de N provisto por datos del Departamento Provincial de Aguas (DPA).

Partiendo de estos datos se planteó una ecuación de balance teórica y se cotejó con las mediciones. Los resultados, mostraron que efectivamente existe acumulación de nitrógeno en las parcelas bajo riego de ART (diferencias significativas, $p > 0.05$). En cuanto al ajuste del modelo, los resultados de correlación y regresión lineal muestran que la estimación planteada para todos los factores (Tipo de agua y Vegetación), funciona aceptablemente ($r = 0,66$; $p = 0,02$; $R^2 = 0,44$) para la cantidad de datos utilizados ($n = 12$), evidenciando una mejora notoria al analizar los datos por tipo de vegetación ($r > 0,9$ y $R^2 > 0,82$). También se llega a la conclusión que es necesario revisar algunos supuestos teóricos utilizados en la ecuación, y ajustar el modelo para procesos como la fijación biológica, al trabajar con especies leguminosas. El análisis empírico de Amonio y Nitrato en profundidad, mostro una relación positiva entre el aumento del Nitrógeno total (Nt) y NO_3^- . El análisis de varianza confirma que no existen diferencias significativas de concentraciones de Nitrato entre cada grupo de combinación de factores y los valores más elevados no superan el máximo permitido de 50 ppm (WHO, 2006).

Finalmente, se diseñó un plan de monitoreo, control y mitigación de impacto, a mediano y largo plazo, puntualmente para el proyecto de RART en el predio contiguo a la planta depuradora de Ing. Jacobacci. Los datos obtenidos a lo largo del presente trabajo permitieron identificar los parámetros más sensibles que resulten adecuados como indicadores a relevar durante el plan de monitoreo.

Palabras clave: Reutilización de Aguas Residuales Tratadas; Reúso para riego agrícola; Balance de nitrógeno. -

Abstract

The reuse of treated wastewater (RTWW) for agricultural irrigation is of special interest in arid and semi-arid regions, since it reduces pressure on water resources and closes the hydrological cycle on a small and medium scale. On the other hand, water and nutrients are used for crops in environments where their availability for human activities is very limited. Although it is a growing trend at the global and regional levels, which has many advantages, there are some environmental risks that need to be monitored, including soil enrichment in different forms of nitrogen.

The purpose of this work is to propose a Nitrogen (N) balance, evaluate its adjustment and propose a monitoring plan for the behavior of N, in its different forms within the system.

It is hypothesized that the RTWW for irrigation will increase the concentration of Nitrogen in the soil, but at the same time, the harvest of biomass will allow maintaining the levels of mineral Nitrogen at admissible values for crops and avoiding the excessive movement of nutrients in the soil.

Work was carried out on a trial installed since 2016 (UNRN, INTA-EEA Bariloche, DPA). In agreement with other municipal and provincial institutions and agencies), together with the residential wastewater treatment plant (facultative lagoons) of Ingeniero Jacobacci, in which the effect of irrigation with treated wastewater (TWW) is compared with drilling water (DW), in two types of vegetation: alfalfa cultivation (A) and natural field (NF-spontaneous vegetation). In each plot, soil N was measured at the beginning of the trial and after the second irrigation season, biomass was harvested three times per season, the sheet delivered was recorded considering the N content provided by data from the Provincial Water Department (DPA).

Starting from these data, a theoretical balance equation was established and compared with the measurements. The results showed that there is indeed nitrogen accumulation in the plots under TWW irrigation (significant differences, $p > 0.05$). Regarding the fit of the model, the correlation and linear regression results show that the estimation proposed for all the factors (Type of water and Vegetation), works acceptably ($r = 0.66$; $p = 0.02$; $R^2 = 0.44$) for the amount of data used ($n = 12$), showing a marked improvement when analyzing the data by type of vegetation ($r > 0.9$ and $R^2 > 0.82$). It is also concluded that it is necessary to review some theoretical assumptions used in the equation, and adjust the model for processes such as biological fixation, when working with legume species. The empirical analysis of Ammonium and Nitrate in depth, showed a positive relationship between the increase in total Nitrogen (Nt) and NO_3^- . The analysis of variance confirms that there are no significant differences in Nitrate concentrations between each group of combination of factors and the highest values do not exceed the maximum allowed of 50 ppm (WHO, 2006).

Finally, a monitoring, control and impact mitigation plan was designed, in the medium and long term, specifically for the RTWW project on the property adjacent to the Ing. Jacobacci treatment plant. The data obtained throughout the present work allowed identifying the most sensitive parameters that are suitable as indicators to be surveyed during the monitoring plan.

Key Words: Reuse of Treated Wastewater; Reuse for agricultural irrigation; Nitrogen balance. -

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
2	ESTADO DEL ARTE de la RART.....	6
2.1	Antecedentes y Evolución de la Reutilización de aguas residuales.....	6
2.2	Recuperación y reutilización.....	6
2.3	Reutilización en el mundo y en Argentina.....	8
2.3.1	Normativa, guías de uso y parámetros de control	9
2.4	Tipos de reutilización.....	11
2.5	Tratamientos.....	11
2.6	Usos	14
2.6.1	RART para riego en agricultura	15
3	HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
3.1	Objetivo General.....	18
3.2	Objetivos específicos	18
3.3	Hipótesis	18
4	MATERIALES Y MÉTODOS	19
4.1	Proyecto de RART en Ingeniero Jacobacci.....	19
4.1.1	Características del área de trabajo	21
4.1.1.1	Clima	21
4.1.1.2	Suelo.....	22
4.1.1.3	Hidrología.....	22
4.1.2	Planta de tratamiento de efluentes cloacales	24
4.1.2.1	Proyecto inicial, ubicación y puesta en marcha.....	24
4.1.2.2	Calidad del efluente	25
4.1.3	Descripción del ensayo de reutilización de aguas residuales tratadas para riego.	27
4.1.3.1	Selección de especies forrajeras	27
4.1.3.2	Diseño experimental	28
4.1.3.3	Especificaciones técnicas	29
4.2	Toma de muestras	31
4.2.1	Técnicas de muestreo	31
4.3	Análisis de laboratorio, técnicas aplicadas	32

4.4 Balance de nitrógeno.....	33
4.4.1 Fundamento teórico	33
4.4.2 Componentes del balance - Mediciones, estimaciones y supuestos	33
4.5 Procesamiento de datos y análisis estadístico	35
4.5.1 Evaluación del ajuste del modelo de balance.....	35
4.5.2 Análisis de Varianza (ANOVA)	35
5 RESULTADOS.....	36
5.1. Análisis general de los datos	36
5.2 Ajuste del modelo (Correlación y regresión lineal)	39
5.3 Comportamiento del Nitrógeno total del suelo en los diferentes tratamientos.....	42
5.4 Análisis de Amonio y Nitrato	44
5.5 Discusión.....	47
6 PROPUESTA DE MONITOREO DE ACUMULACIÓN Y MOVIMIENTO DE NITRÓGENO EN EL SUELO REGADO CON AGUA RESIDUAL TRATADA	50
6.1 Justificación	50
6.2 Propuesta de Monitoreo y Control de procesos y parámetros y Mitigación de posibles impactos ambientales	50
6.3 Cronograma y Presupuesto del Plan de Monitoreo propuesto	55
6.4 Propuestas de mejora y fortalecimiento de la RART para riego de forrajeras.....	57
7 CONCLUSIÓN Y CONSIDERACIONES FINALES	59
8 REFERENCIAS.....	61
ANEXO I	65
ANEXO II	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Eventos históricos e importantes relacionados con la evolución de la recuperación y reutilización de agua en todo el mundo hasta 1968.</i>	65
Tabla 2	<i>Guías de la EPA para la reutilización de aguas residuales tratadas en el sector agrícola</i>	66
Tabla 3	<i>Concentraciones máximas permisibles de metales para aguas residuales tratadas de uso agrícola</i>	66
Tabla 4	<i>Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura</i>	67
Tabla 5	<i>Recomendaciones para RART en riego agrícola</i>	67
Tabla 6	<i>Etapas y objetivos del tratamiento preliminar de aguas residuales</i>	12
Tabla 7	<i>Tipos de tratamiento secundario de aguas residuales</i>	13
Tabla 8	<i>Principales categorías y aplicaciones típicas más implementadas de RART</i>	14
Tabla 9	<i>Precipitaciones medias mensuales (Sitio Piloto Jacobacci – INTA)</i>	21
Tabla 10	<i>Temperaturas medias mensuales (Sitio Piloto Jacobacci – INTA)</i>	22
Tabla 11	<i>Determinación de variables edáficas iniciales en el sitio del ensayo</i>	22
Tabla 12	<i>Determinaciones de parámetros físico-químicos, bacteriológicos, orgánicos e inorgánicos del efluente de la planta depuradora, previo al inicio del ensayo.</i>	26
Tabla 13	<i>Parámetros analíticos iniciales, utilizados para el cálculo de balance de Nitrógeno.</i>	33
Tabla 14	<i>Resumen de resultados de la ecuación de balance propuesta, para cada temporada y por parcela de ensayo.</i>	36
Tabla 15	<i>Resumen de resultados de Correlación de Pearson y Regresión lineal para Nt_fE vs. Nt_fM, y factores principales diferenciados.</i>	40
Tabla 16	<i>Análisis de Varianza NT_i Medido</i>	68
Tabla 17	<i>Análisis de Varianza NT final Medido</i>	68
Tabla 18	<i>Análisis de Varianza NT final estimado</i>	68
Tabla 19	<i>Análisis de Varianza Delta NT_fM vs. NT_fE Medido</i>	68
Tabla 20	<i>Comparación sintetizada de análisis de varianza (Nt_f E vs. Nt_f M)</i>	42
Tabla 21	<i>Análisis de varianza Delta NH₄⁺ (80cm)</i>	69
Tabla 22	<i>Análisis de varianza Delta NO₃⁻ (80cm)</i>	69
Tabla 23	<i>Procesos para proyecto de RART para riego agrícola (expansión de superficie regada).</i>	52
Tabla 24	<i>Plan de monitoreo, control y mitigación de impacto, de acumulación y movimiento de Nitrógeno en el suelo regado con ART.</i>	53
Tabla 25	<i>Descripción de toma de muestras y análisis correspondientes para dar cumplimiento al plan de monitoreo.</i>	54
Tabla 26	<i>Presupuesto por año del Plan de Monitoreo, Control y Mitigación (sujeto a presupuesto válidos para el mes de abril de 2022).</i>	56
Tabla 27	<i>Iniciativas de mejora y fortalecimiento de la RART a nivel regional.</i>	58

INDICE DE FIGURAS

Figura 1	<i>Estimaciones de demanda global de agua por sector para el año 2040</i>	2
Figura 2	<i>Ciclo del nitrógeno, ciclo primario (flechas grises), mineralización de N orgánico, las plantas absorben el N mineral y finalmente, el N orgánico se devuelve al suelo como residuo vegetal o animal.</i>	4
Figura 3	<i>Ciclo cerrado de agua y nutrientes en sistema de captación y distribución de agua potable y captación y tratamiento de efluentes, con RART.</i>	7
Figura 4	<i>Planta de Tratamiento Ing. Jacobacci, fotografía de Laguna Facultativa.</i>	19
Figura 5	<i>Disposición final del efluente en riego forestal, en el año 2014.</i>	20
Figura 6	<i>Situación del Mallín en 2014, excedentes del efluente cloacal.</i>	20
Figura 7	<i>Ubicación de Localidad Ingeniero Jacobacci en Provincia de Rio Negro.</i>	21
Figura 8	<i>Cuenca Huhuel Niyeo y ubicaciones de sitios relevantes respecto al proyecto de RART.</i>	23
Figura 9	<i>Proyecto Planta de Tratamiento Efluentes Cloacales de Ing. Jacobacci</i>	24
Figura 10	<i>Locación de la Planta de tratamiento de efluentes, respecto al Centro Urbano</i>	25
Figura 11	<i>Planta de tratamiento (laguna facultativa); ensayo de RART; y predio contiguo del DPA con destino de ampliación de superficie regada.</i>	27
Figura 12	<i>Diagrama de distribución de parcelas del ensayo de RART.</i>	29
Figura 13	<i>Representación esquemática del ensayo (actividades, procedimientos e infraestructura).</i>	30
Figura 14	<i>Muestras de suelo 2ª temporada, procesadas – Laboratorio de suelos (EEA INTA Bariloche).</i>	31
Figura 15	<i>Destilador para determinación de N inorgánico, Amonio y Nitrato - Laboratorio de suelos (EEA INTA Bariloche).</i>	32
Figura 16	<i>Variación del Nt medido (NtfM-Nti).</i>	37
Figura 17	<i>Variación del Nt final estimado respecto al Nt inicial medido (NtfE-Nti).</i>	38
Figura 18	<i>Delta Nt final estimado vs. Nt final medido (NtfE-NtfM).</i>	39
Figura 19	<i>Regresión, línea de tendencia y R2, Ntf E vs. Ntf M para todos los datos en conjunto.</i>	40
Figura 20	<i>Regresión, línea de tendencia y R2, Ntf E vs. Ntf M. – Alfalfa (AT y AL).</i>	41
Figura 21	<i>Regresión, línea de tendencia y R2, Ntf E vs. Ntf M – Campo natural (AT y AL).</i>	41
Figura 22	<i>Nitrógeno total final (Estimado y Medido) para cada tratamiento (letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada parámetro).</i>	43
Figura 23	<i>Variación de Nitrógeno total final (Estimado-Medido), las letras indican diferencias significativas (p<0.05).</i>	43
Figura 24	<i>NH₄⁺ final en perfil completo (AT y AL).</i>	44
Figura 25	<i>NO₃⁻ final en perfil completo (AT y AL).</i>	45

Figura 26	<i>Variaciones de NH_4^+ y NO_3^- entre final e inicial (60-80 cm) y sus diferencias significativas entre tratamientos.</i>	46
Figura 27	<i>Delta Ntf M (0-40 cm), y variaciones de NH_4^+ y NO_3^- (60-80 cm).</i>	46
Figura 28	<i>Diagrama de procesos del proyecto de RART en Ing. Jacobacci.</i>	51
Figura 29	<i>Cronograma del Plan de Control, Monitoreo y Mitigación.</i>	55

1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo y aprovechamiento de recursos hídricos en el pasado se basó en la manipulación del ciclo hidrológico natural, centrándose en el suministro de agua para consumo humano y sus actividades, intentando equilibrar la disponibilidad inherente de agua en una región, con las necesidades sociales (como bien público) de este recurso natural, en el contexto socio-económico de la región, la población y el alcance de la urbanización. Históricamente, este modo de gestión sostuvo un supuesto intrínseco de que las soluciones tecnológicas mantendrían el ritmo de suministro de agua, acorde a la creciente de demanda y con requisitos de calidad progresivamente más estrictos (*Baumann et al., 1998; Thompson, 1999; Bouwer, 2000*).

El uso del agua en todo el mundo ha aumentado aproximadamente un 1% por año desde la década de 1980 (AQUASTAT, s.f.). Una suba sostenida que se debe principalmente a la creciente demanda en los países en desarrollo y en las economías emergentes, los cuales han ido acercando su uso de agua per cápita, al de los países desarrollados. Esta evolución creciente es impulsada por la combinación de crecimiento poblacional, desarrollo socio-económico y nuevos patrones de consumo (*World Water Assessment Program, 2016*). La agricultura (incluyendo riego, ganadería y acuicultura) es donde se destina el mayor consumo de agua, dado que representa el 69% de las extracciones anuales de agua a nivel global. La industria (incluyendo la generación de energía) representa el 19%, y el uso doméstico el 12% (*AQUASTAT, 2019*).

Se espera que la demanda global de agua continúe aumentando a un ritmo similar hasta 2050, alcanzando un aumento del 20% al 30% por encima del nivel actual de uso del agua (*Burek et al., 2016*). Aunque las estimaciones pueden variar levemente, sugieren que gran parte de este crecimiento será por la demanda de los sectores industrial y doméstico (*OCDE, 2012; Burek et al., 2016; IEA, 2016*). Por lo tanto, es probable que la porción de agua utilizada para la agricultura del uso total de agua disminuya en comparación con otros sectores, de todas formas, se estima que seguirá siendo el mayor usuario en general en las próximas décadas, en términos de extracción y consumo de agua (Figura 1).

Para contextualizar la disponibilidad de agua en el presente y las estimaciones futuras relacionadas con la disponibilidad mundial de agua, podemos valernos del índice de Estrés Hídrico Físico, que se define como el porcentaje de agua dulce extraída anualmente (por todos los sectores y el ambiente) del total de reservas renovables de agua dulce de un país o región (*ONU, 2018*).

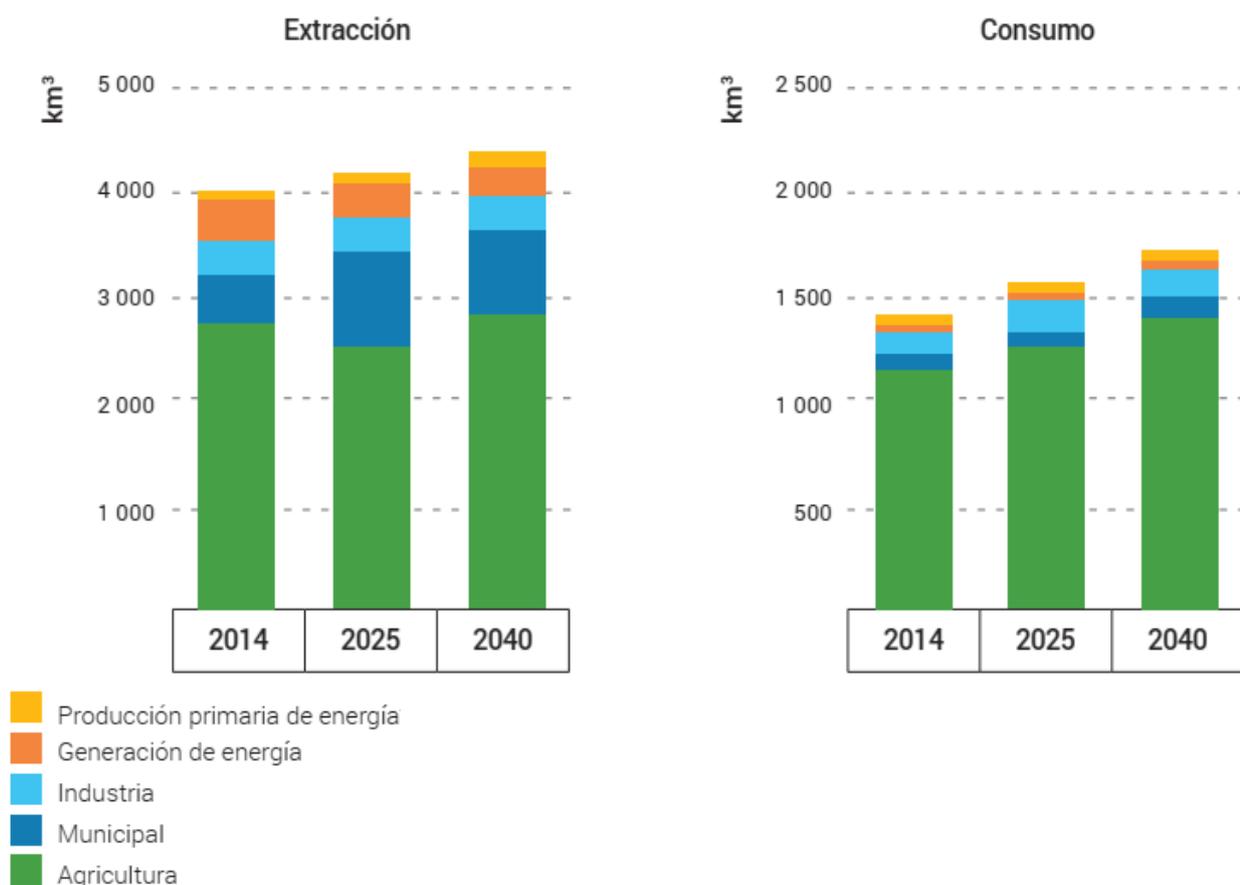


Figura 1 - Estimaciones de demanda global de agua por sector para el año 2040 (ONU, 2018)

Utilizando este índice, se calculó que, más de 2.000 millones de personas viven en países que experimentan un alto estrés hídrico físico. Aunque el estrés hídrico promedio mundial es solo del 11%, 31 países experimentan estrés hídrico entre el 25% (que se define como el umbral mínimo de estrés hídrico) y el 70%, y 22 países están por encima del 70%, y por lo tanto están bajo un estrés hídrico severo (ONU, 2018).

El creciente estrés hídrico indica un uso sustancial del recurso, con mayores impactos en la sostenibilidad de estos y un creciente potencial de conflictos entre los usuarios. Sobre estas bases, se estima que para el 2025, la mitad de la población mundial se encuentre en niveles altos de estrés hídrico (World Resource Institute–Aqueduct, 2000;2019).

Ante este panorama actual y futuro, el desafío para la gestión y el desarrollo de los recursos hídricos se centra en poder garantizar el acceso al agua, resguardando este bien natural, sin comprometer su calidad presente y futura, ni el ambiente en general por prácticas inadecuadas de consumo y disposición de los desechos/efluentes.

Este nuevo paradigma evoluciona hacia los principios de sostenibilidad, ética ambiental y participación pública en el desarrollo de proyectos para la provisión de agua potable y saneamiento de aguas residuales (domiciliarias, industriales y agropecuarias). Muchas comunidades, ya han alcanzado, o están acercándose a los límites de sus suministros disponibles de agua potable y de las

capacidades (de carga) de asimilación y autodepuración de los cuerpos de agua receptores de sus efluentes de aguas residuales. En este contexto, la recuperación y reutilización de aguas residuales tratadas (RART), no solo aborda el problema de la contaminación de sistemas hídricos, sino que también es una opción muy relevante para conservar y ampliar el suministro de agua disponible. Al día de hoy, la RART es una realidad, principalmente en riego agrícola, relleno de acuíferos, aplicaciones urbanas y recreativas, y en la industria (principalmente refrigeración) (*O'Connor et al., 2008*).

En vastas regiones de nuestro país, el agua de óptima calidad es un bien/recurso escaso. Esto se debe principalmente a condiciones de aridez regional (en la República Argentina, las zonas áridas, semiáridas, y subhúmedas secas representan el 75% de la superficie total del país. *INTA, 2012*), por déficit hídrico y/o por contaminación de napas freáticas debido a actividades antrópicas. El caso de Ing. Jacobacci en la Provincia de Río Negro, es un ejemplo de ello.

En esta localidad de la Línea Sur, funciona desde 2016 un ensayo llevado adelante por profesionales del Departamento Provincial de Aguas (DPA), del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, Estación Experimental Agropecuaria San Carlos de Bariloche (INTA EEA-Bariloche), Universidad Nacional de Río Negro (UNRN), en convenio con la Cooperativa de Aguas y Servicios Públicos de Ingeniero Jacobacci, el Ente para el Desarrollo de la Región Sur y el Municipio de Ingeniero Jacobacci. El mismo evalúa la RART provenientes de la planta de tratamiento de efluentes de Ing. Jacobacci, para el riego agrícola y forestal. Este ensayo se ha desarrollado y robustecido, con proyectos de investigación llevados adelante por profesionales del INTA y UNRN. Desde su comienzo e implementación, se realizaron mejoras y optimizaciones en sus procesos, producto del trabajo a campo, de mediciones y análisis de los parámetros pertinentes según normativa nacional e internacional, en la búsqueda de evaluar el impacto ambiental de la RART en esta región centro de la provincia de Río Negro.

Contemplando lo realizado hasta el momento, y teniendo en cuenta las ventajas que conlleva la reutilización de aguas residuales para riego en agricultura, y las dificultades que acarrea su implementación, se hace necesario buscar soluciones a aspectos específicos, que luego puedan extrapolarse a escenarios más generales, siempre manteniendo relación entre los conflictos reales *in situ* y las estimaciones de los modelos teóricos. Por lo tanto, y en pos de avanzar en una RART óptima, ampliar la superficie regada, y lograr un aprovechamiento más efectivo y eficiente de los efluentes, sin comprometer el ambiente, es necesario conocer el comportamiento, en el sistema suelo-plantación, de los nutrientes presentes en las aguas residuales al ser utilizados como enmienda orgánica por medio del riego. Es por esto que en el contexto convocante de un Trabajo Final Integrador de grado, centramos la atención en el comportamiento de uno de los nutrientes más relevantes presentes en los efluentes domiciliarios: el Nitrógeno.

Con el fin de abordar correctamente el análisis de este trabajo, partimos del ciclo general del Nitrógeno en el ambiente (Figura 2), puntualizando en la dinámica del mismo en el suelo. De este surge que, en todos los suelos, de forma continua, existen entradas y salidas de Nitrógeno, además de múltiples transformaciones complejas del mismo. El conjunto de todos estos procesos constituye una parte importante del ciclo completo del Nitrógeno.

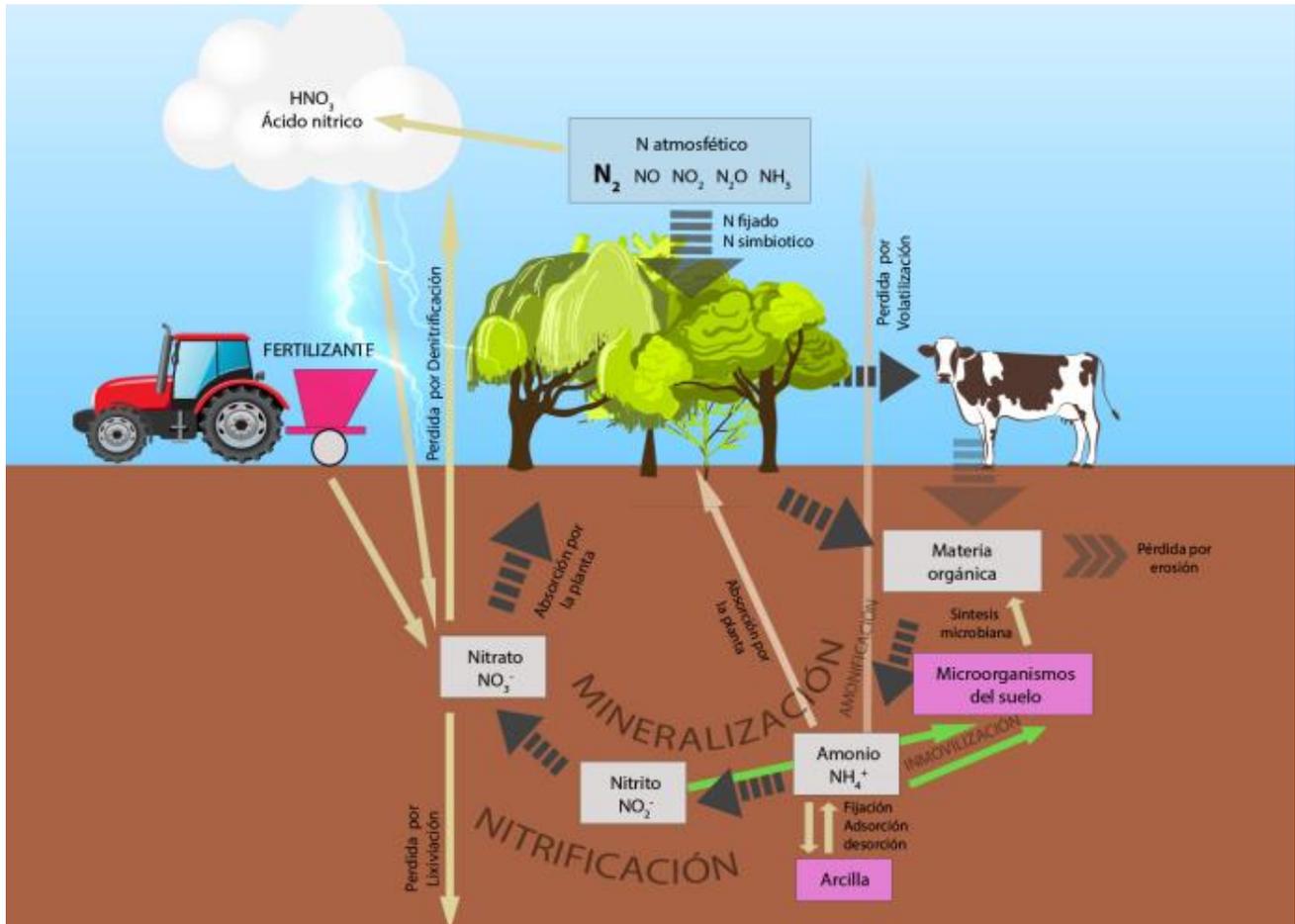


Figura 2: Ciclo del nitrógeno, ciclo primario (flechas grises), mineralización de N orgánico. Las plantas absorben el N mineral y finalmente, el N orgánico se devuelve al suelo como residuo vegetal o animal. (UNT, 2019)

El Nitrógeno presente en suelos proviene de materiales diversos: restos de cultivos, abonos verdes, estiércol, fertilizantes comerciales y nitratos aportados por lluvias, así como por la fijación de N atmosférico por ciertos microorganismos. Gran parte del Nitrógeno incorporado al suelo sufre grandes transformaciones antes de ser utilizado por los vegetales superiores. Las proteínas son degradadas, originando productos de descomposición más sencillos como el ion Amonio NH_4^+ (que es absorbido principalmente por microorganismos y algunas plantas) y, finalmente, parte del nitrógeno aparece en forma de nitrato NO_3^- (de esta forma es incorporado, tanto por los microorganismos como por las plantas superiores). También existen pérdidas de N en el sistema, que se deben a la asimilación por parte del cultivo, a la erosión, a la lixiviación y a su volatilización en condición gaseosa, tanto en forma elemental como en forma de óxidos o de amoníaco. Esta dinámica, brevemente descrita, está regida por los siguientes tres grandes procesos, y sus secuencias propias:

- Ganancias de N por el suelo
 1. Fijación biológica de N atmosférico por microorganismos.
 2. Depositiones de N desde la atmósfera.
 3. Aportes de N en fertilizantes, estiércol, plantas verdes y residuos de distintos orígenes.

- Transformaciones del N en el suelo
 1. Aminificación, o degradación bioquímica de las proteínas y otros compuestos complejos nitrogenados en aminoácidos y aminas.
 2. Amonificación, o transformación bioquímica de los aminoácidos y aminas en amonio.
 3. Nitrificación, u oxidación bioquímica del amonio a nitrato.
 4. Síntesis proteicas de los microorganismos del suelo, a partir de los compuestos que se originan en el transcurso de los anteriores procesos (Inmovilización o reorganización).

- Pérdidas de N desde el suelo
 1. Desnitrificación, o reducción bioquímica de nitratos bajo condiciones anaeróbicas.
 2. Volatilización de amoníaco, principalmente en suelos alcalinos, cálidos y húmedos.
 3. Lixiviación de nitratos.
 4. Asimilación de nitratos por las plantas superiores- Extracción por cultivos
 5. Fijación de amonio por las arcillas

Conociendo estos procesos que forman el ciclo del nitrógeno en el ambiente, el presente trabajo se propone, estudiar el comportamiento de este nutriente en las condiciones específicas de los sistemas de reúso, en el contexto de las condiciones edafoclimáticas del sitio donde se aplica. Identificando y cuantificando las componentes más significativas de la dinámica de N en estos sistemas suelo-planta y estimando su balance en el mediano plazo, se pretende lograr un control adecuado del contenido de este nutriente que se incorpora a las plantaciones regadas con agua de reúso.

Con esta información obtenida, el objetivo es planificar e implementar un monitoreo eficiente y eficaz de la extracción/acumulación del Nitrógeno, ya que el adecuado control de su comportamiento en su aplicación, aumenta las ventajas y ayuda a disminuir otros riesgos y/o dificultades de la implementación de esta práctica.

2 ESTADO DEL ARTE de la RART

2.1 Antecedentes y Evolución de la Reutilización de aguas residuales

La reutilización de las aguas residuales no es una actividad reciente o moderna. Las evidencias del uso de aguas residuales para el riego agrícola se remontan aproximadamente 3000 años a la civilización minoica en Creta, Grecia (*Angelakis et al., 1999 y 2003*), habiéndose encontrado evidencia desde ese momento hasta los tiempos modernos, en diferentes civilizaciones alrededor del mundo. En el pasado reciente, los inicios de la recuperación y reutilización del agua se remontan a mediados del siglo XIX con la introducción de sistemas de aguas residuales para conducir los desechos domésticos a los cursos de agua más cercanos, lejos de las viviendas urbanas. Ya en la segunda mitad del siglo XX, en los países de Europa con déficit hídrico como España, o en Estados Unidos de Norteamérica aumentaron las experiencias, tecnologías y normativas afines, de reutilización de aguas residuales para diferentes tipos de usos (Tabla 1 – ANEXO I), llegando a la actualidad con múltiples y variados proyectos de RART en todo el mundo.

2.2 Recuperación y reutilización

“Toda comunidad genera residuos tanto sólidos como líquidos. La fracción líquida de los mismos (aguas residuales) es esencialmente el agua de la cual se desprende la comunidad una vez que ha sido contaminada durante los diferentes usos para los cuales ha sido empleada. Desde el punto de vista de las fuentes de generación, podemos definir el agua residual, como la combinación de los residuos líquidos, o aguas portadoras de residuos, procedentes tanto de residencias como de instituciones públicas y establecimientos industriales, agropecuarias y comerciales, a los que puede agregarse, eventualmente, aguas subterráneas, superficiales y pluviales.” (*Metcalf y Eddy, 2007*)

La recuperación de agua es el proceso de captación y tratamiento adecuado de aguas residuales de diferentes orígenes. Con la finalidad de su reutilización, para usos beneficiosos, contemplando el cumplimiento de criterios de calidad del agua necesarios de acuerdo a su destino final.

Las aguas residuales del sector industrial y comercial se caracterizan por contener niveles elevados de metales, metaloides, y compuestos volátiles o semivolátiles, mientras que las aguas residuales domésticas son más dañinas debido a su alta carga de patógenos (*Qadir, et al., 2010*).

Como se mencionó, las aguas residuales urbanas (ARU) y peri-urbanas, por lo general son una mezcla de efluentes de sectores domésticos e industriales, sumada a las aguas pluviales. A pesar de esta composición heterogénea, representan una fuente más confiable y significativa de agua recuperada, en comparación con las aguas residuales procedentes estrictamente de los flujos de retorno agrícola, escorrentía de aguas pluviales y descargas industriales sin tratamiento. Esto se debe a que, en las zonas urbanas donde existen sistemas de recolección de efluentes cloacales, los mismos se direccionan a plantas de tratamientos, donde se les aplican diferentes tratamientos

primarios, secundarios o combinación de ambos. Estos procesos tienen como objetivo alcanzar valores de remoción aproximados de 60% de materia orgánica y 90% de DBO₅. La Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) es un procedimiento de laboratorio, que permite estimar la cantidad de oxígeno que requiere una población microbiana heterogénea, para oxidar y degradar la materia orgánica presente en una muestra de agua, durante 5 días a una temperatura de 20°C. Este indicador es un parámetro muy relevante para valorar el grado de carga orgánica y la calidad del efluente. Realizados estos tratamientos, la disposición final de los líquidos, son mayoritariamente, cuerpos hídricos receptores.

Donde no hay instalados sistemas cloacales y plantas de tratamientos de efluentes, los mismos se descargan directamente con tratamientos primarios simples, o ningún tratamiento, en cuerpos de agua, o pozos. En ambos casos, ya sea por acumulación puntual del vertido del efluente, o por vuelco directo sin tratamientos adecuados, se pone en riesgo la calidad del sistema hidrológico urbano y peri-urbano.

Con este escenario la reutilización de las aguas residuales se posiciona como una solución integral a mediano y largo plazo, contemplando que, se someta al tratamiento específico para alcanzar la calidad requerida para el fin del nuevo uso. La recuperación y reutilización tiene el objetivo general de cerrar el ciclo hidrológico a una escala local pequeña, reciclando no solo el agua, sino también los nutrientes, principalmente Nitrógeno y Fósforo, de esta manera las aguas residuales tratadas pasan a ser un recurso (Figura 3). Su utilización, en lugar del agua potable, en riego agrícola y forestal, es una alternativa para evitar el vuelco de efluentes domésticos a cuerpos receptores hídricos y resulta de especial interés en áreas donde la escasez de agua afecta las actividades humanas (Faleschini, 2016).

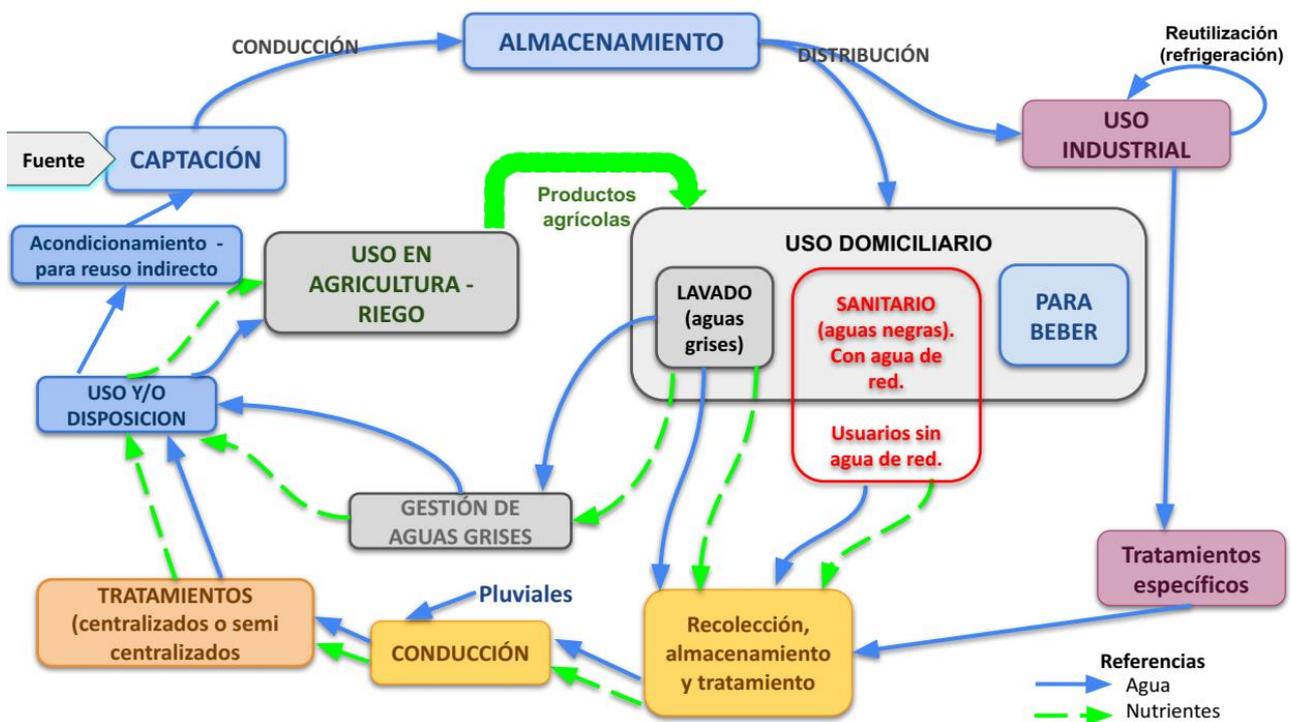


Figura 3 – Ciclo cerrado de agua y nutrientes en sistema de captación y distribución de agua potable y captación y tratamiento de efluentes, con RART. Línea continua = Agua; Línea discontinua = Nutrientes. (Adaptación, resumen de elaboración propia)

La recuperación de aguas, ya sea en sistemas cerrados o abiertos de RART, se dividen de acuerdo al tratamiento aplicado y el uso final, en:

- **Aguas recicladas:** se define como el agua que resulta del tratamiento de aguas residuales. Son adecuadas para un uso beneficioso directo o un uso controlado
- **Aguas regeneradas:** aguas con tratamiento extra, para lograr una calidad óptima según su uso posterior. Devolviendo total o parcialmente el nivel de calidad previo a ser utilizada.
- **Aguas reutilizadas:** agua que han sido previamente utilizadas en alguna actividad humana, a la cual se le aplica algún tratamiento extra y un uso diferente al original

Las diferencias más relevantes entre el agua reutilizada con respecto al agua potable convencional (pozo, red), son:

- Mayor **salinidad**
- Mayor contenido de **materia orgánica (MO)**
- Mayor contenido de **Nutrientes** (Nitrógeno, Fósforo y Potasio)
- Contenido de **Metales**
- Contenido de **microorganismos** (virus, bacterias, helmintos, protozoos)
- Contenido de **contaminantes emergentes** (productos farmacéuticos, productos de cuidado personal, plaguicidas, retardantes de llamas, etc.)

2.3 Reutilización en el mundo y en Argentina

Se estima que a nivel mundial el agua residual tratada se reutiliza en el riego de 4,5 millones de hectáreas, lo que representa un 1,5 % del área de riego total. Una muestra representativa de la RART, es el caso de Europa, donde en el año 2006 ya existían, en distintas etapas de implementación, más de 200 proyectos de reutilización, con diferentes aplicaciones: agricultura, industria, áreas urbanas recreacionales o usos ambientales como recarga de acuíferos, o combinaciones de estos tres (*Bixioa, et. al., 2006*). La mayoría de estos proyectos se concentraban en las costas o islas de la región semiárida del sur, o en las zonas densamente pobladas de áreas urbanas del norte húmedo. En la zona semiárida, el 47 % de los proyectos correspondían a usos agrícolas. Estos usos generan un triple beneficio a las poblaciones urbanas y rurales, y al ambiente, ya que se reduce la presión sobre las fuentes de agua, se reciclan los nutrientes contenidos en las mismas generando un producto y se evita la contaminación del ambiente.

En Argentina, la reutilización de efluentes tratados para riego con destino agrícola y forestal ha sido abordada por algunas provincias como una herramienta para el manejo de sus recursos hídricos. En la Provincia de Mendoza se practica con diferentes niveles de formalidad desde hace más de 40 años. En Puerto Madryn (Provincia de Chubut) las aguas residuales domiciliarias son recolectadas por la red cloacal, pre-tratadas y bombeadas a una laguna facultativa y luego reutilizadas en riego de forestaciones.

En el norte de Patagonia, la Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas para las cuencas del Limay, Neuquén y Río Negro (AIC) desde hace casi una década viene trabajando en el objetivo de

"vuelco cero" que motivó un abordaje interinstitucional de la temática. Actualmente la planta de Choele Choel, que funciona desde el año 2018, es la única que aplica el "vuelco cero" de forma íntegra en Río Negro. Las obras de cloacas para Viedma, Las Grutas, Río Colorado, Luis Beltrán, Pilcaniyeu, Mainqué y Cinco Saltos ya se encuentran en marcha. La finalización de estas obras, en los próximos años, significaran un aumento de las aguas residuales tratadas, cobrando especial interés los estudios para su reutilización.

En Río Negro, el 80 % de la superficie en la zona centro de la Provincia presenta clima árido o semiárido, con precipitaciones escasas y déficit de agua, e integra los dos tercios de la superficie en la Argentina que presenta balances hídricos negativos la mayor parte del año. Esto representa una importante limitación para todo tipo de actividades productivas y en muchos casos hasta se dificulta el abastecimiento de agua para consumo humano. Por lo cual sus fuentes de agua para la vida y la producción, y la preservación de la calidad de las mismas debe ser un objetivo constante y que se mantenga en el tiempo. En el caso particular de las localidades de la región Sur, donde el agua resulta escasa, las actividades productivas ligadas al riego son restringidas a muy pequeñas superficies y siempre en competencia con otros usos priorizados, como el consumo humano o animal. Sin embargo, son altamente valoradas por las comunidades, en general ligadas a la producción ganadera, en donde la generación local de productos que beneficien a la misma (forraje, reparo, leña), son altamente deseables.

2.3.1 Normativa, guías de uso y parámetros de control

La reutilización de aguas tratadas, de manera planificada, se inició en la década del veinte, del siglo pasado, en Estados Unidos. Más adelante en el tiempo, a nivel mundial se comienzan a dar los primeros pasos en cuanto a legislación sobre el agua y su gestión.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) en 1958, mediante el Consejo Económico Social, señala que ninguna fuente de agua de buena calidad deberá ser utilizada en actividades que toleren agua de calidad inferior, esbozando así, los primeros pasos en la definición de *uso sostenible* para el agua.

A partir de 1970, el concepto de derecho al agua, toma fuerza a nivel mundial. En 1973 la Organización Mundial de la Salud (OMS), define reutilización indirecta, directa y reutilización de reciclaje interno (para instalaciones industriales). En ésta década también se comienza a regular la reutilización de aguas tratadas en el Estado de Israel, uno de los países, luego de Estados Unidos, con la legislación más fuerte en este aspecto. A principios de los ochentas, la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés), desarrolla las *Guías sobre la reutilización de aguas residuales tratadas*, las cuales se actualizaron regularmente en 1992, 2009 y 2012, allí podemos encontrar entre otros parámetros, una clasificación de usos agrícolas junto con los tratamientos y calidad requerida del agua a reutilizar (Tabla 2 – ANEXO I), como también las concentraciones máximas permisibles de metales (Tabla 3 – ANEXO I).

En 1989 la OMS confecciona directrices para la reutilización en agricultura, estableciendo categorías de reúso y parámetros de vuelco, muy estrictos, por la posible supervivencia de microorganismos patógenos, que puedan contaminar los cultivos. Estas directrices fueron revisadas

en 2006, definiendo parámetros menos restrictivos, más adecuados al riesgo real para la salud de trabajadores y consumidores (Tabla 4, Tabla 5 – ANEXO I).

La Agenda XXI, de la ONU en 1992, que fue un hito en cuanto a la definición de Desarrollo Sustentable, también puso de manifiesto la relevancia de la reutilización de aguas residuales como una práctica de conservación y racionalización de los recursos hídricos. Siguiendo estos lineamientos, el marco jurídico europeo dicta la norma de Tratamiento de aguas residuales urbanas, proponiendo su reutilización, y luego en el 2000 se dicta la Directiva 2000/60/CE, estableciendo el Principio de *“Quien contamina paga”*.

A nivel local, Argentina se distingue entre los países latinoamericanos por un “pluralismo institucional”, caracterizado por la heterogeneidad de legislaciones provinciales relacionadas con los recursos hídricos. El artículo 124 de la Constitución Nacional reafirma el dominio originario por parte de las provincias sobre sus recursos naturales, incluyendo el agua, otorga competencia para dictar su propia Ley o Código de Aguas y fija los criterios de asignación de los recursos hídricos, condiciones de uso, régimen de autorizaciones y concesiones.

Sin embargo, en el año 2000 comenzó a desarrollarse en el país, un marco integrador para la gestión de los recursos hídricos, estableciendo nuevos principios de política hídrica a nivel nacional. En ese contexto, los representantes de las provincias y del gobierno nacional, elaboraron los llamados “Principios rectores de Política Hídrica de la República Argentina”. Entre estos principios, podemos destacar: el reconocimiento del derecho al acceso al agua potable y servicio de saneamiento como derecho humano básico; la definición explícita del agua como bien de dominio público, disponiendo que dependerá de cada provincia la concesión de un derecho de uso a los particulares; se establece la gestión unificada de los múltiples usos del agua en articulación con la gestión ambiental y territorial; gestión descentralizada y participativa; se promueve la formación de organizaciones de cuenca abocadas a la gestión coordinada y participativa de los recursos hídricos dentro de los límites de la cuenca; así como también se anuncia la creación del Consejo Hídrico Federal (COHIFE) en 2002, integrado por las autoridades hídricas del Estado Nacional y de los Estados Provinciales.

En la provincia de Río Negro, el Departamento Provincial de Aguas (DPA) como autoridad de agua, sigue los lineamientos directores del COHIFE, para sus políticas hídricas y consecuente legislación. En 1995 se sanciona la Ley Provincial n° 2952 “Código de Aguas”, la cual da facultades al DPA para proteger, mediante legislación y control, a los cuerpos hídricos que sean receptores de efluentes o residuos. De esta ley se desprenden las resoluciones provinciales n° 885 y n° 886 (ambas del año 2015) las cuales regulan la generación de residuos líquidos y efluentes urbanos, tipificando todas las posibles actividades involucradas y especificando, entre otros aspectos, valores y parámetros físico-químicos de vuelco, propios para cada actividad. Allí también se establece, que el DPA definirá los límites permitidos de los distintos parámetros de vuelco, para cada actividad, mediante resolución pertinente. En ese contexto, en el año 2015, el DPA dicta la resolución n°1423, la cual les da marco legal a proyectos de RART, especificando y aprobando parámetros de vuelco, tipos de proyectos permitidos, y demás medidas pertinentes para la implementación de la reutilización en la provincia de Río Negro.

2.4 Tipos de reutilización

Habitualmente la reutilización de aguas residuales tratadas, se distingue entre directa e indirecta.

- **DIRECTA:** La reutilización se realiza sin que los efluentes hayan sido devueltos al medio previamente. Por lo cual, para su utilización se deben realizar tratamientos, secundarios y/o terciarios. Estos usos están legislados y muy controlados por las autoridades de aplicación.
- **INDIRECTA:** Es el enfoque más tradicional y difundido de la reutilización de efluentes. Se produce el efecto dilución en un cuerpo de agua receptor, u otro uso acorde a la calidad del efluente. Realizando previamente, un tratamiento en una planta depuradora o instalación de menor envergadura y complejidad, que logre una baja en la carga de DBO, DQO, controlar las concentraciones de nutrientes (principalmente Nitrógeno y Fósforo) y coliformes totales, antes de su disposición final.

2.5 Tratamientos

En la actualidad, los tratamientos de efluentes urbanos incluyen diversos procesos y operaciones específicas, que contemplando las características regionales (precipitaciones, temperatura media, amplitud térmica, velocidad del viento, humedad) y articulándolas eficazmente, pueden resolver cabalmente las necesidades de disposición final o aprovechamiento de los efluentes tratados. Estos procesos, pueden ser clasificados en:

- **Fisicoquímicos (FQ):** hacen uso de las diferencias en ciertas propiedades entre el contaminante y el agua (sedimentación y flotación), o mediante la adición de reactivos cambian la forma del contaminante a otra de mayor facilidad para separarlo del agua.
- **Biológicos (B):** utilizan microorganismos que se alimentan de la materia orgánica contaminante y así la eliminan, en forma de nuevas células, que se separan fácilmente del agua. Se puede considerar que las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en estos procesos son las mismas que se realizan en el medio natural (ríos, lagos, suelo), solo que, en forma controlada dentro de tanques o reactores, y a velocidades de reacción mayores.

Otra clasificación que puede hacerse de los procesos de tratamiento de aguas residuales está basada en su grado de complejidad o de mecanización. Existen los procesos tecnificados compactos e intensivos, con tecnología desarrollada específicamente para cada etapa del proceso, y los llamados naturales y extensivos, que requieren mayor superficie disponible, ciertas características climáticas en el sitio de implementación y se basan en la acción de los procesos naturales con reducida intervención humana. Los sistemas lagunares, los lechos y los humedales constituyen los procesos naturales más conocidos.

A continuación, se describen los principales procesos utilizados en el tratamiento de aguas residuales (FAO, 2013):

- **Tratamiento preliminar:** filtrado y eliminación de materiales sólidos gruesos y otros materiales grandes, que se hallan en suspensión en las aguas residuales crudas (Tabla 6).

Etapa	Objetivo
Rejas o tamices	Eliminación de sólidos gruesos
Trituradores	Desmenuzamiento de sólidos
Desarenadores	Eliminación de arenas y gravilla
Desengrasadores	Eliminación de aceites y grasas
Pre-aireación	Control de olores y mejoramiento del comportamiento hidráulico

Tabla 6 - Etapas y objetivos del tratamiento preliminar de aguas residuales

- Tratamiento primario: sedimentación simple de sólidos en un tanque de sedimentación primario. Las partículas sólidas se asientan en el fondo, y los aceites y grasas suben a la superficie. Este material que se deposita en el fondo del tanque, es eliminado como lodo para tratamiento en forma diferenciada.

El tratamiento primario, llevado a cabo correctamente, es capaz de remover una fracción importante de la carga orgánica, que puede representar entre el 25% y el 40% de la Demanda Biológica de Oxígeno (DBO₅) y entre el 50% y el 65% de los sólidos suspendidos.

Entre los tipos de tratamiento primario se citan:

- Sedimentación primaria
 - Flotación
 - Precipitación química
 - Filtros gruesos
 - Oxidación química
 - Coagulación, floculación y filtración
- Tratamiento secundario: La reducción de los compuestos orgánicos presente en el agua residual, acondicionada previamente mediante tratamiento primario, se realiza exclusivamente por procesos biológicos. Este proceso reduce o convierte la materia orgánica dividida y/o disuelta, en sólidos sedimentables floculantes que puedan ser separados por sedimentación en tanques de decantación.

Los procesos biológicos más utilizados son los lodos activados y filtros percoladores. Son muchas las variantes de estos procesos que se utilizan para hacer frente a los requerimientos específicos de cada tratamiento.

Dentro de este grupo se incluyen las lagunas de estabilización y aireadas, así como emplear oxígeno puro y procesos anaeróbicos. Los tratamientos biológicos de esta categoría tienen una eficiencia de remoción de DBO₅ entre el 60% y 90% (Tabla 7).

Tratamiento secundario	Tipos
Fijación biológica	Baja capacidad (filtros clásicos); Alta capacidad (filtros comunes, biofiltros, aerofiltro).
Lodos activados	Convencional; Alta capacidad; Contacto y estabilización; Aireación prolongada.
Lagunas de estabilización	Aeróbicas; Facultativas; Maduración.
Lagunas aireadas	Mezcla completa; Aireada facultativa; Facultativa con aireación mecánica.
Otros	Anaeróbicos (Contacto. Filtro anaeróbico); Reactor anaeróbico de flujo ascendente); Oxígeno puro.

Tabla 7 - Tipos de tratamiento secundario de aguas residuales

- Tratamiento terciario: implica la eliminación de contaminantes específicos, como nitrógeno, fósforo y/o contaminantes industriales. El efluente luego puede desinfectarse para eliminar microorganismos perjudiciales mediante cloración o desinfección ultravioleta.

Las sustancias o compuestos comúnmente removidos son:

- Fosfatos y nitratos
- Huevos y quistes de parásitos
- Sustancias tensioactivas
- Algas
- Bacterias y virus (desinfección)
- Sólidos totales y disueltos

Aun hoy por diversas dificultades, principalmente falta de recursos y capacitación adecuada, en muchos lugares del mundo, las aguas residuales se usan frecuentemente en agricultura sin tratamiento alguno, generando riesgos a la salud de las personas. Es por esto que se han centrado los esfuerzos para que se haga más usual, el tratamiento de las aguas residuales, al menos en un nivel secundario, previamente a su reutilización en agricultura. Teniendo en cuenta, que el efluente tratado a un nivel secundario aún contiene nutrientes de valor para los agricultores, mientras que algunos tratamientos terciarios eliminan el nitrógeno y el fósforo (ingredientes fundamentales para la fertilización). Generalizar esta práctica, con regulaciones apropiadas de uso y medidas preventivas, llevará poder integrar la RART y la agricultura con mayor eficiencia, y a su vez, solucionar problemas de salud pública.

2.6 Usos

Potencialmente se puede reutilizar agua residual tratada en aplicaciones y procesos que no requieren agua potable de alta calidad (Tabla 8).

Categorías de reutilización	Aplicación típica
Riego agrícola	Riego de cultivos forrajeros, hortícolas y forestales; Viveros comerciales
Riego paisajístico	Parques; Patios de la escuela; Centros y banquetas de autopista y rutas; Campos de golf; Cementerios; Cinturones verdes; Residencial
Reciclaje industrial y reutilización	Agua de refrigeración; Alimentación de calderas; Agua de proceso; Construcción pesada.
Recarga de agua subterránea	Reposición de agua subterránea; Control de intrusión de agua salada; Control de hundimiento
Usos recreativos / ambientales	Lagunas y estanques; Mejoras de humedales/pantanos y lagunas; Aumento de flujo de cursos naturales o antropizados; Pesca; Nieve artificial.
Usos urbanos no potable	Protección contra incendios; Aire acondicionado; Descarga del inodoro.
Reutilización potable	Mezcla en depósitos de suministro de agua; Mezcla en agua subterránea; Suministro directo de agua de tubería a tubería.

Tabla 8. Principales categorías y aplicaciones típicas más implementadas de RART

Esto proporciona una fuente alternativa de suministro de agua para un amplio espectro de actividades, aumentando las fuentes disponibles, ayudando a satisfacer las necesidades presentes de agua, sin comprometer las necesidades futuras. A medida que estos usos se realicen con mayor asiduidad, utilizando los recursos de forma óptima, con soluciones innovadoras y desarrollando regulaciones ambientales más puntuales y eficientes, se gestionarán de manera sustentable el consumo de agua y las descargas de aguas residuales.

La aplicación de un proyecto de RART, puede ser definido por una necesidad intrínseca de una región de una fuente de agua (aridez, relleno de acuíferos para evitar la intrusión de agua de mar en las napas freáticas, etc.) o por la calidad del efluente tratado que, de acuerdo a los tratamientos a disposición, se pueda obtener. En ambos casos, la planificación comienza analizando los pros y contras de esta práctica, siendo algunos de los criterios más relevantes por evaluar: Impacto ambiental en la región; Impacto socio-cultural; Viabilidad técnica y legal; Acuerdo con la comunidad; Impacto en la salud pública; Justificación económica (financiera y de mercado).

Las principales **desventajas** de la implementación de un proyecto de RART son:

- Riesgos potenciales para la salud
- Riesgo potencial para el medio ambiente
- Contaminación de Suelos
- Contaminación de Acuíferos
- Posibles afecciones a la biota
- Percepción pública negativa
- Desarrollo legislativo incipiente
- Necesidad de organización e implementación interdisciplinaria – No Individual

Principales **ventajas** de poner en funcionamiento proyectos de RART:

- Recurso estratégico en zonas de estrés hídrico
- Reducción de las presiones sobre el recurso hídrico
- Recurso constante (no fluctuante)
- Tratamiento in situ de un residuo
- Evitar vertidos directos
- Usar el efecto depurador de suelo/vegetación
- Tecnologías de tratamientos previos muy desarrolladas
- Relación costo/beneficio positivo, con respecto al uso de agua convencional

2.6.1 RART para riego en agricultura

El caso puntual de la reutilización de aguas residuales para riego agrícola, también presenta elementos positivos y negativos, al momento de analizar un proyecto de esta índole. Involucra claros beneficios ambientales, productivos, sociales y económicos. Como los que se resumen a continuación:

- Gran potencial de uso
 - Convirtiendo un efluente urbano en un insumo para la producción primaria
 - Calidad del efluente (insumo a reutilizar) menos restrictiva que otros usos
- Sustituye la extracción de aguas subterráneas
 - Representa la protección del sistema hídrico local y ahorros económicos en los costos de bombeo
- Aprovechamiento de nutrientes
 - Contribuye a aumentar el rendimiento de los cultivos
 - Reducción de costes por fertilización
- Gran variedad de tecnologías aplicables
- Garantía de recurso constante (bajas fluctuaciones anuales de caudal)
 - Siendo una opción para los agricultores de alcanzar una estabilidad hídrica confiable a corto, mediano y largo plazo, minimizando las fluctuaciones hídricas estacionales

En cuanto a las dificultades de implementación, son varios los aspectos por tener en cuenta.

- Idoneidad agronómica del agua residual tratada (*FAO, 2003*)
 - Nutrientes y oligoelementos (N, P, K, Ca, Mg, Sulfatos)
 - Fitotoxicidad en concentraciones excesivas
 - Excesivo crecimiento foliar y retraso en la maduración
 - Se presentan desbalanceados para los requerimientos de cultivo
 - No siempre presentes en formas asimilables
 - Pueden generar toxicidad en el forraje para el ganado
 - Pueden generar biopelículas en tuberías
 - Proliferación de algas en canales o contenedores abiertos
 - Salinidad (Total de sólidos disueltos, conductividad eléctrica)
 - Posibilidad de problemas osmóticos en los cultivos
 - Necesidad de riego en exceso y suelos con muy buen drenaje
 - Estos efectos pueden verse minimizados por la presencia de nutrientes
 - Sodicidad (Tasa de adsorción de Na)
 - Potenciado por otros iones (Ca y Mg) y la salinidad del agua
 - Afecta el horizonte principal del suelo
 - Reduce capacidad de infiltración y aireación (impermeabilización del suelo)
 - Puede corregirse mediante aplicación de yeso
 - Toxicidad, por iones específicos
 - Sodio (de uso doméstico/ablandadores)
 - Cloro residual
 - Boro (Detergentes; usos industriales)
 - Otros metales, Fe, Cr, Mb, Cd.
 - Genera fitotoxicidad (daño a las hojas, enfermedades degenerativas, menor productividad)
 - Sólidos en suspensión, en el agua de riego (Partículas y/o algas en suspensión)
 - Taponamiento de infraestructura de riego, en especial rociadores y goteros
- Riegos sanitarios debido a la aplicación de técnicas de riego (*OMS, 2006*)
 - Contaminación directa de productos comestibles o forrajes (riesgo para los consumidores)
 - Transmisión de patógenos por el aire, pulverización en riego por aspersión
 - Contacto directo de trabajadores o personas ajenas
 - La elección del sistema de riego es esencial para evaluar el riesgo potencial de la RART
- Cambios en la estructura/composición del suelo
 - pH, estando fuera de los parámetros apropiados, puede aumentar la solubilización de ciertos compuestos nocivos, como metales.
 - Materia Orgánica (MO)
 - Estabilización de la estructura del suelo
 - Aumenta retención de agua
 - Mejora capacidad buffer y CIC
 - Incrementa disponibilidad de contaminantes

- Nutrientes y oligoelementos
 - Mayor disponibilidad
 - Perturbación de actividad metabólica microbiana
 - Aumento de Lixiviación
 - Riesgo potencial de eutrofización
- Salinidad
 - Salinización y sodificación
 - Impacto negativo en la fertilidad del cultivo
 - Cambios en la estructura microbiana del suelo
- Otros contaminantes
 - Toxicidad y lixiviado
 - Acumulación en suelos
 - Impacto negativo en la fertilidad
 - Modificaciones en la biomasa microbiana del suelo (reducción, tolerancia)
- Riesgos ambientales
 - Contaminantes orgánicos y emergentes
 - Elementos de uso frecuente: Antibióticos, compuestos de higiene personal, plastificantes, tensioactivos, subproductos de desinfección
 - Presentes en bajas concentraciones en los efluentes urbanos
 - No se eliminan por completo en los tratamientos preliminares, primarios y secundarios
- Opinión pública
 - Imprescindible la inclusión de la comunidad en la etapa previa y durante la implementación del proyecto
 - Se debe informar adecuadamente para lograr aprobación y participación ciudadana
- Monitoreo y control
 - Esencial para el control de calidad agronómico y sanitario
 - Previo al inicio, durante el proceso y al finalizar la vida útil del proyecto
 - Debe ser periódico, determinando los tiempos y métodos apropiados para cada variable por analizar
 - Incremento del costo del proyecto

3 HIPÓTESIS, OBJETIVOS Y OBJETIVOS ESPECÍFICOS

3.1 Objetivo General

Evaluar el enriquecimiento de Nitrógeno en el suelo regado con agua residual tratada y con ello su impacto ambiental *in situ* y su potencial movimiento en el suelo hacia áreas no regadas, en el ensayo de reutilización instalado en el predio de la planta depuradora de Ingeniero Jacobacci.

3.2 Objetivos específicos

Partiendo del objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos.

- Proponer y validar un balance de Nitrógeno en la reutilización de aguas residuales tratadas de la planta de Ingeniero Jacobacci (Río Negro) en cultivos forrajeros, en base a la información recolectada en temporadas precedentes y análisis complementarios.
- Desarrollar una propuesta de monitoreo de acumulación y movimiento de Nitrógeno en el suelo para el sistema de estudio.

3.3 Hipótesis

La aplicación de agua residual tratada va a enriquecer el suelo en Nitrógeno, pero la cosecha de material permitirá mantener los niveles de Nitrógeno inorgánico en valores no tóxicos para las plantas y evitará el movimiento de este nutriente en el suelo.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Proyecto de RART en Ingeniero Jacobacci

La localidad de Ing. Jacobacci se localiza en la región centro-sur de la Provincia de Río Negro. En esta ciudad funciona una Planta de Tratamiento de Aguas cloacales, de tipo laguna facultativa desde el año 2013 (Figura 4), que recibe de un barrio de 220 familias, y un caudal aproximado de efluentes domiciliarios de 160.000 litros día⁻¹.



Figura 4 - Planta de Tratamiento Ing. Jacobacci, fotografía de Laguna Facultativa.

En un principio estas aguas recicladas, mediante tratamiento secundario, se disponían para riego de una pequeña forestación de olivillos (*Elaeagnus angustifolia*) y álamos (*Populus alba*) (Figura 5). Los excedentes escurrían por gravedad al mallín en el faldeo norte del predio (Figura 6).

El mallín, por sus características y relevancia ecosistémica, representa un área ambientalmente sensible, considerando la cercanía de la zona urbana y el impacto ambiental que puede tener en el sistema hidrológico de la cuenca del Huahuel Niyeo. Es por esto que se planteó una disposición más eficiente de los efluentes provenientes de la Planta de tratamiento.



Figura 5 – Disposición final del efluente en riego forestal, en el año 2014.



Figura 6 – Situación del Mallín en 2014, excedentes del efluente cloacal.

4.1.1 Características del área de trabajo

La Provincia de Río Negro tiene una superficie total de 203.013 km², con una vasta meseta en el centro de la misma, que se corresponde a zonas áridas. La zona centro-sur de la Provincia integra los dos tercios de la superficie de la Argentina que presenta balances hídricos negativos la mayor parte del año.

La ciudad de Ing. Jacobacci es el principal núcleo urbano de la denominada Línea Sur de la Provincia de Río Negro, localizada en las coordenadas geográficas 41° 19' 50" S y 69° 32' 50" O (Figura 7), se ubica a 213 km al Este de San Carlos de Bariloche y a 615 km al Oeste de Viedma, capital de la Provincia. Se estima en la actualidad una población urbana y rural superior a los 10.000 habitantes, siendo su principal actividad económica la ganadería ovina.



Figura 7 - Ubicación de Localidad Ingeniero Jacobacci en Provincia de Río Negro.

Ingeniero Jacobacci se corresponde al Gran Paisaje de Depresiones y Planicies Bajas, que se caracteriza por un ecosistema xérico, con un estado de desertificación medio a grave, que se acentúa debido a los vientos de la región, predominantes del cuadrante oeste y con velocidades máximas medias mensuales superiores a los 30 km/h, prácticamente durante todo el año (Barrio y Martín, 2012). Estas características, generan severas limitantes hídricas y térmicas para el desarrollo de la vegetación natural y cultivada en las áreas urbanas y rurales. Como también para todo tipo de actividades productivas, y en muchos casos hasta se dificulta el abastecimiento de agua para consumo humano (Godagnone y Bran, 2009). Esta condición se ve agravada en los últimos años por sequías prolongadas y caída de cenizas volcánicas en el año 2011, que han reducido sustancialmente el rendimiento de los pozos de abastecimiento de agua para consumo.

El uso de agua de pozo para riego, dentro de esta realidad es una alternativa poco sustentable y que pondría en riesgo la disponibilidad para consumo humano.

4.1.1.1 Clima

Como mencionamos previamente, el clima de la región es árido, con inviernos muy fríos y veranos secos y ventosos. La precipitación media anual varía de 150 a 210 mm (período 1942-1991; Bustos, 1993), concentrada en los meses más fríos (Tabla 9).

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Jacobacci	6,7	10,4	15	13,3	23,5	22,6	19,7	15,7	13,9	14,3	6,8	8,1	170

Tabla 9 - Precipitaciones medias mensuales [mm/mes] (Sitio Piloto Jacobacci INTA)

La temperatura media anual varía entre 7 y 10 °C (Tabla 10). En la localidad de Jacobacci la temperatura media del mes más cálido es de 15 °C, la temperatura media del mes más frío es de -0,5 °C y se ha registrado como mínima absoluta -30 °C (período 1942-1991; *Bustos, 1993*).

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Anual
Jacobacci	15,1	13,9	12,3	8,9	4,4	3,8	1,1	0,5	4,8	8	10,7	15	8,2

Tabla 10-Temperaturas medias mensuales [°C] (Sitio Piloto Jacobacci – INTA)

4.1.1.2 Suelo

El predio donde está instalada la planta de tratamiento de efluentes cloacales de Ingeniero Jacobacci, es una zona de planicies bajas asociadas al mallín que bordea el arroyo Huahuel Niyeo, en esta zona, dominan suelos moderadamente profundos a profundos, de textura uniforme con frecuente presencia de carbonatos de calcio y pedregosidad media (Petrocalcides típicos, Paleargides líticos; Petroargides típicos y Haplocalcides típicos). Allí se observa una pendiente suave sur-norte que baja abruptamente en el extremo norte del predio hacia el mallín mencionado.

Al caracterizar el suelo, previo a la instalación del ensayo, se observó la existencia de un horizonte arenoso franco medianamente profundo, verificando a los 80 cm la presencia de un horizonte arcillo/gravilloso de difícil penetración con la pala. Los primeros 20 cm del perfil, muestran una reacción moderadamente alcalina y conductividad eléctrica baja, concentración pobre de materia orgánica y en consecuencia de nitrógeno, una relación C/N acorde a lo esperado en suelos minerales, y niveles de fósforo disponibles muy bajos. La capacidad de retener agua de los suelos del ensayo (CC-PMP) es también muy baja, inferior al 5%, compatible con la observación realizada a campo de las texturas arenosas (Tabla 11), sólo se observaron valores levemente mayores en las muestras en profundidad, probablemente por la aparición de material más arcilloso. En estos suelos es esperable observar un drenaje rápido del agua al menos en los primeros 80 cm.

Sector de ensayo	Forrajeras		
	0-20	20-40	40-60
Prof. en cm			
pH agua (1:2,5)	8,33		
Conductividad eléctrica (1:2,5) (dS/m)	0,1		
% Materia orgánica	0,5		
% Nitrógeno total	0,04		
Relación C/N	7		
Fósforo disponible (Olsen)	2,19		
Capacidad de Campo (CC)	9,1	9,6	9,6
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	5,6	5,9	6,1

Tabla 11. Determinación de variables edáficas iniciales en el sitio del ensayo

4.1.1.3 Hidrología

La zona de la cuenca Huahuel Niyeo es la fuente más importante de abastecimiento de agua con potencialidad en el nivel freático y en el primer nivel artesiano, de buen rendimiento y calidad

química óptima (CFI, DPA - 1991). Se define esta zona de gran potencial para la explotación por medio de pozos (Figura 8). El área la recorren arroyos de régimen de deshielo, en su mayoría son líneas de drenaje de los cañadones formados en las mesetas que corren hacia los niveles más bajos, en algunos casos cruzan transversalmente el sitio de implantación de la planta urbana de Ing. Jacobacci con dirección Sur-Norte hasta llegar al Huahuel Niyeo. Este Arroyo (el principal de la zona), no está asociado a una escorrentía permanente, su dinámica está vinculada a procesos de deshielo y regímenes de lluvias muy fuertes. El curso es divagante, de poca profundidad, que va cambiando el área de inundación.

Estas características de la cuenca, respecto al saneamiento de aguas residuales domiciliarias, indican que no se puede aplicar el concepto de capacidad de vuelco. Existe, además, un conjunto de aspectos hidrológicos y ambientales, que limitan la posibilidad de tratamiento con sistemas individuales de diferentes tipos: pozos y cámaras sépticas, lechos nitrificantes o filtros biológicos, entre estos aspectos cabe destacarse los siguientes:

- La napa de agua está a muy pocos metros con una variabilidad estacional importante, que en algunos momentos llega a menos de 1 metro de profundidad.
- Las bajas temperaturas que inhiben la actividad bacteriana.

En cuanto al aspecto de disponibilidad de agua potable, la capacidad de recarga del nivel de terraza donde se asienta la planta urbana tiene condiciones adecuadas. Por esta característica, es una de las fuentes explotadas para el bombeo de agua potable. Allí los pozos de agua y perforaciones oscilan entre 3 y 30 m de profundidad. Sin embargo, por no contar con una red de captación de efluentes domiciliarios en el centro urbano, los fenómenos potenciales de contaminación limitan su utilización. Esto se debe al tipo de tratamiento domiciliario existente de los líquidos cloacales, que en su mayoría son pozos sin cámara séptica, que en algunos sectores llegan a la napa.

Es entonces, por las características propias de la cuenca, y la actividad antrópica, que la calidad del agua es variable, desde aptas para el consumo (aunque presentan elevada dureza) a no aptas por el alto contenido de sulfatos, el exceso de flúor, presencia de nitritos (Bran et al, 2010) y posibles casos de contaminación por microorganismos patógenos.



Figura 8 – Cuenca Huahuel Niyeo y ubicaciones de sitios relevantes respecto al proyecto de RART.



Figura 10 – Locación de la Planta de tratamiento de efluentes, respecto al Centro Urbano

4.1.2.2 Calidad del efluente

Desde el inicio del convenio se realizaron muestreos estacionales en otoño, invierno y primavera del afluente y efluente de la planta, midiendo distintos parámetros físicos, químicos y biológicos (Res. Prov. n° 885 n° 886) que permitieran caracterizar el funcionamiento de la planta y la calidad del efluente para su disposición con riego (Tabla 12).

Según lo analizado las aguas residuales tratadas provenientes de la planta depuradora de Ing. Jacobacci cumplen con los parámetros de la Res. 1423/15 del DPA, para riego, con las siguientes observaciones:

- El efluente se encuentra cercano al límite de pH, se recomienda el monitoreo en el suelo de este valor y el de conductividad eléctrica.
- La presencia de algas en el efluente afecta las posibilidades de desinfección y el uso de sistemas de riego localizado lo que hace necesario el afinamiento del efluente.

PARAMETROS FISICO-QUIMICOS	Resultados	Unidad
pH	8,63	
Conductividad	1735	mS cm ⁻¹
RAS	5,9	
Grasas y Aceites	<LC=0,1	mg L ⁻¹
Sólidos Sed. en 10 minutos	0,4	ml L ⁻¹
Sólidos Sed. en 2 horas	0,8	ml L ⁻¹
Sólidos Totales en Suspensión	118	mg L ⁻¹
ANIONES	Resultados	Unidad
Sulfatos	161	mg L ⁻¹
Cloruros	145	mg L ⁻¹
Fluoruros	0,98	mg L ⁻¹
Sulfuros	ND	mg L ⁻¹
Cianuro	ND	mg L ⁻¹
Agroquímicos	ND	mg L ⁻¹
CATIONES (más relevantes)	Resultados	Unidad
Sodio	227,6	mg L ⁻¹
Boro	ND	mg L ⁻¹
Manganeso	0,19	mg L ⁻¹
Manganeso	0,19	mg L ⁻¹
Bario	0,042	mg L ⁻¹
Hierro total	3,233	mg L ⁻¹
Aluminio	3,444	mg L ⁻¹
Arsénico	0,0046	mg L ⁻¹
Cadmio	<LC=0,1	mg L ⁻¹
Cobre	0,006	mg L ⁻¹
Cromo total	0,0035	mg L ⁻¹
Mercurio	<LC=0,2	mg L ⁻¹
Plomo total	0,001	mg L ⁻¹
Calcio	81,9	mg L ⁻¹
NUTRIENTES	Resultados	Unidad
N Kjeldahl	48	mg L ⁻¹
Nitratos	9	mg L ⁻¹
Fosforo total	0,246	mg L ⁻¹
PARAMETROS ORGÁNICOS	Resultados	Unidad
Demanda Biológica de oxígeno	166	mg L ⁻¹
Demanda Química de oxígeno	367,4	mg L ⁻¹
Detergentes	<LC=0,3	mg L ⁻¹
Fenoles	ND	mg L ⁻¹
PARAMETROS MICROBIOLÓGICOS	Resultados	Unidad
Bacterias aerobias	1,2 x 10 ⁻⁶	UFC/ml
Coliformes totales	1,6 x 10 ⁻⁷	NPM/1000 ml
Coliformes fecales	9 x 10 ⁵	NPM/100 ml
Pseudomonas aeuroginosas	Ausencia	NPM/100 ml
Helmintos (comprende al <i>Phylum Nematode</i> y Platelminotos)	0	Huevos/1000 ml

Tabla 12 – Determinaciones de parámetros físico-químicos, bacteriológicos, orgánicos e inorgánicos del efluente de la planta depuradora, previo al inicio del ensayo. (CIATI, 2015).

4.1.3 Descripción del ensayo de reutilización de aguas residuales tratadas para riego.

Como parte del Plan de trabajos definido al momento de la firma del Convenio de Cooperación Técnica, a principios de 2016 se instaló dentro del predio de la Planta de tratamiento de líquidos cloacales de Ing. Jacobacci un ensayo de RART para la producción de forraje y material leñoso, con la finalidad de determinar qué cultivo es el más adecuado para maximizar el aprovechamiento de las aguas residuales tratadas y minimizar el impacto ambiental de la disposición final de los efluentes mediante el riego (Figura 11).

En el ensayo se compara la aplicación de agua de perforación (AL) y agua residual tratada (AT) en forraje (alfalfa y campo natural) y en biomasa leñosa (olivillo y sauce), con el objetivo de evaluar el resultado de ambos tratamientos en la productividad y en el impacto sobre variables físico químicas del suelo. El agua de perforación se obtiene de un pozo que bombea agua del acuífero freático en el área de la planta de tratamiento, y el agua residual tratada es derivada directamente de la salida de la planta de tratamiento.



Figura 11 – Planta de tratamiento (laguna facultativa); ensayo de RART; y predio contiguo del DPA con destino de ampliación de superficie regada.

4.1.3.1 Selección de especies forrajeras

Se contemplaron las condiciones climáticas restrictivas de la región para el desarrollo de cultivos, y múltiples factores como las condiciones intrínsecas de aridez, la ausencia de periodos sin heladas, vientos fuertes, constantes, desecantes y la escasa fertilidad del suelo.

Por lo tanto, para la selección de especies, los lineamientos principales considerados fueron:

- La adaptabilidad de las especies seleccionadas a las características ambientales (climáticas y edafológicas) del sitio.

- El requerimiento hídrico, para aprovechar el efluente cloacal.
- La posibilidad de su aprovechamiento económico en la generación de bienes (forraje), servicios ambientales (mejoramiento de fertilidad de suelos, control de erosión) y vinculación con la realidad socio-económica y productiva de la zona.

En función de lo señalado para uno de los tratamientos se seleccionó *Medicago sativa* "alfalfa" (muy utilizada como cultivo en proyectos de RART – FAO, 2013). La alfalfa se cultiva como forraje en muchos países del mundo, principalmente en aquellos de clima templado. La Argentina con más de 5,5 millones de hectáreas cultivadas en la actualidad es uno de los principales productores en el mundo (Basigalup D., 2007). En la Provincia de Río Negro la superficie cultivada con alfalfa pura se estima en 4 mil hectáreas (Cancio et al., 2013).

La difusión del cultivo se apoya en sus altos rendimientos de materia seca (MS) T ha⁻¹, su excelente calidad forrajera y adaptabilidad a diversas condiciones ambientales (suelo, clima y manejo). Por otro lado, su capacidad para la fijación del Nitrógeno atmosférico a través de la simbiosis con *Rhizobium meliloti* la convierte, también, en un importante componente de la sustentabilidad de los sistemas productivos. Puede ser aprovechada por el ganado como forraje luego de procesos de conservación en húmedo (ensilado o henificado), o en seco (fardos, rollos) o como pastoreo directo.

Para mantener altas producciones de forraje, la especie requiere de una apreciable cantidad de humedad. Heichel (1983) analizando información de diversas condiciones climáticas, concluyó en que como promedio general se requieren entre 56 y 73 mm de agua para obtener 1 T ha⁻¹ de MS. Algunos autores (Donovan T.J. y Meek B.D., 1983) han estimado que para producir 1 T ha⁻¹ de MS en zonas semiáridas se necesitan 83 mm de agua.

En el ensayo fue utilizada semilla de la variedad Picasso 617 (grupo 6). Esta es una variedad sintética desarrollada a partir de germoplasma élite nacional y extranjero (norte americano y australiano), seleccionada por su alta producción de forraje y persistencia, vigor de las plantas al cabo de varios años de aprovechamiento, resistencia a enfermedades de corona, raíz y pulgones y recomendada por su buen rendimiento en ensayos en la región.

El segundo tratamiento, el campo natural, consistió en la remoción de la vegetación natural para la sistematización del terreno, permitiendo luego, la proliferación de la vegetación espontánea en las parcelas demarcadas en forma aleatorizada. Se consideró a este tratamiento como el uso en forraje con la mínima intervención posible en el terreno, y por lo tanto el más accesible en cuanto a tecnología y costos.

4.1.3.2. Diseño experimental

Dadas las limitaciones que impone el sistema de riego, se definió un diseño experimental de parcelas divididas donde el tipo de agua utilizada para riego, efluente cloacal tratado (AT) y agua de perforación (AL), es el factor principal. Dentro de este factor, se aleatorizó el tratamiento por tipo de forraje.

4.1.3.3 Especificaciones técnicas

Tamaño y número de parcela

El tamaño del ensayo en general y de las parcelas en particular se seleccionaron fundamentalmente en función de la disponibilidad de agua de perforación. Se requería un tamaño mínimo que permitiera evaluar lo planteado, pero la escasa disponibilidad de agua de pozo limitaba la superficie a regar por lo que se seleccionó un tamaño de 2 m x 3 m con 3 repeticiones para cada tratamiento (tipo de agua de riego) de modo que la superficie total del ensayo es de 72 m² (Figura 12).

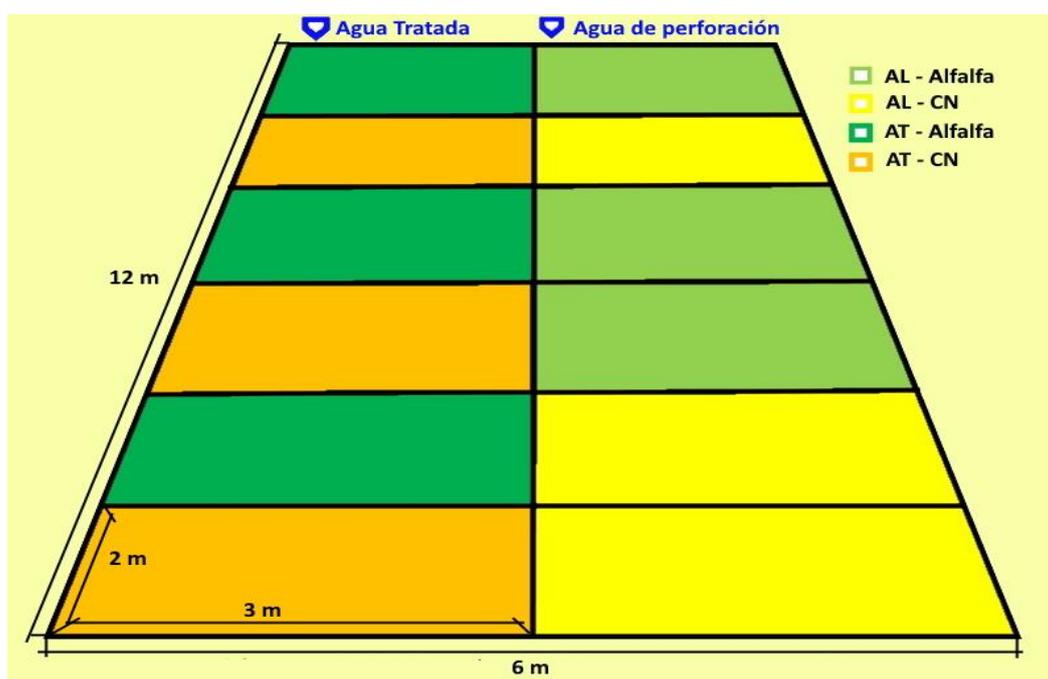


Figura 12 – Diagrama de distribución de parcelas del ensayo de RART.

Estimación de dotación de riego

El objetivo del riego es disponer la mayor cantidad posible de efluente cloacal tratado y que no se produzcan encharcamientos, ya que esto es negativo para los cultivos. Por esta razón, el diseño de la demanda hídrica se realizó en función del mes de máxima temperatura media y menos precipitación (mes de enero), según datos climáticos locales, y se planificó operar el sistema con esa dotación de riego durante toda la temporada de crecimiento. De acuerdo a estos datos, se estimó por Blaney y Criddle (*Doorenbos y Pruitt, 1977*) una evapotranspiración diaria media de 4,5 mm y una evapotranspiración potencial del cultivo de 5,5 mm. El sistema de riego seleccionado fue por melgas, del tamaño de cada parcela experimental (6 m²). En este tipo de sistema, el agua avanza por un espacio de suelo a modo de franjas, contenida por bordes construidos para ese fin, de manera que el agua se mueve encajonada desde la cabecera hasta el pie de cada franja/parcela. Considerando que el sistema de riego por superficie es ineficiente y se tenía como objetivo disponer la mayor cantidad de agua posible, se estimó aplicar una lámina de aproximadamente 12 mm día⁻¹ en cada parcela. En volumen esto implica un requerimiento de agua de 900 litros día⁻¹ para las 12 parcelas.

Diseño de almacenamiento y distribución de las aguas de riego

Al momento de planificar el ensayo (Figura 13), no había servicio eléctrico en el predio, por lo que se diseñó una instalación sin presurización, usando la carga hidráulica, y automatizado mediante controladores a batería.

Para el almacenamiento de agua se instalaron dos tanques intermedios de 2000 L cada uno, uno para cada tipo de agua a utilizar en el ensayo (AL, AT). El dimensionamiento de los mismos, se basó en la cantidad de litros estimada para cubrir la demanda, como también lograr carga hidráulica necesaria para la correcta irrigación.

El agua tratada es conducida a través de una cañería de PVC desde una estación de bombeo junto a la laguna de tratamiento, hasta el tanque de almacenamiento adyacente al ensayo. Para la provisión del agua de pozo fue necesario instalar una tubería de Polietileno (PE) de 2" enterrada desde la perforación de bombeo al tanque de almacenamiento.

Para definir los tiempos de riego necesarios para satisfacer las demandas calculadas, una vez finalizada la instalación del sistema se probó en las parcelas el caudal erogado por los tres picos ubicados en la cabecera. En función de dicho caudal, la lámina calculada y la superficie afectada por cada uno se calculó el tiempo de riego para cada sistema.

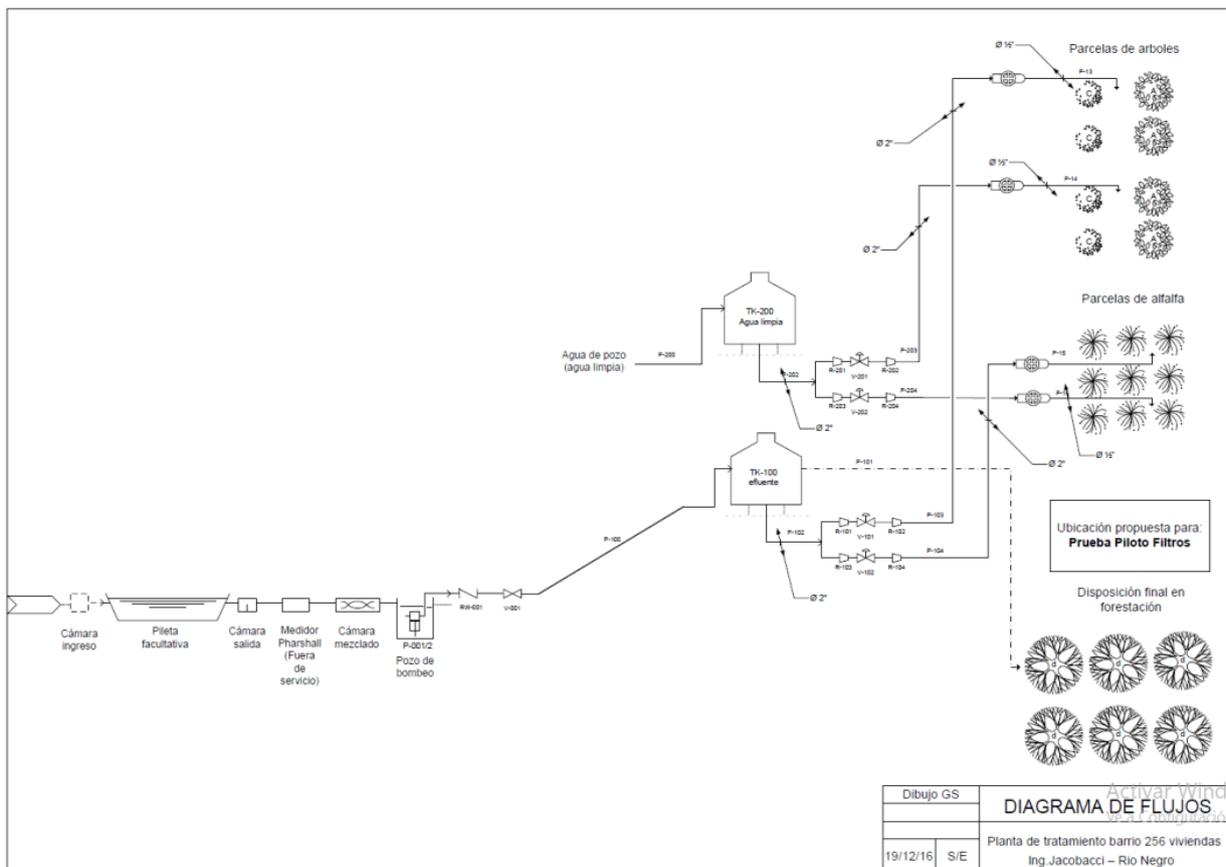


Figura 13 – Representación esquemática del ensayo (actividades, procedimientos e infraestructura).

4.2 Toma de muestras

Las muestras utilizadas en este proyecto final integrador, se tomaron en mayo de 2018 en el contexto del proyecto de RART ya mencionado (INTA-UNRN), con iguales métodos a los utilizados al inicio del proyecto, en 2016. Luego fueron almacenadas, clasificadas, procesadas y analizadas en el laboratorio de suelos del (INTA EEA-Bariloche).

4.2.1 Técnicas de muestreo

Suelo: En mayo de 2018, se tomaron muestras simples de suelo, con barreno, en cada parcela de ensayo, a intervalos de 20 cm cada uno, hasta 80 cm de profundidad.

Al ingresar al laboratorio, las muestras se secaron en estufa a 40°C y se pasaron por tamiz de 2 mm y se molieron hasta un tamaño de partícula de 0,5 mm (Figura 14).

Adicionalmente, se realizó muestreo de suelo de cada parcela, y fuera del ensayo, para determinar Densidad aparente. La técnica utilizada fue la del anillo de volumen conocido. Al ingreso al laboratorio, se secaron en la estufa y se registró el peso de cada una.

Biomasa: Para la cuantificación de la productividad primaria neta aérea de forrajeras, se cortó y recolectó el material aéreo en tres momentos a lo largo de cada temporada (2017 y 2018), utilizando cuadros de 1/5 m², dejando una altura de alrededor de 10 cm para permitir la continuidad del crecimiento.

Las muestras de biomasa fueron identificadas a campo (fecha, tipo de agua, vegetación y número de parcela).



Figura 14 – Muestras de suelo 2ª temporada, procesadas – Laboratorio de suelos (EEA INTA Bariloche).

4.3 Análisis de laboratorio, técnicas aplicadas

Una vez clasificadas las muestras, de acuerdo al orden de prioridades, se realizaron los siguientes análisis (Sparks et al 1996):

- pH y conductividad eléctrica en agua (suspensión 1:2,5 relación suelo:agua)
- Materia Orgánica (MO) – Determinación de Carbono orgánico oxidable por mezcla oxidante fuerte, escala semi-micro, según la Norma Argentina IRAM SAGyP 29571-2
- Nitrógeno Kjeldahl
- Nitrógeno inorgánico – Destilación de Bremner, método de destilación que implica una extracción con KCl 1 mol/l y destilación por pasos: primero amonio+nitrato y luego nitrato solo, y titulación con ácido sulfúrico. (Figura 15)

Con las muestras de material vegetal cosechado, se cuantificó:

- Peso seco de biomasa - Mediante secado en estufa a 60° C, hasta peso constante y pesado en balanza granataria de precisión.
- % de Nitrógeno en biomasa - Por el método Kjeldahl (Westerman, 1995. Soil testing and plant analysis. 3rd edition)



Figura 15 – Destilador para determinación de N inorgánico, Amonio y Nitrato - Laboratorio de suelos (EEA INTA Bariloche).

Es importante aclarar que la metodología de muestreo y de análisis de suelo realizada sobre las muestras tomadas en 2018 es idéntica a la utilizada en los datos obtenidos al inicio del ensayo (año 2016) realizados fuera del marco de este TFI.

4.4 Balance de nitrógeno

4.4.1 Fundamento teórico

Para evaluar las variables que influyen en la dinámica del Nitrógeno en el sistema planta-suelo, el punto de partida fueron las siguientes ecuaciones generales de balance de Nitrógeno total (Nt) en un agrosistema y en suelo (Álvarez, 2015).

$$\Delta N \text{ agrosistema} = (N \text{ fijado} + N \text{ lluvia} + N \text{ fertilizante}) - (N \text{ exportado} + N \text{ volatilizado} + N \text{ desnitrificado} + N \text{ lixiviado}) \quad \text{(Ecuación 1.a)}$$

$$\Delta N \text{ suelo} = (N \text{ residuos muertos} + N \text{ lluvia} + N \text{ fertilizante}) - (N \text{ absorbido} + N \text{ volatilizado} + N \text{ desnitrificado} + N \text{ lixiviado}) \quad \text{(Ecuación 1.b)}$$

Teniendo en cuenta la finalidad de este trabajo y los datos disponibles, se adaptaron algunos términos de ambas fórmulas (combinándolas), se determinaron supuestos de análisis y se planteó la siguiente ecuación general de balance de *Nitrógeno total Estimado* para el suelo del sitio de estudio.

$$Nt \text{ final Estimado} = Nt \text{ inicial} + Nt \text{ aportado} - Nt \text{ extraído} \quad \text{(Ecuación 2.a)}$$

Donde:

Nt inicial = Nitrógeno total inicial Medido en 2016, previo a establecer el ensayo

Nt aportado = Nitrógeno total aportado por el agua de riego en cada temporada

Nt extraído = Nitrógeno total extraído por cosecha de biomasa en cada temporada

Las temporadas de análisis fueron 2016/2017 y 2017/2018. El Nt final se estimó a partir de los datos medidos en suelo al inicio del ensayo y los parámetros que se detallan a continuación.

4.4.2 Componentes del balance - Mediciones, estimaciones y supuestos

Para estimar el balance de Nitrógeno total final en el período de estudio, e identificar el comportamiento de este nutriente en el sistema suelo-planta, se utilizaron datos empíricos obtenidos del análisis de suelo, en el laboratorio (sección 4.3), y datos de agua facilitados por otras instituciones (DPA) (Tabla 12). También fue necesario incorporar algunos supuestos teóricos, en base a la bibliografía.

Los parámetros analíticos utilizados para los cálculos del balance fueron los siguientes:

Parámetros de laboratorio	Fecha de muestreo
% N inicial	Diciembre 2016
NH ₄ ⁺ inicial	Diciembre 2016
NO ₃ ⁻ inicial	Diciembre 2016
N en hojas	2017/2018

Tabla 13 – Parámetros analíticos iniciales, utilizados para el cálculo de balance de Nitrógeno.

De los muestreos surgieron los valores de:

- **Peso seco** de la biomasa, medido en Kg MS ha⁻¹. Se sumaron las cosechas de los tres cortes por temporada para cada parcela.
- **Volumen de riego por parcela**. Cuantificación de la lámina de riego (L m⁻²), unidad final utilizada L ha⁻¹. Se registró diariamente, durante la temporada de riego (272 días) el volumen real de riego de cada una de las parcelas. Estos datos se promediaron, obteniendo así un volumen de agua para cada grupo de parcela.
- **Peso de la Capa arable**. Para calcular este parámetro se utilizaron los valores obtenidos del muestreo de densidad aparente para cada parcela del ensayo. De esta manera se pudo cuantificar el Nitrógeno, presente en el suelo, pasándolo de % de Nitrógeno (medido) a Kg N ha⁻¹.
- **El Nitrógeno total**, presente en el suelo del sistema a analizar es Nitrógeno Kjeldahl sumado al Nitrato (Nt= Nt Kjeldahl+ NO₃⁻)
- Se unificaron los datos de estratos de suelo 0-20 y 20-40 cm, contemplando un sistema suelo-planta al estrato 0-40 cm, delimitando así la zona de mayor desarrollo de raíces de la vegetación.

Se consideraron también los siguientes supuestos:

- Nitrógeno presente en agua de perforación: se considera despreciable (N en AL= 0)
- Nitrato presente en agua de perforación: se considera despreciable (NO₃⁻ en AL=0)
- Las pérdidas de Nitrógeno (en cualquiera de sus formas) por inmovilización, desnitrificación (*Weil y Brady, 2017*) y lixiviación se consideran en principio despreciables

Respecto a la lixiviación, se utilizarán los datos medidos en horizontes por debajo de los 40 cm para determinar la validez del supuesto enunciado.

Por lo tanto, la ecuación extendida de balance final es:

$$Nt_{final\ Estimado} = Nt_{inicial} + Nt_{aportado} - Nt_{extraído} \quad \text{(Ecuación 2.b)}$$

Donde:

$$Nt_{inicial\ (2016)} [Kg\ ha^{-1}] = [(\%NKj \times 100) \times (Peso\ de\ capa\ arable)] + NO_3^-_{inicial}$$

$$Nt_{aportado} [Kg\ ha^{-1}] = [Volumen\ de\ riego\ por\ parcela \times (NKj\ en\ agua + NO_3^- \ en\ agua)]$$

$$Nt_{extraído} [Kg\ ha^{-1}] = (Peso\ seco \times N\ en\ hoja)$$

Esta ecuación se aplicó a cada parcela. La distribución de datos, los cálculos y resultados, se trabajaron en una planilla de cálculos.

4.5 Procesamiento de datos y análisis estadístico

El balance descripto (para el estrato 0-40 cm) se calculó por parcela partiendo de los datos de Nt medidos al inicio del ensayo (Nti) obteniéndose el Nt final estimado por parcela (NtfE). El Nt del final del período analizado (2018) es denominado como Nt final medido (NtfM). Para describir los datos se calcularon las diferencias entre NtfM y Nti, entre NtfE y Nti y entre NtfE y NtfM.

4.5.1 Evaluación del ajuste del modelo de balance

Para estudiar la relación entre el NtfM y el NtfE calculado con el balance y su relación de ajuste, se realizó un análisis de correlación entre ambas variables, aplicando el coeficiente de Pearson (r) y una regresión lineal (método de cuadrados mínimos).

4.5.2 Análisis de Varianza (ANOVA)

Para el análisis de los parámetros medidos y estimados, y establecer las diferencias estadísticas entre tratamientos se realizó análisis de la varianza. Se planteó un modelo acorde al diseño experimental del ensayo, de parcelas divididas, donde se tomó "Tipo de agua" como factor principal, contemplando las "parcelas" como estructura anidada en el factor principal, y la Vegetación junto al Tipo de agua como interacción bifactorial, de acuerdo a la ecuación.

Se planteó el siguiente diseño estadístico:

$$Y_{ijk} = \mu + a_i + b_j + ab_{ij} + c_{k(i)} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde:

μ = Efecto promedio.

a = Efecto Tipo agua (AL-AT) $i = 1,2$

b = Vegetación (Alfalfa-CN) $j = 1,2$

ab = Experimento bifactorial (Tipo agua*Vegetación)

c = Parcelas (1,2,3) anidada en Tipo de agua. $k = 1,2,3$

ε = Error experimental (anidad en todos los factores)

Se contempla aplicar a posteriori una prueba de Tukey para determinar diferencias significativas entre pares de tratamientos. Se utilizó el software estadístico INFOSTAT (*Di Rienzo et al, 2017*).

5 RESULTADOS

Los resultados de la ecuación (*Ecuación 2.b*) de balance de Nitrógeno total (Estimado y Medido), partiendo del Nt inicial medido en 2016, para las parcelas unificadas (con sus errores estándar correspondientes, E.E.) de ambos cultivos en los dos tipos de agua de riego utilizado, se resumen en la Tabla 14.

Tipo agua	Vegetación	Ntotal inicial Medido (Kg ha ⁻¹)	Error Estandar	Ntotal Estimado 1a temp (Kg ha ⁻¹)	Error Estandar	Ntotal Estimado 2a temp (Kg ha ⁻¹)	Error Estandar	Ntotal final Medido (Kg ha ⁻¹)	Error Estandar
L	Alfalfa	1750,47	326,18	1057,4	298,75	-325,10	273,05	1672,10	189,49
L	CN	1727,17	100,93	1602,3	106,75	1284,67	70,58	1605,62	143,40
T	Alfalfa	1632,6	104,33	2243	184,08	1922,53	25,65	2654,88	196,19
T	CN	2171,41	249,59	3280,06	254,45	3708,57	366,16	2429,63	160,60

Tabla 14 – Resumen de resultados de la ecuación de balance propuesta, para cada temporada y por parcela de ensayo.

5.1. Análisis general de los datos

- NtfM respecto del Nti

En la Figura 16, se identifica que el aumento sustancial de nitrógeno total del suelo, se encuentra en las parcelas de Alfalfa regadas con agua residual tratada. Esta acumulación de Nt en el suelo indica que la remoción de biomasa (con la cosecha) no retira todo el nitrógeno suministrado a través del riego.

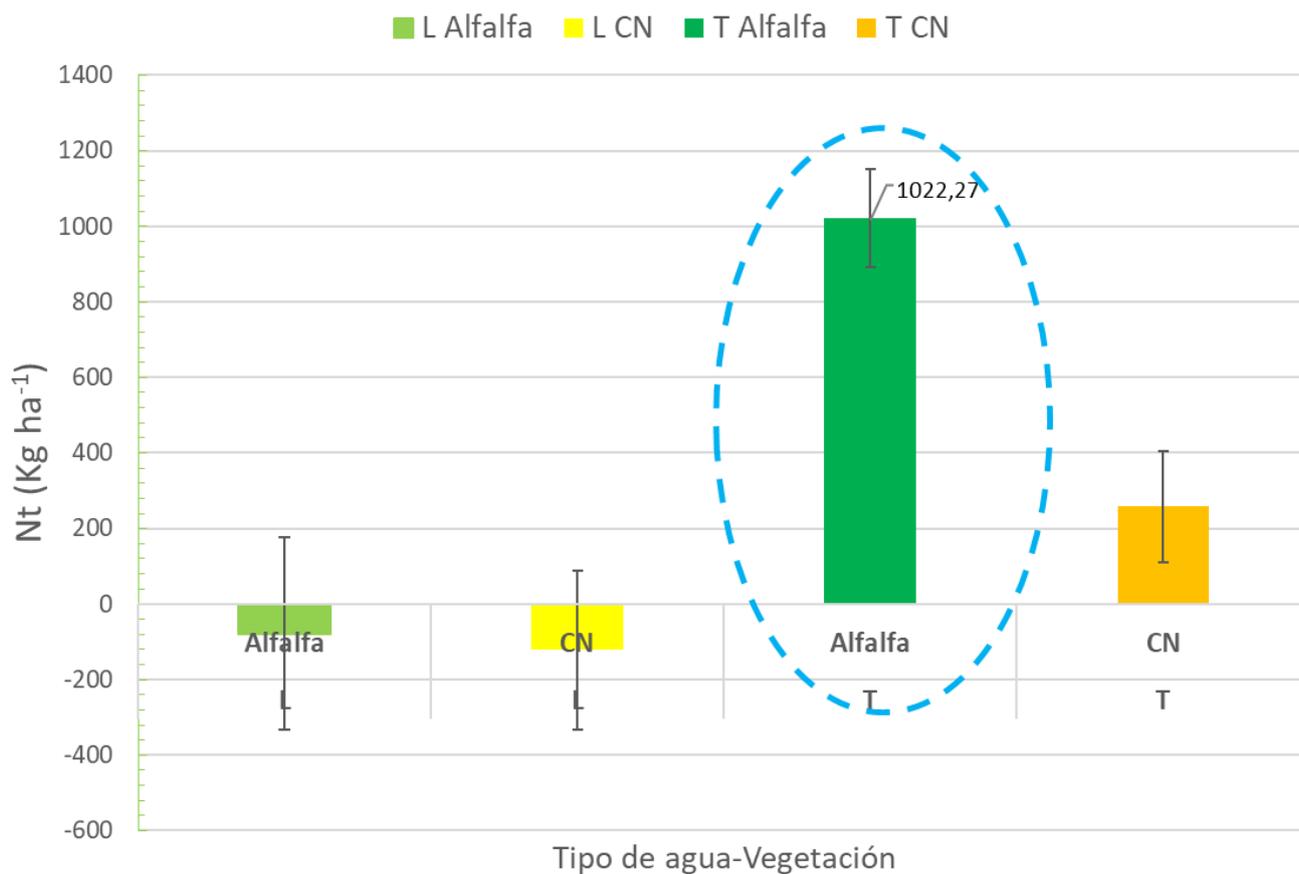


Figura 16 –Variación del Nt medido (Nt_{fM}-Nt_i).

- Nt_{fE} respecto del Nt_i

En la Figura 17, se observan valores estimados (segunda temporada) menores a lo medido inicialmente en las parcelas regadas con agua de perforación (AL) y en contraposición, valores mayores en las parcelas de Agua tratada (AT).

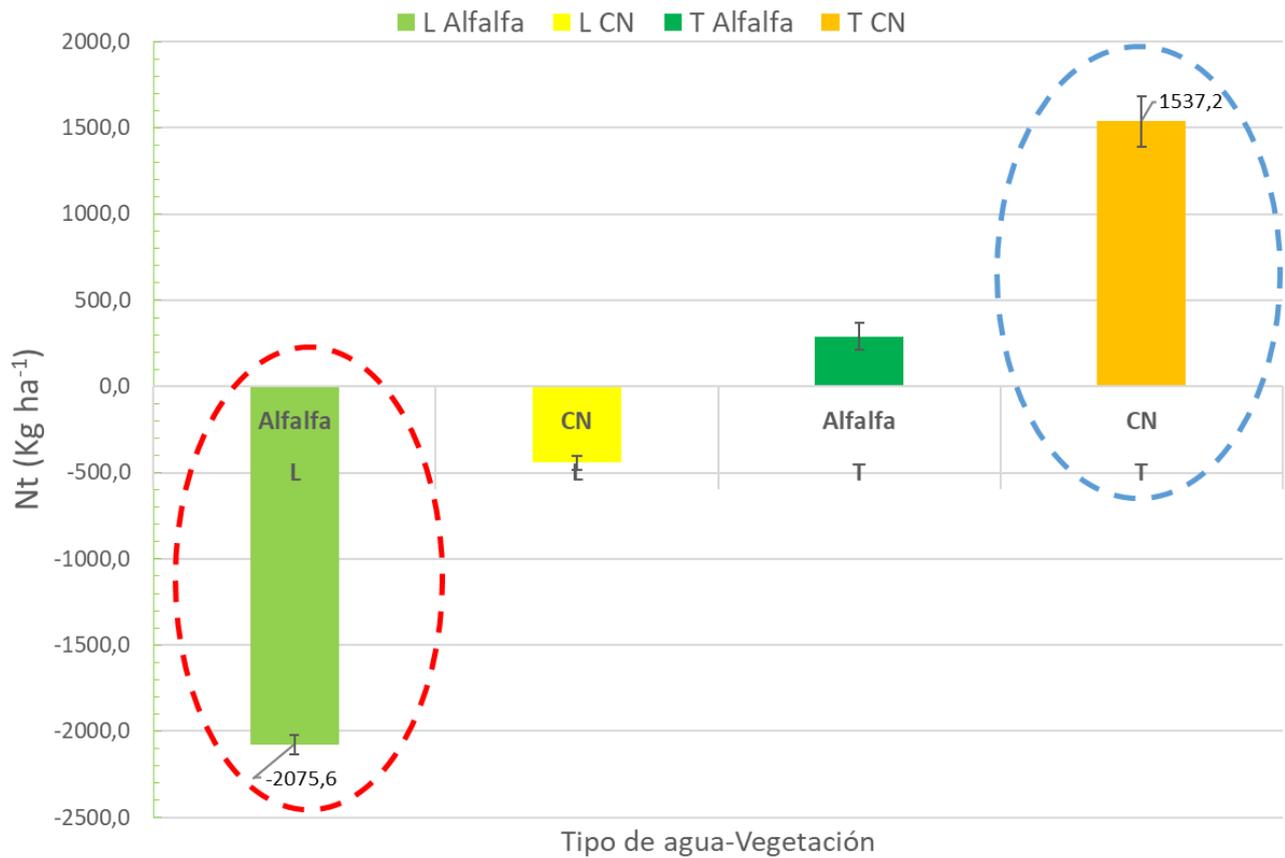


Figura 17 – Variación del Nt final estimado respecto al Nt inicial medido (NtE-Nti).

- NtE respecto del NtM

En este parámetro (Figura 18), se evidencia con mayor claridad la tendencia que muestra la ecuación de balance de Nt (Tabla 14), donde surgen valores negativos de dicha variable en los tratamientos regados con agua de perforación. Al analizar la variación para el mismo periodo entre las mediciones y las estimaciones, observamos que el balance tiende a subestimar la acumulación del nutriente en el sistema, para las parcelas de alfalfa.

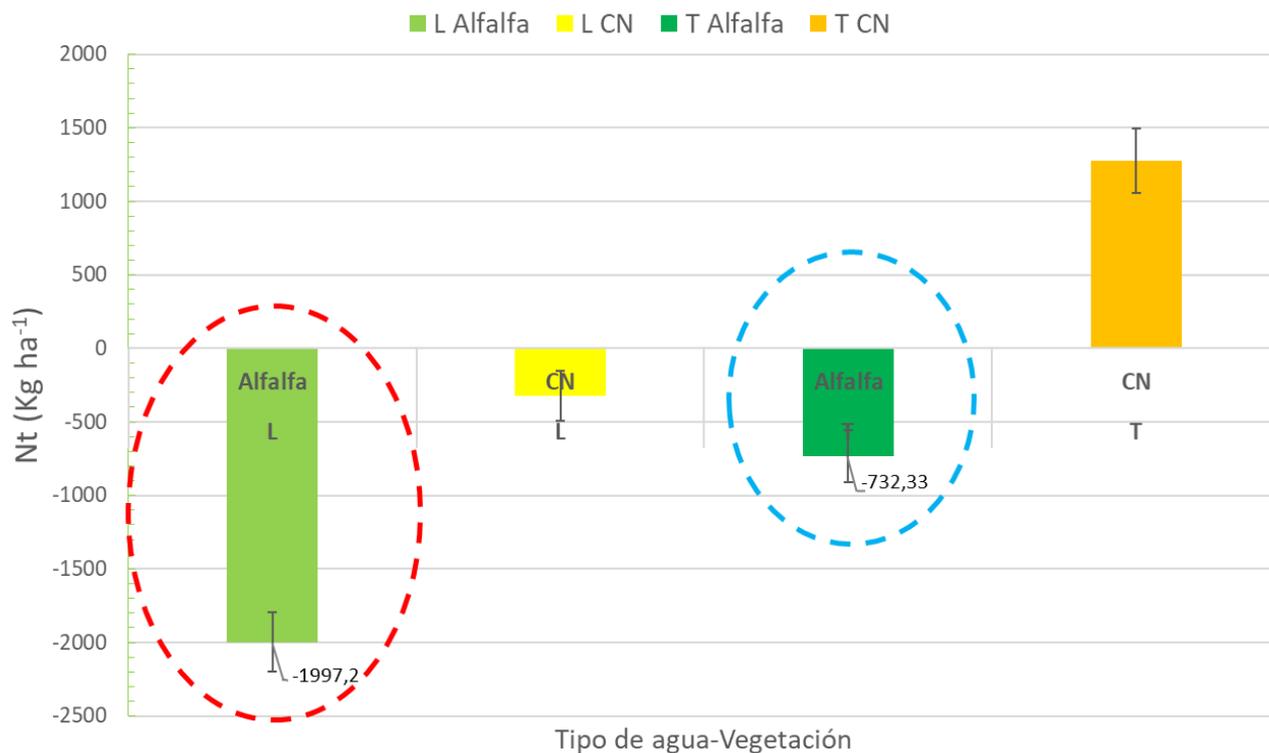


Figura 18- Delta Nt final estimado vs. Nt final medido ($Nt_fE - Nt_fM$).

Otras observaciones relevantes que surgen al analizar los resultados son:

- Nt medido al final de cada año aumenta durante las dos temporadas de análisis en las parcelas regadas con Agua Tratada
- Nt estimado de la primera temporada, aumenta respecto del valor inicial.
- Nt final medido muestra amplias diferencias con las estimaciones para ese período, sin embargo, es similar a los valores estimados para la primera temporada.
- Se observó mayor acumulación de Nt_{fM} que Nt_{fE} en todas las situaciones excepto en CN.

5.2 Ajuste del modelo (Correlación y regresión lineal)

En la Tabla 15 se muestran los resultados de aplicar la correlación de Pearson y la regresión lineal entre las estimaciones y mediciones de Nitrógeno total final para todos los datos en conjunto ($n=12$) y luego por grupos de acuerdo a los tratamientos estudiados, es decir, por tipo de agua ($n=6$) y por tipo de vegetación ($n=6$). Se observa que el modelo presenta una correlación buena y significativa ($r=0,66$ y $p=0,02$) y un ajuste razonable ($R^2=0,44$) para todos los datos en conjunto (Figura 19), pero que ambos parámetros mejoran notoriamente si los datos se agrupan por tipo de vegetación ($r>0,9$ y $R^2>0,82$) (Figuras 20 y 21) y empeoran si se clasifican por tipo de agua. Éstos últimos análisis son en base a pocos datos ($n=6$) como para ser concluyentes, pero indicarían que el tipo de vegetación con la que se trabaje es relevante para plantear un modelo de dinámica de nitrógeno en los sistemas de reúso.

Coeficientes y estadísticos asociados	Ntf E v.s Ntf M	Ntf E vs. Ntf M (AL)	Ntf E vs. Ntf M (AT)	Ntf E vs. Ntf M (Alfalfa)	Ntf E vs. Ntf M (CN)
Correlación de Pearson					
Coeficiente de correlación de Pearson	0,66	0,03	-0,15	0,91	0,94
p	0,02	0,95	0,77	0,0121	0,0054
n	12	6	6	6	6
Regresión lineal					
R ²	0,44	0,00095	0,02	0,83	0,88
N	12	6	6	6	6
p	0,02	0,95	0,77	0,01	0,01

Tabla 15 – Resumen de resultados de Correlación de Pearson y Regresión lineal para NtfE vs. NtfM, y factores principales diferenciados.

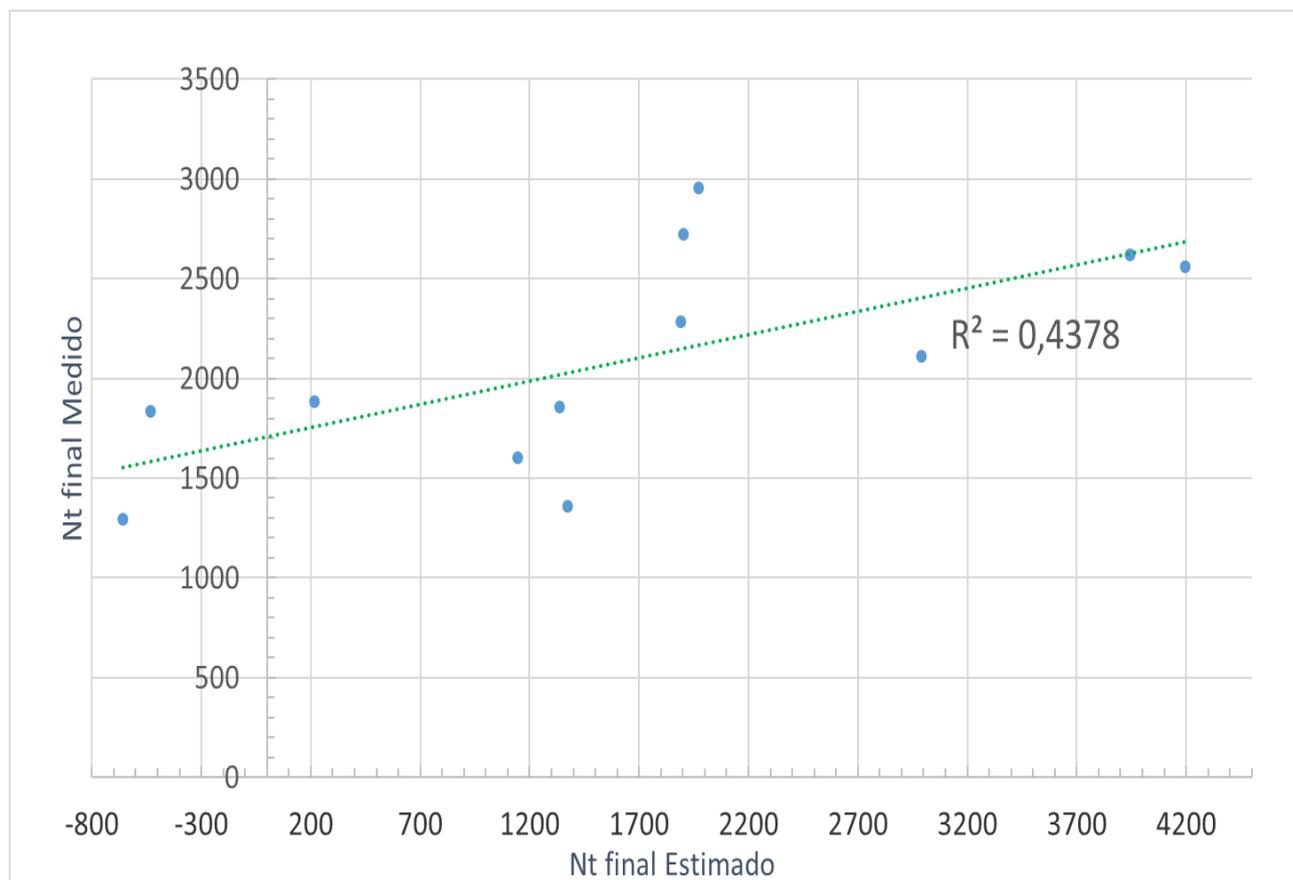


Figura 19 – Regresión, línea de tendencia y R², Ntf E vs. Ntf M para todos los datos en conjunto.

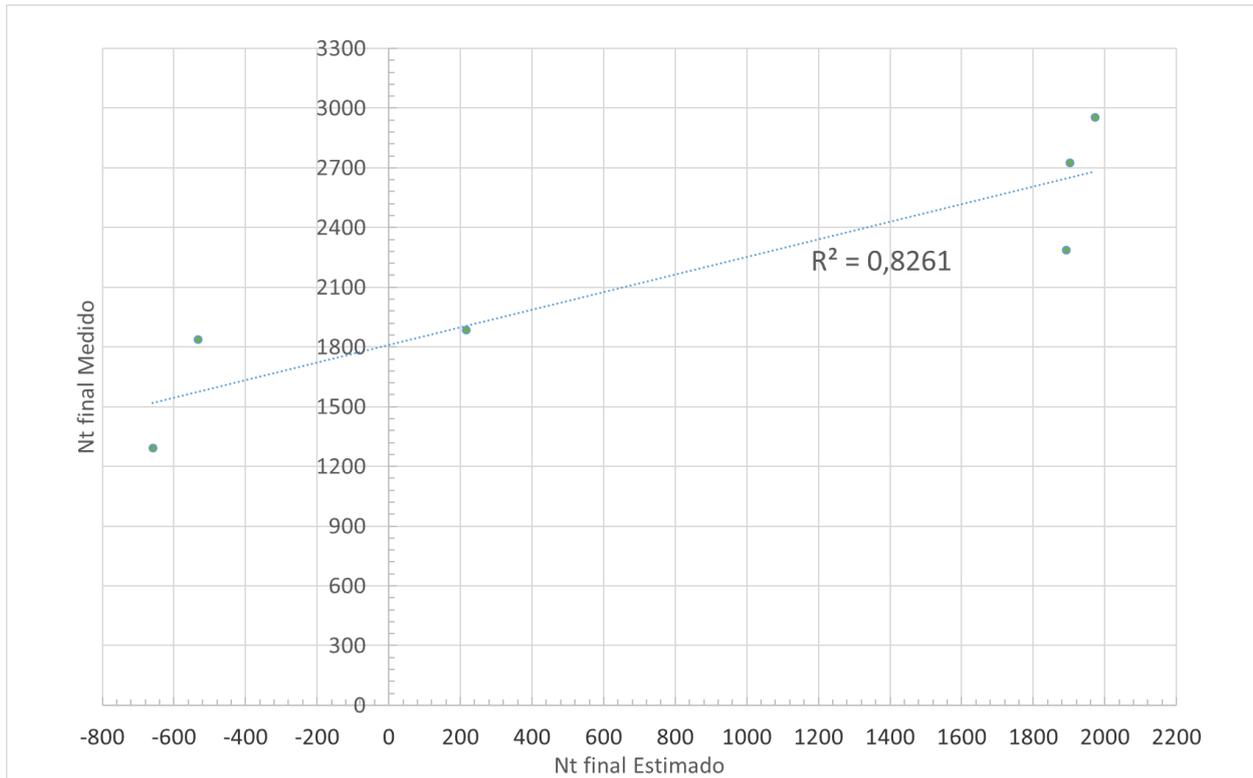


Figura 20 – Regresión, línea de tendencia y R^2 , Ntf E vs. Ntf M. – Alfalfa (AT y AL).

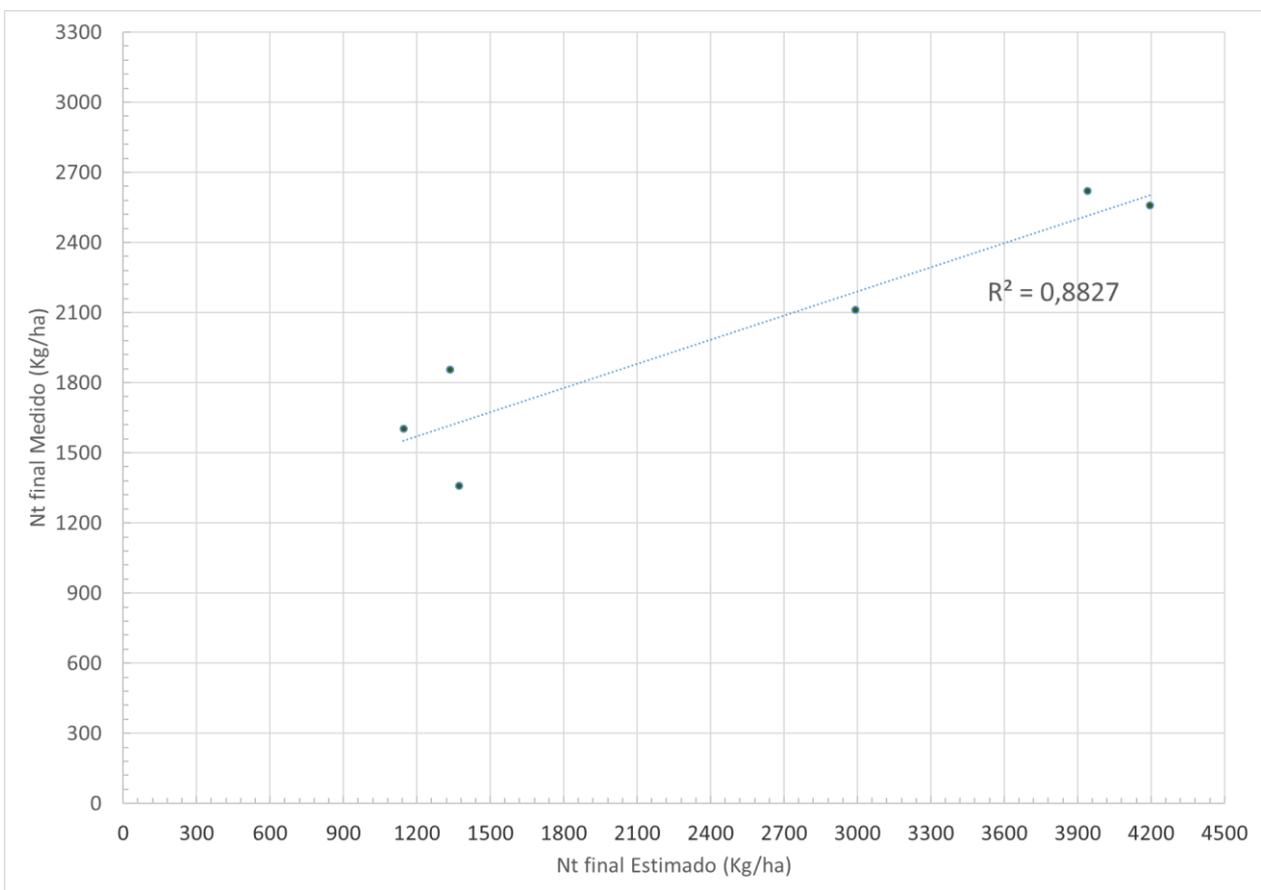


Figura 21 – Regresión, línea de tendencia y R^2 , Ntf E vs. Ntf M – Campo natural (AT y AL).

5.3 Comportamiento del Nitrógeno total del suelo en los diferentes tratamientos

Con el modelo descrito (sección 4.5.2), se realizó el análisis de varianzas para las variables Ntf M, Ntf E y la variación entre Ntf M y Ntf E (Delta NtfM-NtfE) (Tablas 16 a 19 - ANEXO II).

Los resultados de los ANOVA se resumen en la Tabla 20, y muestran que el modelo es significativo ($p < 0,05$) en todos los casos de estudio mencionados.

Otra observación relevante es que no es significativa la interacción entre factores (Vegetación*Tipo agua) pero sí lo son las diferencias entre Tipo de agua. Esto permite realizar una comparación estadística entre todos los factores del modelo, mediante la prueba de Tuckey (Tablas 16 a 19 - ANEXO II).

En la Figura 22, se muestran las diferencias significativas de Nt para las estimaciones y mediciones, al evaluar la combinación de factores.

Comparación de análisis de varianza - Ntf M y Ntf E						
Modelo	Nt final medido		Nt final estimado		Delta Nt E vs M	
	F	p-valor	F	p-valor	F	p-valor
Modelo	6,3	0,0472	25,2	0,0037	19,84	0,0059
Tipo agua	21,58	0,0097	93,29	0,0006	60,53	0,0015
Tipo agua>Parcela	1,68	0,3145	1,2	0,4314	0,84	0,5658
Vegetación	0,94	0,3865	59,26	0,0015	84,07	0,0008
Vegetación*Tipo agua	0,28	0,6251	0,16	0,7099	0,69	0,4517

Tabla 20 – Comparación sintetizada de análisis de varianza (Ntf E vs. Ntf M)

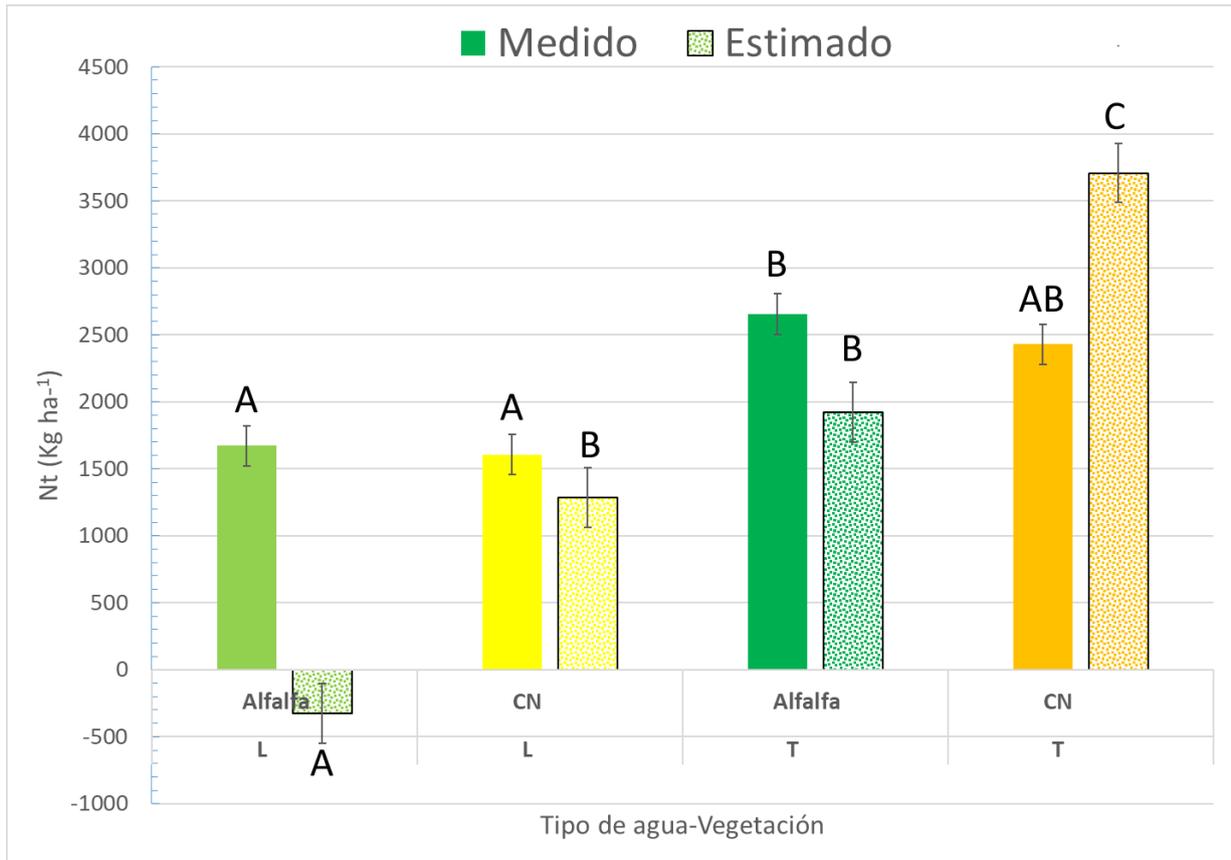


Figura 22 – Nitrógeno total final (Estimado y Medido) para cada tratamiento (letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos para cada parámetro).

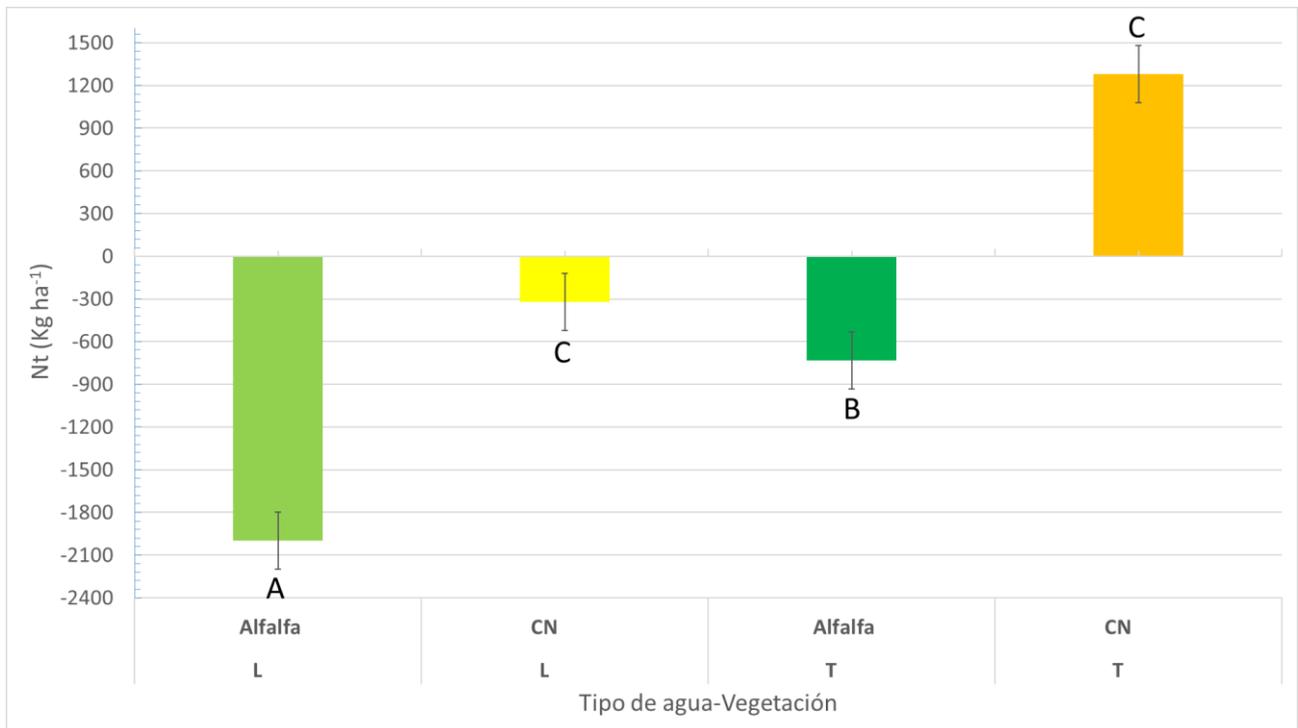


Figura 23 – Variación de Nitrógeno total final (Estimado-Medido), las letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Al analizar la variación de Ntf entre estimaciones y mediciones (Figura 23), se observa que, en el caso de las parcelas sembradas con alfalfa, existen diferencias significativas entre tipos de agua.

5.4 Análisis de Amonio y Nitrato

Con el fin de evaluar el movimiento y la posibilidad de acumulación de Nitrógeno, en el suelo regado con ART, se caracterizó la concentración de Amonio y Nitrato en todo el perfil (0-80 cm) al final de la segunda temporada de riego. Los datos obtenidos se muestran en las Figuras 24 y 25.

Como primera observación se puede destacar que en ningún caso se encontró mayor concentración de NH_4^+ o NO_3^- , en el último estrato (60-80 cm) respecto del primero (0-20 cm). Esto es coincidente con investigaciones precedentes, las cuales muestran que el aporte de N a través de una enmienda orgánica, puede reflejar, en períodos medios (mínimo 4 años), una menor acumulación de nitrato y menos pérdidas por lixiviación, respecto a las prácticas agrícolas convencionales con aplicación fertilizantes (Dalal, 1992; Miller et al., 2008).

Para todos los tratamientos, en este diseño experimental, se detectó mayor concentración de Nitrato (5,12 a 43,02 mg Kg^{-1}) respecto del Amonio (5,81 a 13,23 mg Kg^{-1}).

La tendencia que se observa del análisis de estas formas de Nitrógeno en profundidad (40-60 cm y 60-80 cm) muestran que, comparando por factor Vegetación, el Amonio siempre es mayor en Agua de perforación (Figura 24) y el Nitrato es mayor en agua tratada (Figura 25).

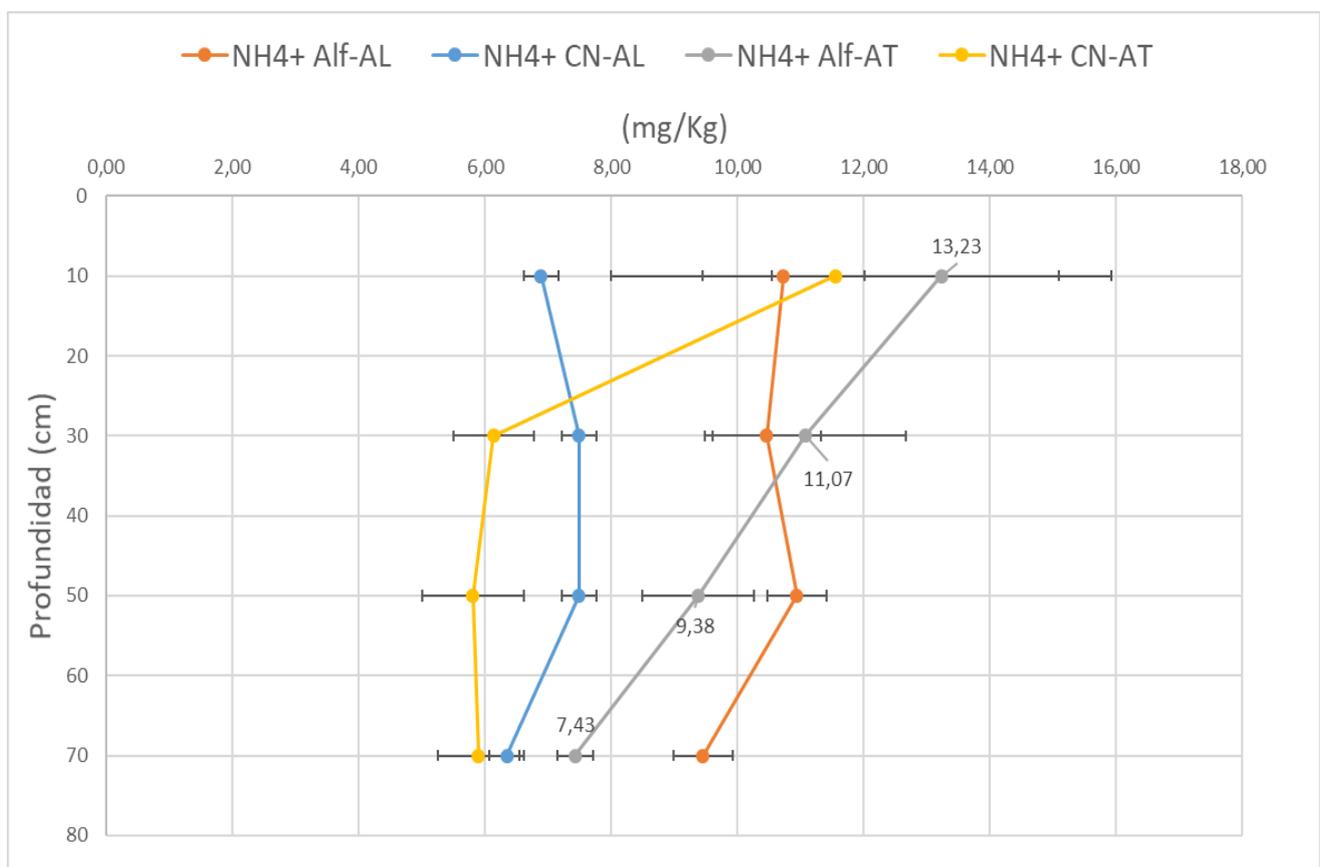


Figura 24 – NH_4^+ final en perfil completo (AT y AL).

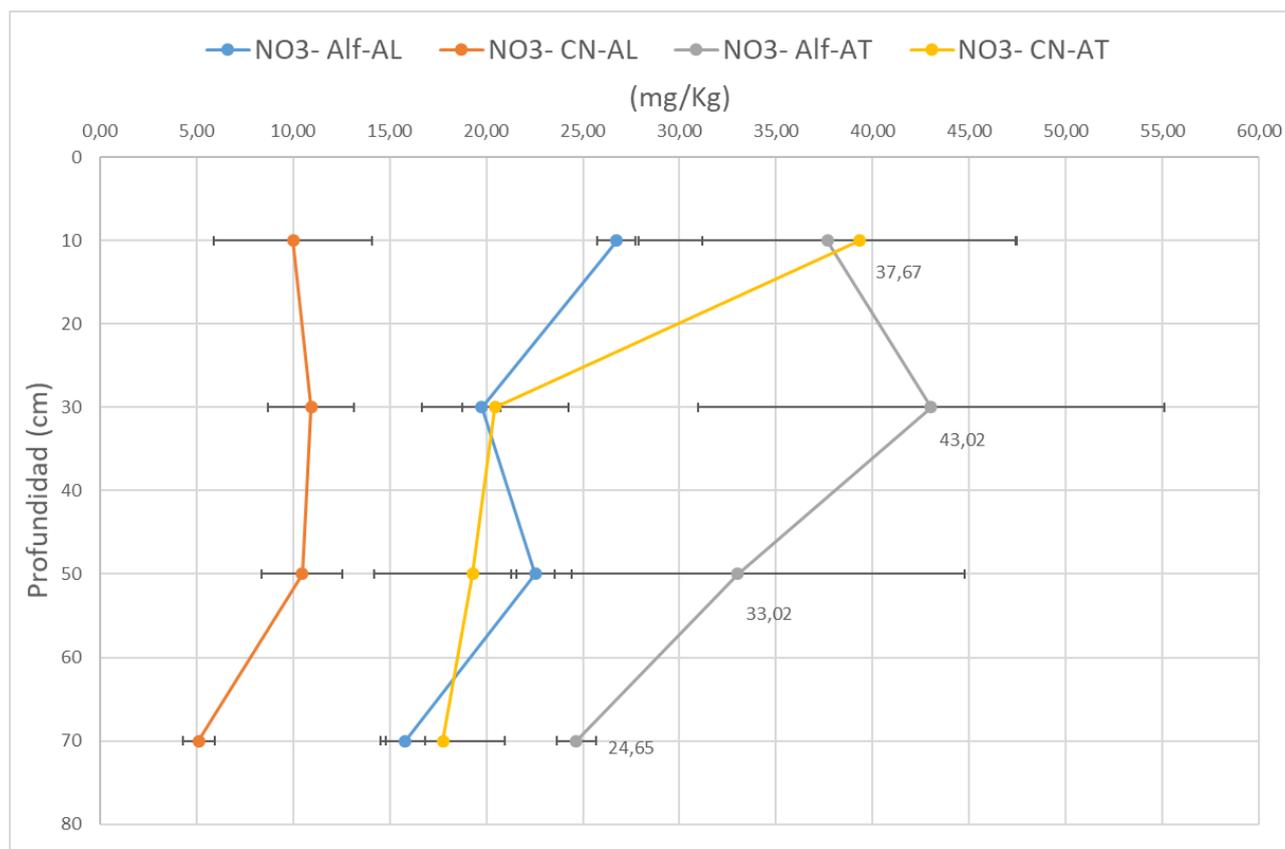


Figura 25 – NO_3^- final en perfil completo (AT y AL).

Dado que se contaba con datos iniciales y finales (2016 y 2018 respectivamente) de NH_4^+ y NO_3^- , se calculó su variación y se realizó análisis de varianza y prueba de Tukey para identificar si existen diferencias significativas en los resultados entre tratamientos (Tablas 21 y 22 – ANEXO II) y si representan una acumulación relevante de estas formas de nitrógeno en profundidad.

Al analizar la concentración de Amonio y Nitrato en el estrato más profundo (60-80 cm), se observa que la relación entre las concentraciones, de estas formas de nitrógeno, es diversa, como muestra la Figura 26. Allí se observa que el Amonio presenta valores similares, en todos los tratamientos del ensayo. Por su parte, el Nitrato presenta valores más elevados en Alfalfa, siendo muy notoria la alta concentración en Alfalfa-AT. De todas formas, el análisis de varianza confirma que no existen diferencias significativas de concentraciones de Nitrato entre las medias de cada grupo de combinación de Tipo de agua y Vegetación.

Al incorporar a este análisis el contenido de Nt final en los estratos superiores (0-40 cm) para la combinación de factores Tipo agua*Vegetación, se encuentra coincidencia entre la alta concentración de Nitrato en las parcelas de Alfalfa-AT, justamente donde se encontraron los valores más elevados de Nt_f M ($2654,88 \text{ Kg ha}^{-1}$) (ver Tabla 14). Debido a esta coincidencia se profundiza el análisis, cotejando la variación de Nt medido, junto con las variaciones de Amonio y Nitrato en el estrato más profundo (Figura 27), allí se observa nítidamente una relación positiva entre la variación de Nitrógeno total y la de Nitrato entre los 60 y 80 cm de profundidad.

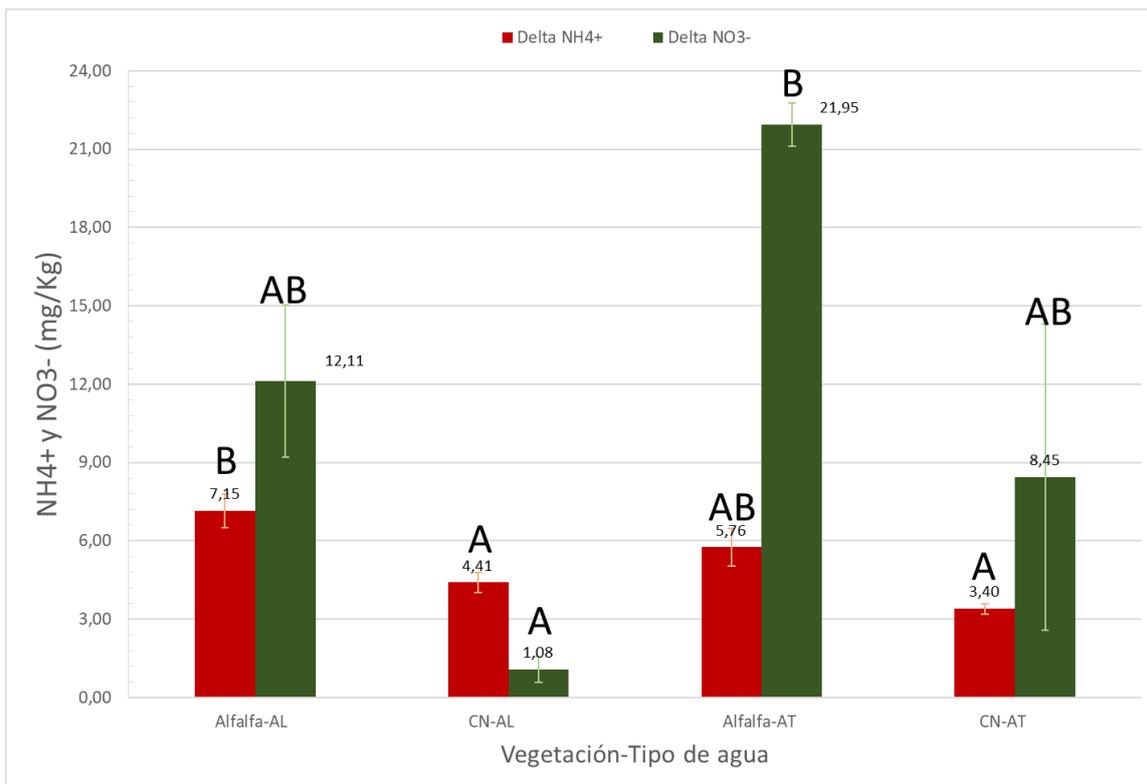


Figura 26 – Variaciones de NH_4^+ y NO_3^- entre final e inicial (60-80 cm) y sus diferencias significativas entre tratamientos.

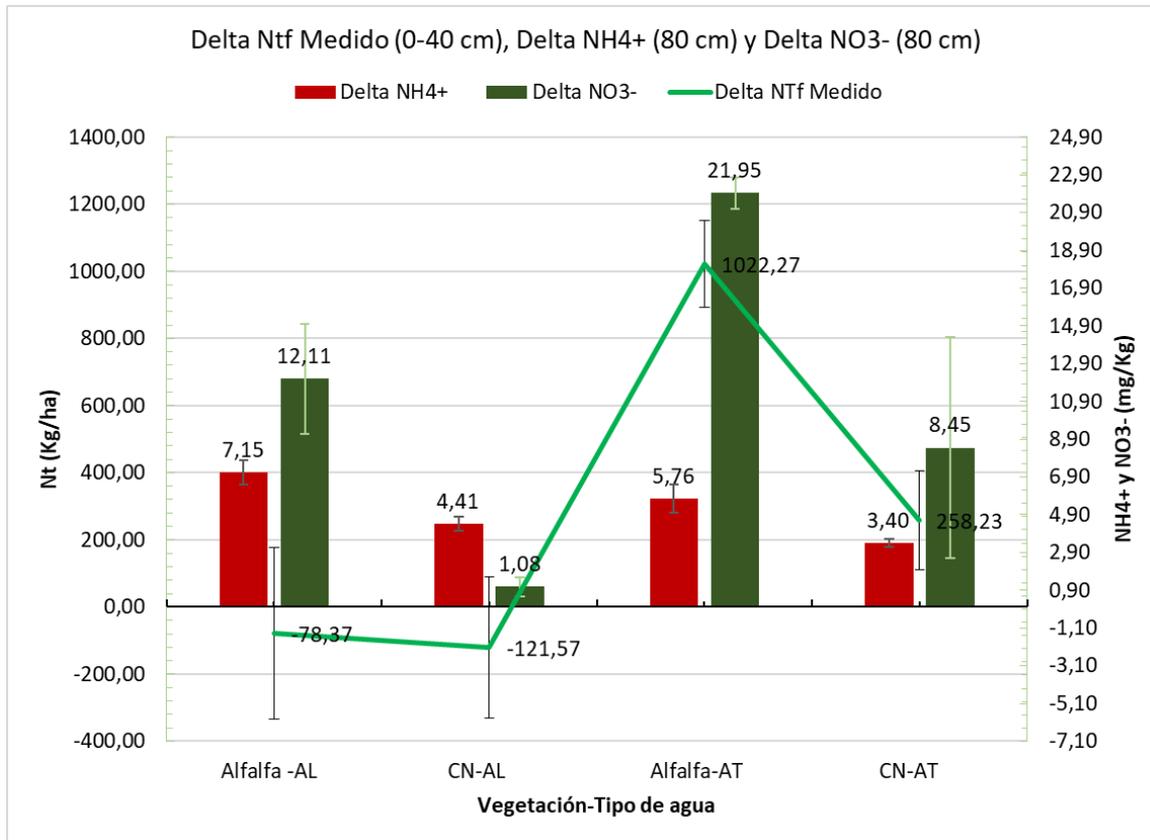


Figura 27 – Delta Ntf M (0-40 cm), y variaciones de NH_4^+ y NO_3^- (60-80 cm).

Cabe destacar que los valores absolutos máximos de concentración de nitrato, en ningún caso superan las 45 ppm, y sus promedios no superan los 25 ppm, como tope máximo registrado en el estrato más profundo del perfil analizado. Esto no representa un riesgo ambiental, en cuanto a acumulación de nutrientes en profundidad y sus posibles efectos en la salud humana (valor máximo 50 ppm -WHO 2006) al momento del muestreo.

5.5 Discusión

Al analizar los resultados obtenidos se observa que, las mediciones de Nitrógeno en el ensayo, luego de dos ciclos de cultivo evidencian una mayor acumulación de Nitrógeno total en las parcelas de Alfalfa bajo el tratamiento de riego con ART, con respecto a los otros tratamientos.

El Nitrógeno total medido en el estrato de suelo 0-40 cm se mantuvo, en promedio, en el mismo rango de valores para todas las combinaciones de factores, excepto para Alfalfa-AT, donde se detectó un aumento bien marcado (1.022 Kg/ha). Esto se contrapone a lo hallado en las parcelas de Alfalfa-AL, donde se observa una leve disminución respecto al nivel inicial (Figura 16).

Es importante destacar que una elevada proporción, de ese Nitrógeno excedente, se encuentra en formas orgánicas o amonio (99,99%) lo que implica una mejora en la calidad del suelo que originalmente es muy pobre en nutrientes. Las formas inorgánicas más móviles como el Nitrato, si bien se incrementaron, no alcanzaron niveles de riesgo ni en el estrato superficial ni en los inferiores (Figura 25), en el período evaluado.

Los resultados observados en Alfalfa, podrían explicarse por el proceso de fijación biológica de Nitrógeno característico de esta especie, que se supuso nula en el balance, en ambas situaciones de riego. Este supuesto podría haber sido válido en el caso Alfalfa-AT, donde la alta disponibilidad de N en el suelo se considera inhibitoria de la nodulación y por lo tanto de la fijación (*Fernández-Pascual et al., 2002*), pero era altamente probable que ocurriera en el tratamiento con agua de perforación.

Los elevados rendimientos en la cosecha de biomasa, a pesar de la baja disponibilidad edáfica de N, en el cultivo regado con agua de perforación y los incrementos de N en el suelo bajo riego con AT, indicarían que la fijación efectivamente ocurrió. Una interpretación alternativa a estos datos es que en el modelo no se contempló la acumulación y aporte de N al suelo de otro reservorio como el de la biomasa radicular, tanto en Alfalfa como en Campo Natural. Para esta última consideración existen relativamente pocos estudios que den cuenta de Nitrógeno acumulado en las raíces, lo que puede generar que sea subestimado el Nitrógeno total acumulado en el sistema (*McNeill et al., 1997*).

Más allá de lo analizado hasta aquí, las estimaciones realizadas por el modelo de balance respecto de las mediciones mostraron un funcionamiento razonablemente bueno, contemplando los datos y supuestos planteados. Los resultados son aceptables como paso inicial de una modelización del comportamiento del Nitrógeno en el sistema suelo-vegetación. La acumulación medida de Nitrógeno total en Alfalfa-AT se vio reflejada en la estimación, pero en valores menores

que los obtenidos de las muestras. Esta subestimación es poco representativa, respecto a la diferencia en otras combinaciones de factores analizados (Figura 17), principalmente Alfalfa-AL, donde se observa la mayor diferencia entre estimaciones y mediciones (Figura 18).

El efecto del aporte de nutrientes, en especial N, con el agua tratada se observa claramente por las diferencias observadas en los rendimientos del CN (Figura 17 y 18). Aunque el modelo parece describir adecuadamente los procesos en este tipo de cultivo (Figura 21), pareciera que algún proceso de acumulación no queda adecuadamente descrito, porque las diferencias entre el estimado y medido son relevantes.

Al evaluar el ajuste del modelo, los resultados de correlación y regresión lineal muestran que la estimación planteada para todos los factores (Tipo de agua y Vegetación), funciona aceptablemente ($r=0,66$; $p=0,02$; $R^2=0,44$) para la cantidad de datos empíricos utilizados ($n=12$). En el análisis posterior por factores (Tabla 19), se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el factor Tipo de agua, tanto para Ntf M, Ntf E y Delta Ntf E vs Ntf M. Estos hallazgos confirman lo surgido de las correlaciones y regresiones lineales, el modelo de balance subestima el Nitrógeno total (respecto a medido) principalmente en la combinación Alfalfa-AL (Figura 23). Esta subestimación y otros desfases hallados entre lo estimado y lo medido, se espera que mejoren con mayor investigación y disponibilidad de datos, al igual que en otros trabajos de balance de N en el sistema suelo-vegetación, donde se utilizaron una cantidad de parámetros similares a los utilizados en el presente TFI (Cichota *et al.*, 2010).

En cuanto a la producción de biomasa tanto en el tratamiento Alfalfa como Campo Natural, se verificó el aumento de rendimiento del cultivo cuando el riego es con ART respecto de agua de perforación, tal como ha sido documentado en otros trabajos de RART para riego agrícola (Pedrero *et al.*, 2010).

A partir de estos resultados, podemos concluir que la mayor relevancia en cuanto al cambio en los valores de Nitrógeno total se debe al tipo de agua de riego, y en menor medida al tipo de vegetación, siendo en todos los casos mayor la concentración de Nitrógeno total en las parcelas regadas con ART.

Finalmente, al evaluar el comportamiento de las diferentes formas de Nitrógeno inorgánico presentes en los perfiles de suelo en diferentes profundidades, se observan aumentos de la concentración de nitrato, asociados al aumento de Nitrógeno total, más relevantes en las parcelas de Alfalfa, sin ser estadísticamente significativos entre tipo de vegetación (según prueba de Tukey). Sin embargo, los valores de NO_3^- entre tipo de tratamiento (AL-AT) para todo el perfil mostraron que las diferencias de pérdidas en el sistema son similares o ligeramente más pequeñas en cultivos con riego convencional a los cultivos de leguminosas y tratamiento orgánico (Stopes *et al.*, 2002). A su vez, también se comprueba que el proceso de lixiviación en cultivos de este tipo (Figura 25), deja de ser importante a partir de los 60 cm de profundidad (Cristobal-Acevedo *et al.*, 2011), observándose una diferencia de orden de magnitud mínima de siete dígitos entre el Nitrógeno total y los aportes de NH_4^+ y NO_3^- .

Estos resultados influyen en dos aspectos. En primera instancia su inclusión en la ecuación de

balance, no impacta en los valores estimados respecto de las mediciones de Nt. A su vez, el supuesto planteado en un inicio, de que los valores de lixiviación de Nitrato se consideraban despreciables, puede ser aceptado en esta etapa inicial de modelización.

En síntesis, aun cuando es necesario realizar ajustes en función de describir más detalladamente alguno de los procesos que intervienen en la dinámica de N del suelo en los sistemas de riego con ART, el modelo es de utilidad para predecir en el corto plazo el enriquecimiento de N en el suelo y diseñar sistemas de monitoreo que permitan minimizar los impactos ambientales negativos de este tipo de práctica.

6 PROPUESTA DE MONITOREO DE ACUMULACIÓN Y MOVIMIENTO DE NITRÓGENO EN EL SUELO REGADO CON AGUA RESIDUAL TRATADA

6.1 Justificación

La relevancia del agua, su papel en la vida, en el ambiente y en las actividades humanas, presenta numerosas aristas que deben ser consideradas para el cuidado de este recurso natural.

En el marco de este Trabajo Final Integrador, en búsqueda de alternativas para el cuidado y la conservación de las fuentes de agua de Ingeniero Jacobacci y áreas periféricas, que constituyen reservas hídricas regionales, se contemplan a las ART como un insumo para uso y aprovechamiento en actividades humanas. Integrando los beneficios ambientales y efectos positivos en el aspecto socioeconómico, de la RART. Siendo las principales ventajas:

- Preservar aguas subterráneas
 - Reducir la utilización de agua subterránea para usos diferentes al consumo humano.
 - Saneamiento de efluentes domiciliarios, mediante una planta depuradora, contemplando como estrategia la reutilización del efluente luego de su tratamiento.
- Disposición de una fuente de agua para riego, renovable, de flujo constante, en una región árida (donde el agua para riego es escasa).

A su vez, se deben contemplar las precauciones y controles a implementar, auditar y mantener bajo un régimen de mejora permanente, para el cuidado del ambiente.

Los procesos de monitoreo, control y mitigación, están integrados en planes de manejo, que cuanto más amplios y complejos, mayor confianza brindan, como también mayor dificultad de implementación presentan (logística, técnica y económica).

A través del presente Trabajo Final Integrador, se avanza en el conocimiento de las características, procesos y beneficios de la RART para riego, en la locación específica de Ing. Jacobacci. A su vez, se evidencia la importancia de identificar dónde se debe centrar la atención para mantener y maximizar (al ampliar la superficie regada) estos beneficios, como también que precauciones y controles implementar para el cuidado del ambiente.

6.2 Propuesta de Monitoreo y Control de procesos y parámetros y Mitigación de posibles impactos ambientales

Para realizar una propuesta de monitoreo y control de procesos y parámetros, como también mitigación de impacto ambiental, de la futura expansión, del proyecto de RART en Ingeniero Jacobacci, se debe tener en cuenta la línea de base ambiental que forma parte de la caracterización del área de trabajo de este TFI, la caracterización socio-económica del lugar (realizada en trabajos

precedentes), las proyecciones de ampliación de la planta depuradora (Figura 9, pág. 23) y del predio para RART en riego forestal/forrajero (Figura 12, pág. 28) y los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Contemplando lo mencionado, es que se propone un abordaje sistémico para analizar la RART, enmarcado en los Sistemas de Gestión de Calidad normalizados (*ISO 9001, ISO 14001*). Adoptar el enfoque que estas normativas proponen, brinda un marco de referencia que permite planificar procesos, procedimientos e interacciones de un proyecto de esta índole. Basándose en un sistema de gestión bajo la premisa de la mejora continua, ciclo PHVA (Planificar-Hacer-Verificar-Actuar).

De acuerdo a esto, en primera instancia, se debe plantear un diseño del procedimiento general a implementar, en el futuro proyecto de expansión de superficie regada mediante RART. Para esto se propone, realizar una representación esquemática de la distribución de los módulos, procesos y actividades involucrados (Tabla 23), y los sitios donde se deberán tomar las muestras para medir indicadores de parámetros y funcionamiento (Figura 28).

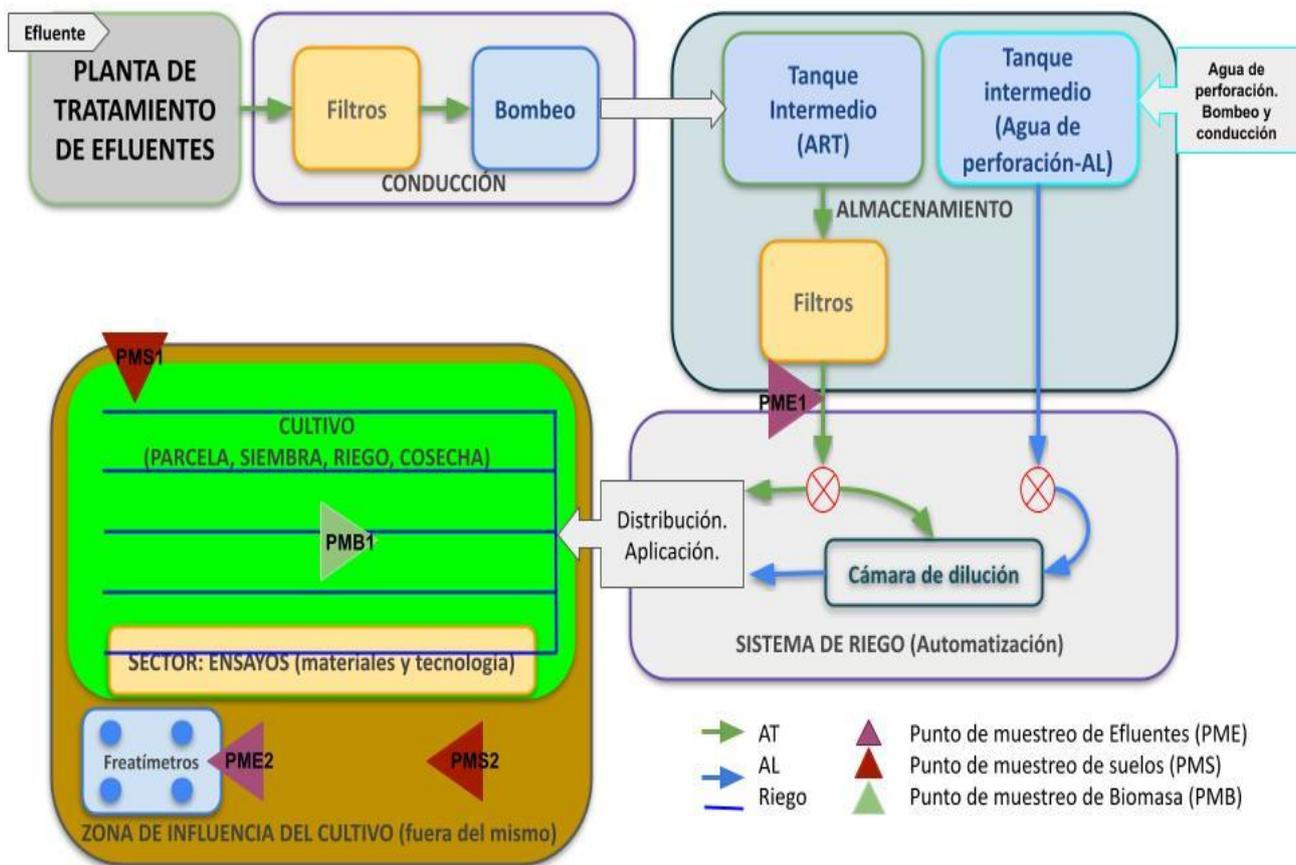


Figura 28 – Diagrama de procesos del proyecto de RART en Ing. Jacobacci.

Se sugiere contemplar tecnologías simples, accesibles y de comprobada durabilidad, para los elementos a utilizar en cada proceso (tuberías, tanques, sistema de bombeo, PLC's, etc.). Como también estrategias sencillas, propicias para el sitio y avaladas por estudios precedentes, para el diseño del sistema de riego, de la distribución de parcelas y la construcción de los freáticos, con el fin de alcanzar un funcionamiento eficiente y un monitoreo eficaz del proyecto.

Proceso	Descripción
CONDUCCIÓN	Cámara de filtros y bombeo de efluentes, desde la planta de tratamientos hasta su almacenamiento.
ALMACENAMIENTO	Dos tanques intermedios (10000 litros). Uno de ellos para el ART, con un cámara de filtros a su salida. Otro tanque para una provisión de agua de perforación (de respaldo), en caso que los muestreos indiquen una concentración por encima de los valores máximos recomendados (Res. Prov. n° 1485) de parámetros físicos, químicos y microbiológicos.
SISTEMA DE RIEGO	Conducción de las ART hacia la distribución en el cultivo. Cámara de dilución (tanque intermedio de 10000 litros), donde se pueden mezclar AT y AL en caso que sea necesario mantener el riego y diluir la concentración de componentes que se encuentren por encima de los parámetros de vuelvo permitidos. Válvulas de apertura/cierre y dotación de caudal, automatizadas mediante controladores lógicos programables.
CULTIVO	Distribución de parcelas del cultivo, sistema de distribución de riego.
ZONA DE INFLUENCIA DEL CULTIVO	Freatímetros, Forestación, Mallín.

Tabla 23 –Procesos para proyecto de RART para riego agrícola (expansión de superficie regada).

Disponer de esta herramienta, permite identificar las fortalezas y debilidades de la propuesta y sus puntos críticos de desvíos. El diseño de procedimiento descrito, se deberá realizar durante la etapa de planificación y se ajusta previo al comienzo de operaciones y durante su implementación.

El paso siguiente, consta de diseñar las acciones estratégicas, junto con sus objetivos, actividades e indicadores para el monitoreo, control y mitigación de impacto en el ambiente del proyecto de RART (Tabla 24).

El plan propuesto, se basa en un proyecto que se mantenga operativo un mínimo de diez años (10 ciclos de cultivo). Esta duración propuesta, permitirá mejorar el funcionamiento de la RART para riego agrícola de especies forrajeras, y generar una cantidad y calidad de datos empíricos relevantes que permitirán darle mayor sustento a los proyectos de RART en la región.

Como paso final, se organizan las actividades que darán cumplimiento al plan propuesto. Las mismas, se marcan en el diagrama de flujos como PM (punto muestral), donde se contemplan las tomas de muestras, periodos de muestreo, análisis de laboratorio y análisis complementarios (Tabla 25). Se recomienda, además, que las actividades propuestas para los puntos de muestreo PMS1, PMS2 y PME2 (Tabla 25) se prolonguen por un mínimo de cinco años luego del cese de riego.

Cabe destacar que lo propuesto, tal como se mencionó al inicio de esta sección, se sustenta en los resultados de este trabajo. Los cuales permitieron generar la información necesaria, para establecer los indicadores (NO_3^- en estrato 60-80 cm), las frecuencias mínimas y puntos de muestreo de suelo, adecuados para minimizar los riesgos de no detectar procesos de deterioro ambiental, por acumulación de N.

Acción estratégica	Objetivo	Indicador de cumplimiento	Lineamiento de manejo - Actividades
Implementar medidas de control de calidad de suelo, y mitigación de posibles impactos.	- Controlar parámetros físico-químicos, nutrientes, microorganismos patógenos y estructura en suelo regado con AT (cotejar con rangos admisibles para uso agrícola y correcto desarrollo del cultivo).	- Registros de parámetros de calidad de suelo	- Demarcar por método de transectas, doce (12) puntos muestrales en el cultivo (PMS1).
	- Analizar el impacto de la RART debido a movimiento de nutrientes y prevenir la eutrofización en el mallín adyacente al predio destinado a RART.	- Registro temporal de parámetros físico-químicos, Humedad y Nutrientes del mallín. (<i>Cremona, Enríquez, 2015</i>)	- Seleccionar cuatro (4) sitios representativos de la zona adyacente al límite norte del predio, dos en las cercanías del cultivo, y dos en la pendiente que desciende hacia el mallín (PMS2).
	- Captar, para su aprovechamiento, los nutrientes lixiviados, mediante los sistemas radiculares de las especies forestales. - Evitar movimientos significativos de Nitrógeno.	- Nitrato en profundidad (80 cm), dato que surge de los análisis de PMS2.	- Implantación de macizos forestales, durante la primera temporada de riego, a lo largo de los límites norte y este del predio. Utilizar especies adaptadas a las condiciones climáticas de la región, a suelos profundos y bien drenados (<i>olivillo- Eleagnus angustifolia</i> . Cremona et. al 2016).
Implementar medidas de control de calidad de agua (subterránea y de riego)	- Evitar, afectaciones al cultivo, por modificaciones en la calidad del efluente.	- Registros de parámetros del efluente (físico-químicos, nutrientes y microbiológicos).	- Muestreo y análisis de efluentes en PME1. Cotejar resultados con los de la Planta Depuradora, suministrados por el DPA .
	- Controlar concentración de nutrientes y microorganismos patógenos en las aguas subterráneas de las inmediaciones del cultivo.	- Registro de datos. Evolución cronológica de calidad de agua (realizar series temporales)	- Instalación de freáticos, que alcancen las primeras napas, en las adyacencias del predio(*) (PME2). - Ubicación, tres (3) freáticos equidistantes en el perímetro norte del predio, un (1) freático en el margen este del predio. - Coordinado con DPA y municipalidad de Ing. Jacobacci.
Implementar medidas de control del estado del mallín	- Controlar estado general del mallín. - Identificar posibles acumulaciones de ART por exceso de riego y posterior escorrentía. - Mapeo de sitios relevantes y representativos de la interacción de RART y mallín	- Cumplimiento de los parámetros de control, sugeridos en trabajos precedentes específicos de conservación de mallines	- Revisión visual del mallín y la pendiente que lo une con el predio de RART. - Utilizar guías pre-existentes para la evaluación de las condiciones ambientales del mallín y de buenas prácticas de manejo sustentable. - Relevar biodiversidad. - Capacitación de personal municipal en el manejo de estas guías.
Implementar medidas de control, ante posibles afecciones por contaminación directa de patógenos	- Prevención de contaminación directa sobre el cultivo.	- Presencia o ausencia de patógenos en la biomasa cosechada.	- Toma de muestra, en cuatro puntos aleatorios de biomasa cosechada del predio bajo riego con ART (PMB1).
	- Prevención de efectos negativos para la salud de los trabajadores	- Registro anual, de afecciones gastrointestinales de los trabajadores.	- Realizar exámenes de salud anuales al personal encargado del manejo del riego, cultivo, cosecha y mantenimiento del equipo.

(*) Las perforaciones para la colocación de los freáticos, debido las dificultades que presenta el suelo para su excavación, se recomienda realizarlas a un mínimo de 3 metros.

Tabla 24 – Plan de monitoreo, control y mitigación de impacto, de acumulación y movimiento de Nitrógeno en el suelo regado con ART.

Puntos de muestreo	Tipo de muestra	Temporalidad	Análisis de laboratorio
PMS1 A	Muestra simple de suelo, por método de barreno del estrato 60-80 cm. Total 12 muestras.	Cada dos (2) ciclos de cultivo	Nitrato y Amonio.
PMS1 B	Muestra simple de suelo, por método de barreno del perfil 0-60 cm, subdividido en 0-20, 20-40 y 40-60 cm. Total 36 muestras.	Cada cuatro (4) ciclos de cultivo	Nitrógeno total y Fósforo disponible; Sodicidad; contaminantes traza y emergentes.
	Muestra simple de suelo, por método de barreno del perfil 0-80 cm, subdividido en 0-20, 20-40, 40-60 y 60-80 cm. Total 48 muestras.	Cada cuatro (4) ciclos de cultivo	Parámetros Microbiológicos(*).
PMS1 C	Muestra simple de suelo, por método de barreno del perfil 0-80 cm, subdividido en 0-20, 20-40, 40-60 y 60-80 cm. Total 48 muestras.	Cada diez (8) ciclos de cultivo	Parámetros físico-químicos (pH, conductividad eléctrica y MO). Analisis de estructura, infiltración y densidad aparente.
PMS2	Muestra simple de suelo, por método del barreno de los estratos del perfil 0-40 cm y 60-80 cm. Total 8 muestras.	Cada cinco (5) ciclos de cultivo	Parámetros físico-químicos y nutrientes.
PME1	Muestra simple de efluente. En etapa de ALMACENAMIENTO seguido al paso por filtros. Total 1 muestra.	Anual, previo al inicio de la temporada de riego.	Parámetros físico-químicos (Conductividad, Nitrógeno Total, TSS-Sólidos Suspendedos Totales, pH, Nitratos,DQO,DBO) y microbiológicos (Coliformes Totales, Coliformes Fecales, E Coli, Recuento de Aerobias Heterótrofas, Pseudomona Aeruginosa)
PME2	Muestra simple de la napa freática. Total 4 muestras.	Bianual, al final de la temporada de riego.	Parámetros físico-químicos (Conductividad, Nitrógeno Total, TSS-Sólidos Suspendedos Totales, pH, Nitratos,DQO,DBO) y microbiológicos (Coliformes Totales, Coliformes Fecales, E Coli, Recuento de Aerobias Heterótrofas, Pseudomona Aeruginosa)
PMB1	Método de cuadros de 1/5 m ² . Total 4 muestras.	Anual (con cada cosecha)	Parámetros microbiológicos.

- Para todos los analisis de laboratorio se recomienda realizar tres repeticiones.

(*) Los analisis microbiológicos en las muestras de suelo regado, se recomienda realizarlos cada cuatro años, ya que aunque no se superen los parámetros permitidos en el efluente, se debe controlar que no exista acumulación o proliferación en el suelo.

- PME1: en caso de que los resultados se encuentren desfasados con los parámetros permitidos, el muestreo deberá llevarle a un plazo mensual, hasta alcanzar los valores admisibles.

- A,B,C (PMS1): Indican diferencias en el tipo de muestra a tomar y analisis por realizar.

Tabla 25 – Descripción de toma de muestras y análisis correspondientes para dar cumplimiento al plan de monitoreo.

Medidas a tomar ante posibles desvíos de proceso, de los objetivos planteados en la Tabla 24.

- Realizar dilución del ART, con agua de perforación (AL), previamente a la aplicación en el cultivo.
- Realizar evaluación de los procesos específicos para identificar la causa de parámetros fuera de los niveles aceptables.
- En caso de que los resultados de PME1 y PME2 se encuentren fuera del rango de los valores permitidos, el muestreo deberá llevarle a cabo con una frecuencia mensual, hasta alcanzar los valores admisibles, dando cumplimiento al ANEXO II de la Resolución n° 166.
- Analizar el proceso específico. Identificar causa del desvío. Implementar acción específica para evitar futuros desvíos en el procedimiento (modificación en el proceso, medida de mitigación, capacitación).

6.3 Cronograma y Presupuesto del Plan de Monitoreo propuesto

De acuerdo al plan de monitoreo, manejo y mitigación de impacto ambiental propuesto, elaborado en el marco de una duración mínima de 10 años, se organizaron y distribuyeron las actividades pertinentes, según el siguiente cronograma (Figura 29).

Actividad	Año 1		Año 2		Año 3		Año 4		Año 5		Año 6		Año 7		Año 8		Año 9		Año 10	
	Primavera	Otoño																		
Construcción freatímetros	*																			
Plantación de especies forestales	*																			
PME1	*		*		*		*		*		*		*		*		*		*	
PME2	*		*		*		*		*		*		*		*		*		*	
PME3				*				*				*				*				*
PMS1 A			*				*				*				*				*	
PMS1 B							*								*					
PMS1 C															*					
PMS2									*										*	
PMB1		*		*		*		*		*		*		*		*		*		*

Figura 29 – Cronograma del Plan de Control, Monitoreo y Mitigación.

Debido a las condiciones climáticas de la región, y las temporadas de crecimiento y mayor

consumo de nutrientes de la vegetación, los muestreos que se proponen efectuar, se distribuyen el período entre las estaciones primavera y otoño.

En total se contemplan, para diez años de monitoreo, un total de 148 muestras de suelo, 30 de agua (efluentes y napa freática) y 40 de biomasa. La temporalidad y los estratos de cada muestreo, se organizaron de modo de eficientizar (lo mayor posible) las campañas de muestreo, reduciendo así, los costos operativos de la propuesta.

De acuerdo a las actividades y el cronograma propuestos, se realizó el prorrateo en los diez años de duración del Plan de Monitoreo, de los recursos financieros necesarios para dar cumplimiento al mismo (Tabla 26). Restando la inversión inicial de la construcción de los freaímetros, el total por año es de pesos ciento ochenta y ocho mil (\$188.000.-).

Los montos más importantes corresponden a la instalación de los freaímetros, seguido en valor, por los análisis de suelo (ya que suman 292 análisis por realizar en total). Las revisiones al mallín sugeridas, deberán realizarse dentro de los tiempos dedicados al trabajo cotidiano en el predio y el cultivo, es por esto que no se presupuestan como actividades adicionales.

Concepto/Etapa	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Total
Construcción de cuatro Freaímetros	966000										966000
Toma de muestras de suelos y efluente	66000	66000	66000	66000	66000	66000	66000	66000	66000	66000	660000
Análisis de Efluentes	42300	42300	42300	42300	42300	42300	42300	42300	42300	42300	423000
Análisis de suelo	73640	73640	73640	73640	73640	73640	73640	73640	73640	73640	736400
Análisis de Biomasa	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	6400	64000
Subtotal anual	1154340	188340	188340	188340	188340	188340	188340	188340	188340	188340	2849400

Tabla 26 – Presupuesto en Pesos Argentinos (\$ARG) por año del Plan de Monitoreo, Control y Mitigación (sujeto a presupuesto válidos para el mes de abril de 2022).

6.4 Propuestas de mejora y fortalecimiento de la RART para riego de forrajas

Se sugieren propuestas concretas sobre algunos aspectos observados durante las tomas de muestras, mantenimiento del ensayo y gestión del mismo.

También, se proponen actividades que integren a las instituciones educativas de Ingeniero Jacobacci, la UNRN y el INTA EEA-Bariloche, en la reutilización de aguas residuales tratadas. Buscando que se fortalezcan tanto las instituciones, como el proyecto en sí, a través de la articulación e intercambio de saberes entre dichos actores, presentes en el territorio.

Si bien las siguientes propuestas (Tabla 27) exceden lo que involucra estrictamente un plan de monitoreo y control de parámetros físicos, químicos y biológicos, su implementación puede contribuir al correcto seguimiento del movimiento de nutrientes en el suelo bajo RART. Promover y prolongar esta práctica en la región, involucra procesos de mejora continuos, basados en registros y experiencias.

Acción estratégica	Objetivo	Indicador de cumplimiento	Lineamiento de manejo - Actividades
Implementar mejoras en el funcionamiento de sistemas de riego.	<ul style="list-style-type: none"> - Reducir proliferación algas en componentes del sistema de riego. - Reducir carga de patógenos en el elfuente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución cuantificable de algas en sistema de riego. - Disminución de concentración de patógenos en efluente de riego. 	<ul style="list-style-type: none"> - Relevar las clases filtros para elfuentes, disponibles en el mercado y también en etapa de prototipo. Ordenarlos por accesibilidad y caracterisitcas mas adecuadas para el tipo de efluente. - Siguiendo el orden establecido, instalar un tipo de filtro, a la salida de los tanques de almacenamiento (PME1). -Realizar la toma de muestras y analisis de laboratorio de acuerdo a lo propuesto para esos puntos de muestreo en Tabla 25. - Cambiar los filtros anualmente, siguiendo el orden establecido y comparar los resultados de los analisis de las muestras de cada año.
	<ul style="list-style-type: none"> - Eficientizar el sistema de riego. 	<ul style="list-style-type: none"> - Disminución de cantidad de horas dedicadas al mantenimiento del sistema de transporte de agua y riego 	<ul style="list-style-type: none"> - De acuerdo a la sectorización de parcelas regadas, y a la disposición del sistema de riego, seleccionar un sector representativo. - Disponer del sector seleccionado para el testeo de nuevos materiales, sistemas de transporte y riego, que aumenten la eficiencia y disminuyan el mantenimiento necesario. - Registrar cantidad de horas dedicadas al arreglo y mantenimiento del sistema experimental, comparar con cantidad de horas dedicadas al mantenimiento del sistema ya instalado.
Fortalecimiento interinstitucional de la RART en Planta depuradora Ing. Jacobacci	<ul style="list-style-type: none"> - Participación de las actividades de los años finales del Centro de Educación Técnica n° 26 en la planta depuradora y la RART de Ing. Jacobacci. - Expandir la capacitación de los estudiantes. - Fomentar el arraigo y sentido de pertenencia . - Brindar experiencias técnicas aplicadas. - Predisposición social local positiva hacia la RART 	<ul style="list-style-type: none"> - Cantidad de alumnos participantes del CET n°26 	<ul style="list-style-type: none"> - Alcanzar un convenio entre la UNRN, el INTA y el Centro de Educación Técnica n° 26 (Ing. Jacobacci), para coordinar tareas en conjunto con sus estudiantes de los años superiores. - Articulación con docentes del colegio y responsables de Proyectos de Investigación de RART, a fin de acordar y generar tareas y actividades especificas para que los estudiantes lleven a cabo en el marco de la RART en Ing. Jacobacci.
	<ul style="list-style-type: none"> - Aplicar desarrollo tecnológico y recursos (económicos y humanos) en el desarrollo de proyectos de reúso en la Línea Sur. - Interacción directa entre estudiantes universitarios y de nivel medio de Ing. Jacobacci y la región. - Transferencia tecnológica, de conocimientos y experiencias de investigación hacia los estudiantes de nivel medio. - Posicionar a la UNRN como un horizonte inmediato, para los estudiantes de nivel medio, para continuar sus estudios y capacitaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cantidad de alumnos participantes, de la UNRN. - Renovación de Proyectos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Generación de proyectos de extensión universitaria (UNRN), por parte de las cátedras afines a la RART. - Plantear estos proyectos con posibilidad a que evolucionen a programas. - Proponer que los Proyectos Sociales, que forman parte de la curricula de diferentes carreras de la UNRN, puedan realizarse en proyectos de RART en Ing. Jacobacci y la región (en caso de surgir nuevos proyectos).

Tabla 27 – Iniciativas de mejora y fortalecimiento de la RART a nivel regional.

7 CONCLUSIÓN Y CONSIDERACIONES FINALES

A lo largo de este Trabajo Final Integrador, se buscó identificar si existe acumulación de nitrógeno en el suelo, producto de la RART para riego agrícola. Se propuso una ecuación de balance que permita cuantificar el movimiento de este nutriente y la modelización de su comportamiento en el sistema suelo-vegetación. Para esto se utilizó la mínima cantidad posible de parámetros y se intentó tener en cuenta solamente, los factores más importantes que influyen en las estimaciones de concentración de nutrientes.

Los resultados de lo analizado indican que, al momento de realizado este TFI, la RART para riego agrícola en Ingeniero Jacobacci, no representa un riesgo ambiental en cuanto a acumulación y movimiento de nitrógeno en profundidad. Esto ratifica parcialmente la hipótesis planteada, ya que existió movimiento de nitrógeno, pero sin alcanzar niveles tóxicos para la vegetación, el ambiente y por ende a la sociedad.

Siendo ésta, la primera etapa de confección y validación de una ecuación de balance de nitrógeno, los resultados son aceptables. Del análisis de los mismos, también se identifica que se requieren datos de entrada con mayor nivel de precisión.

Para mejorar las estimaciones y validarlas empíricamente, a fin de lograr predicciones de mayor ajuste, se sugiere como siguiente paso de investigación, revisar parámetros considerados nulos o mínimos, en especial fijación biológica de N y hallar cuáles son los términos de la ecuación de balance por modificar, agregar o cuantificar más precisamente. En el mismo sentido, se recomienda plantear y ajustar el modelo en forma diferenciada para especies fijadoras y para aquéllas que no lo son, y centrarse exclusivamente en ART, como tipo de agua utilizada para el riego.

Los resultados también avalan la necesidad de incluir propuestas de monitoreo en los proyectos de reuso de ART. Si bien, las tasas de acumulación de nitrógeno halladas, deben ser ajustadas con mayor precisión, y dependen del agua y del suelo con el que se trabaje, estimaciones como las aquí implementadas, permiten realizar diseños adecuados de monitoreo, para que la RART para riego agrícola no implique riesgos para el ambiente, a la vez que se aprovechan los recursos disponibles.

En el caso de estudio, identificar la relación positiva entre el aumento de la concentración de nitrato en profundidad, y de Nitrógeno total en el suelo (en el estrato de influencia radicular), permitió ajustar los parámetros a relevar, la frecuencia y puntos de muestreo, como también los análisis a realizar. Esto, a su vez, justifica que el monitoreo propuesto, involucre entre sus objetivos, la instalación de freáticos para el control de las aguas subterráneas, análisis de suelo (aguas abajo) fuera de la plantación y medidas de mitigación de posibles movimientos, como la instalación a los alrededores de la zona regada, de macizos forestales adaptados a la región, para captar los excedentes de nitrógeno en profundidad.

Teniendo en cuenta lo analizado a lo largo de este trabajo y los resultados alcanzados, se considera pertinente proponer posibles líneas de investigación, a futuro. Las cuales pueden complementar los presentes y futuros proyectos de RART, siendo:

- Evaluar y cuantificar la fijación biológica de nitrógeno de la Alfalfa en suelos regados con ART.
- Medir y cuantificar los parámetros que en el presente balance de nitrógeno se consideraron despreciables, con el fin mejorar la capacidad predictiva (inmovilización, desnitrificación y lixiviación).
- Realizar ensayos de especies forrajeras nativas, *in situ*, bajo riego de ART (adaptación, desarrollo, supervivencia y productividad)
- Confeccionar y validar un balance de otros nutrientes, como Fósforo, en los suelos del ensayo.

Estudios como el presente y los propuestos, resultan son de gran ayuda para identificar que parámetros podemos utilizar como indicadores adecuados, para monitorear los procedimientos de reúso y controlar las variables propias de ese funcionamiento, minimizando los riesgos ambientales y aumentando la seguridad para el ambiente y la sociedad.

8 REFERENCIAS

- Álvarez R. 2015. *Fertilidad de Suelos y Fertilización en la Región Pampeana*. EFA, Editorial Facultad de Agronomía – Universidad Nacional de Buenos Aires.
- AQUASTAT. N.d. *AQUASTAT sitio de internet (Octubre/2021)*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm
- Asano, T., Burton, F., Leverenz, H., Tsuchihashi, R., Tchobanoglous, G., 2007. *Water Reuse: Issues, Technologies, and Applications* (McGraw-Hill). Metcalf & Eddy Inc.
- Barraclough D. 1997. *The direct or MIT route for nitrogen immobilization: A 15N mirror image study with leucine and glycine*. Soil Biology and Biochemistry Volume 29, Issue 1, January 1997, Pages 101-108. DOI: 10.1016 - S0038-0717(96)00241-6
- Basigalup D. 2007. *El cultivo de la Alfalfa en Argentina*. Ediciones INTA.
- Benimeli M. F., Plasencia A., Corbella R. D., Guevara D. A., Sanzano A., Sosa F. A. y Fernández de Ullivari J. 2019. *El Nitrógeno del suelo*. Cátedra de Edafología Facultad de Agronomía y Zootecnia, Universidad Nacional de Tucumán.
- Bixio D., Thoeys C., De Koning J., Joksimovic D., Savic D., Wintgens T., Melin T. 2006. *Wastewater reuse in Europe*. Desalination 187 (2006) 89–101
- Cancio H, Hafford M., González M. Villarreal P. y Romagnoli S. 2013. *Alfalfa para fardo. Modelos productivos del Alto Valle*. EEA Alto Valle-INTA.
- Cichota R., Brown H., Snow V.O., Wheeler D.M., Hedderley D., Zyskowski R. & Thomas S. 2010. *A nitrogen balance model for environmental accountability in cropping systems*. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science, 38:3, 189-207. DOI: 10.1080/01140671.2010.498401
- Cremona M. V., Riat M., Tanzer L., Magnin S. 2019. *Estudio de pautas para la implementación de la disposición final y reutilización agrícola/forestal de aguas residuales tratadas provenientes de la planta de efluentes de Ingeniero Jacobacci*. INTA, UNRN, DPA Rio Negro.
- Cremona M.V. y Enriquez A.S. 2015. *Los mallines de Patagonia Norte: sus funciones productivas y ambientales*. INTA. Presencia Art. ISSN: 0326-7040
- Cremona M.V., Riat M., Fernández P., Magnin S., Tanzer L., Velazco V., Sánchez M. 2017. *Reutilización de aguas residuales tratadas para riego de forrajeras en Ing. Jacobacci*. INTA, UNRN, DPA Rio Negro. XXVI Congreso Nacional del Agua.
- Cristóbal-Acevedo D., Álvarez-Sánchez M. E., Hernández-Acosta E. y Améndola-Massiotti R. 2011. *Concentración de nitrógeno en suelo por efecto de manejo orgánico y convencional*.

Terra Latinoamericana, vol. 29, núm. 3, pp. 325-332 Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.

- Dalal, R. C. 1992. *Long-term trends in total nitrogen of a vertisol subjected to zero-tillage, nitrogen application and stubble retention*. Australian Journal of Soil Research. DOI: 10.1071/SR9920223
- Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Donovan, T. J. y Meek B. D. 1983. *Alfalfa responses to irrigation treatment and environment*. Agronomy Journal 75: 461-464.
- Doorenbos, J. and Pruitt, W.O. (1977) Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, FAO, Rome, 144 p.
- Faleschini, M. 2016. *Estrategias, dificultades y beneficios en la aplicación del reúso del agua tratada en tres municipios de la Patagonia*. IFRH.
- Fernandez-Pascual, M., de María, N. y de Felipe M.R. 2002. *Fijación biológica de nitrógeno: Factores limitantes*. Ciencia y Medio Ambiente – CCMA-CSIC.
- García, M. 2018. *Reutilización para riego de cultivos*. 6ª Reunión Internacional de Riego, Cordoba, Argentina.
- González González, M.I., Chiroles Rubalcaba, S. 2011. *Uso seguro y riesgos microbiológicos del agua residual para la agricultura*. Revista Cubana de Salud Pública; 37(1)61-73.
- Grayston J., Vaughan D. & Jones D. *Rhizosphere carbon flow in trees, in comparison with annual plants: the importance of root exudation and its impact on microbial activity and nutrient availability*. Applied Soil Ecology Volume 5, Issue 1, January 1997, Pages 29-56. DOI: 10.1016/S0929-1393(96)00126-6
- Heichel, G. H. 1983. *Alfalfa. Crop water relations*. John Wiley and Sons, Inc. New York, USA. Pp 127-155.
- Lazarova, V., Bahri, A., 2005. *Water Reuse for Irrigation: Agriculture, Landscapes, and Turf Grass*. CRC Press, Boca Raton, USA.
- 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.
- Marchsner P. & Rengel Z. 2007. *Nutrient Cycling in Terrestrial Ecosystems*. Springer. ISSN 1613-3382

- McNeill, A.M., Zhu, C.; Fillery, I.R.P. 1997. *Use of in situ 15N-labelling to estimate the total below-ground nitrogen of pasture legumes in intact soil-plant system*. Australian journal of agricultural research. DOI:10.1071/A96097-ISSN : 0004-9409
- Menegassi L.C., Rossi F., Dominical L.D., Tommaso G., Montes C.R., Abdalla Gomide C., Gomes T.M. 2019. Reuse in the agro-industrial: *Irrigation with treated slaughterhouse effluent in grass*. Journal of Cleaner Production. Journal of Cleaner Production 251 (2020) 119698.
- Miller, P. R., Buschena D. E., Jones C. A., y Holmes J. A. 2008. *Transition from intensive tillage to no-tillage and organic diversified annual cropping systems*. Agronomy Journal. 100(3). DOI:10.2134/agronj2007.0190
- National Biosolids Partnership. 2011. *National manual of good practice for biosolids*. NBP Management Committee
- National Research Council. 2012. *Water Reuse: Potential for Expanding the Nation's Water Supply Through Reuse of Municipal Wastewater*. Committee on the Assessment of Water Reuse as an Approach to Meeting Future Water Supply Needs. ISBN 978-0-309-22459-8.
- Noyola A. 2001. *Tendencias en el tratamiento de aguas residuales domesticas en Latinoamérica*. Instituto de Ingeniería UNAM, México.
- O'Connor G.A., Elliott H.A. y Bastian R.K. – 2008 - *Degraded Water Reuse: An Overview* – Journal of Environmental Quality. DOI: 10.2134/jeq2007.0459
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. *Reutilización de aguas para agricultura en América Latina y El Caribe. Estado, Principio y necesidades*. 2017. FAO.
- Pedrero F., Kalavrouziotis I., Alarcón J.J., Koukoulakis P. & Asano T. 2010. *Use of treated municipal wastewater in irrigated agricultura-Review of some practices in Spain and Greece*. Agricultural Water Management 97 (2010) 1233–1241.
- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., McCornick, P.G., Drechsel, P., Bahri, A., Minhas, P.S. 2010. *The challenges of wastewater irrigation in developing countries*. Agricultural Water Management 97 (2010) 561–568.
- Qadir, M., Wichelns, D., Raschid-Sally, L., Minhas, P.S., Drechsel, P., Bahri, A., McCornick, P., 2007a. *Agricultural use of marginal-quality water-opportunities and challenges*. In: Molden, D. (Ed.), *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. Earthscan, London, UK
- Schepers J. S., Raun W. R., Follett R. F., Fox R. H. y Randall G. W. 2008. *Nitrogen in Agricultural System*. American Society of Agronomy, Inc., Crop Science Society of America, Inc. Y Soil Science Society of America, Inc.

- Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnson C.T. y Sumner M.E. (Eds.). 1996. *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods*. SSSA Book Series N° 5. SSSA, ASA, Madison, Wisconsin, EEUU.
- Stamati M. y Corso M.L. 2018. *Guía de prácticas de manejo sustentable de tierras y conservación de suelos*. Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable – Argentina. FAO, FMAM.
- Stopes, C., Lord E. I., Philipps L. and Woodward. L. 2002. *Nitrate leaching from organic farms and conventional farms following best practice*. Soil Use Manage. 18: 256-263.
- Teson N., Larocca F., Millan G. y Merani V. 2017. *Reutilización de aguas residuales para el riego de plantaciones forestales; Resultados preliminares sobre efectos en el suelo y en la productividad*. JXX Jornadas forestales de Entre Ríos.
- UNESCO. 2019. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*.
- USEPA United State Environmental Protection Agency. *Guidelines for water reuse*. 2012. EPA. AR-1530. EPA/600/R-12/618 | September 2012.
- Weil R.R. y Brady N.C. 2017. *The nature and properties of soil*. Pearson, Global Edition.
- Westcot D.W. y Ayers R.S., 1985. *Irrigation water quality criteria*. In: Pettygrove, G.S., Asano, T. (Eds.), *Irrigation with Reclaimed Municipal Wastewater-A Guidance Manual*. Lewis Publishers, Inc., Chelsea, M
- Whitehead, D. 1995. *Grassland Nitrogen*. Department of Soil Science, University of Reading, UK. Hardback 416 Pages. ISBN: 9780851989150.
- WHO. 2006. *Guías para la calidad de agua potable. Volumen 1: Recomendaciones*. Tercera Edición.
- WHO. 2006. *Guidelines for the Safe use of wastewater, excreta and greywater. Volumen II - Wastewater use in agriculture*. WHO, UNEP, FAO
- Winpenny J., Heinz I. y Koo-Oshima S. 2013. *Reutilización del agua en la agricultura: ¿Beneficios para todos?* Informe sobre temas Hídricos. FAO.

ANEXO I

Antecedentes y Evolución de la Reutilización de aguas residuales.

Tabla 1 - Eventos históricos e importantes relacionados con la evolución de la recuperación y reutilización de agua en todo el mundo hasta 1968. Adaptado de Water Reuse 2007 Metcalf & Eddy

Período	Ubicación	Eventos
~ 3000 aC	Creta, Grecia	Civilización minoica: uso de aguas residuales para riego agrícola
97 AD	Roma, Italia	La ciudad de Roma tiene un comisionado de suministro de agua, Sexus Julius Frontinus.
1500 ~	Alemania	Las granjas de aguas residuales se utilizan para la eliminación de aguas residuales.
1700 ~	Reino Unido	Las granjas de aguas residuales se utilizan para la eliminación de aguas residuales.
1800–1850	Francia, Inglaterra, Estados Unidos	Uso legal de alcantarillas para la eliminación de desechos humanos en París (1880), Londres (1815) y Boston (1833).
1850–75	Londres, Inglaterra	La epidemia de cólera está vinculada al agua de pozo contaminada por la nieve
1850-1875	Inglaterra	Teoría de la prevención de la fiebre tifoidea desarrollada por Budd.
1850-1875	Alemania	Conexión del ántrax a la etiología bacteriana demostrado por Koch.
1875–1900	Francia, Inglaterra	Contaminación microbiana del agua demostrada por Pasteur. Desinfección de hipoclorito de sodio por Down para hacer que el agua sea "pura y saludable".
1890	Ciudad de México,	Los canales de drenaje son construidos para tomar sin tratamiento aguas residuales para irrigar una importante área de agricultura al norte de la ciudad, una práctica que aún continúa hoy. Aguas residuales no tratadas o mínimamente tratadas de la Ciudad de México se entrega al Valle de México, donde se utiliza para regar alrededor de 90,000 ha.de tierras agrícolas, incluidas las hortalizas.
1906	Jersey City, Estados Unidos	Cloración del suministro de agua.
1906	Oxnard, California, Estados Unidos	La primera referencia relacionada con una salud pública punto de vista de los requisitos de calidad del agua para la reutilización de aguas residuales aparece en la publicación mensual Boletín, Junta de Salud del Estado de California, Febrero de 1906 en el sistema de fosas sépticas de Oxnard de eliminación de aguas residuales.
1908	Inglaterra	Cinética de desinfección, dilucidada por Chick.
1913–1914	Estados Unidos e Inglaterra	El proceso de lodos activados se desarrolla en el Lawrence Experiment Station en Massachusetts y demostrado por Ardern y Lockett en Inglaterra
1926	En el Parque Nacional del Gran Cañón, Estados Unidos	Las aguas residuales tratadas se utilizan por primera vez en un sistema de agua doble para el enjuague de inodoro, aspersion de césped, y refrigeración/calefacción.
1929	La ciudad de Pomona, CA, Estados Unidos	Inició un proyecto utilizando Agua recuperada para riego de céspedes y jardines.
1932–1985	San Francisco	Las aguas residuales tratadas se utilizan para regar el césped CA y abastecimiento de lagos ornamentales en el Parque Golden Gate
1955	Japón	El agua industrial se suministra desde planta de tratamiento de aguas residuales Mikawajima a las Oficina de alcantarillado Tokyo Metropolitan.
1968	Namibia	La reutilización directa de bebida comenzó en Windhoek's Planta de recuperación de agua de Goreangab.

Tabla 2 - Guías de la EPA para la reutilización de aguas residuales tratadas en el sector agrícola (Adaptado de EPA 2012)

Tipo de reutilización	Tratamiento	Calidad	Distancia de seguridad
Riegos de cultivos comestibles no procesados comercialmente	Secundario	pH= 6-9 < 10 mgO ₂ /L DBO ₅ < 2 UNT	15 m a fuentes o pozos de agua potable
	Filtración	0 CF/100 mL	30 m de zonas permitidas al público
	Desinfección	1 mg/L ClO ₂	
Riego de cultivos que se consumen procesados	Secundario	pH= 6-9 < 30 mgO ₂ /L DBO ₅ < 30 mg/L SST 200 CF/100 mL	90 m a fuentes o pozos de agua potable 30 m de zonas permitidas al público
	Desinfección	1 mg/L ClO ₂	
Riego de pastos de animales productores de leche y cultivos industriales	Secundario	pH= 6-9 < 30 mgO ₂ /L DBO ₅ < 30 mg/L SST 200 CF/100 mL	90 m a fuentes o pozos de agua potable 30 m de zonas permitidas al público
	Desinfección	1 mg/L ClO ₂	

DBO: Demanda Bioquímica de Oxígeno

UNT: Unidades nefelométricas de turbiedad

SS: Sólidos suspendidos

CF: Coliformes fecales

Tabla 3 – Concentraciones máximas permisibles de metales para aguas residuales tratadas de uso agrícola (Adaptado EPA 2012)

Metal	Concentración máxima (mg/L)
Aluminio	5
Arsénico	0.1
Berilio	0.1
Boro	0.75
Cadmio	0.01
Cinc	2.0
Cromo (hexavalente)	0.1
Cobalto	0.05
Cobre	0.2
Fluoruro	1
Hierro	5
Litio	2.5
Manganeso	0.2
Molibdeno	0.01
Níquel	0.2
Plomo	5
Selenio	0.02
Vanadio	0.1

Tabla 4 – Directrices recomendadas sobre la calidad microbiológica de las aguas residuales empleadas en agricultura. Adaptado de OMS 2006

Categoría	Condiciones de aprovechamiento	Grupo expuesto	Nemátodos intestinales ¹ (media aritmética)	Coliformes fecales ² (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

1. Especies *ascaris* y *trichuris* y *anquilostomas*.

2. Durante el período de riego.

Tabla 5 – Recomendaciones para RART en riego agrícola. (Adaptado de OMS-2006)

Indicadores microbiológicos	Hortalizas y frutas crudas	Cereales y cultivos para conservas
Nematodos intestinales (media aritmética huevos/l)	<1	<1
Coliformes fecales (media geométrica/100 ml)	<1000	
Tratamiento orientativo	Estanque de estabilización o equivalente ¹	Estanque de estabilización o equivalente ¹
Grupo expuesto	Trabajador, consumidor	Trabajador

1. Tanques de estabilización en serie, tamaño de los mismo de acuerdo al volumen de efluente y de los tanques.

Tiempo mínimo de retención de 20 días y 20°C de temperatura.

ANEXO II

Resultados y conclusiones

Tabla 16 – Análisis de Varianza NTi Medido

Análisis de la varianza - Nt inicial - 0-40 cm - Modelo II					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Nt inicial - Medido	12	0,73	0,25	18,46	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1202897,3	7	171842,47	1,52	0,3595
Tipo agua	79887,71	1	79887,71	0,71	0,4477
Tipo agua>Parcela	686720,8	4	171680,2	1,52	0,3475
Tipo agua>Vegetación	436288,8	2	218144,4	1,93	0,2588
Error	451859,4	4	112964,85		
Total	1654756,7	11			
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=538,76827					
Error: 112964,8506 gl: 4					
Tipo agua	Medias	n	E.E.		
L	1738,82	6	137,21	A	
T	1902	6	137,21	A	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1593,85431					
Error: 112964,8506 gl: 4					
Tipo agua	Parcela	Medias	n	E.E.	
L	2	1510,15	2	237,66	A
T	2	1632,29	2	237,66	A
L	3	1639,94	2	237,66	A
T	3	1856,73	2	237,66	A
L	1	2066,36	2	237,66	A
T	1	2216,99	2	237,66	A
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1117,15048					
Error: 112964,8506 gl: 4					
Tipo agua	Vegetación	Medias	n	E.E.	
L	Alfalfa	1632,6	3	194,05	A
L	CN	1727,17	3	194,05	A
L	Alfalfa	1750,47	3	194,05	A
T	CN	2171,41	3	194,05	A
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					

Tabla 17 - Análisis de Varianza NT final Medido

Análisis de la varianza - Nt final Medido - 0-40 cm - Modelo II					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Nt final - M	12	0,92	0,77	12,44	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2984932,1	7	426418,87	6,3	0,0472
Tipo agua	2448376,6	1	2448376,6	36,18	0,0038
Tipo agua>Parcela	453823,61	4	113455,9	1,68	0,3145
Tipo agua>Vegetación	82731,89	2	41365,94	0,61	0,5866
Error	270690,89	4	67672,72		
Total	3255623	11			
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=417,00107					
Error: 67672,7222 gl: 4					
Tipo agua	Medias	n	E.E.		
L	1638,86	6	106,2	A	
T	2542,26	6	106,2	B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1233,62675					
Error: 67672,7222 gl: 4					
Tipo agua	Parcela	Medias	n	E.E.	
L	3	1326,52	2	183,95	A
L	2	1720,04	2	183,95	A
L	1	1870,02	2	183,95	A
T	2	2417,3	2	183,95	A
T	3	2453,22	2	183,95	A
T	1	2756,25	2	183,95	B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=864,66291					
Error: 67672,7222 gl: 4					
Tipo agua	Vegetación	Medias	n	E.E.	
L	CN	1605,62	3	150,19	A
L	Alfalfa	1672,1	3	150,19	A
T	CN	2429,63	3	150,19	A
T	Alfalfa	2654,88	3	150,19	B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					

Tabla 18 - Análisis de Varianza NT final estimado

Análisis de la varianza - Nt final Estimado - 0-40 cm - Modelo II					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Nt final Esti	12	0,98	0,94	23,19	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	25741183	7	3677311,8	25,2	0,0037
Tipo agua	16367394	1	16367394	93,29	0,0006
Tipo agua>Parcela	701810,38	4	175452,59	1,2	0,4314
Vegetación	8648678,1	1	8648678,1	59,26	0,0015
Vegetación	23299,81	1	23299,81	0,16	0,7099
Error	583811,11	4	145952,78		
Total	26324994	11			
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=671,44469					
Error: 175452,5946 gl: 4					
Tipo agua	Medias	n	E.E.		
L	479,79	6	171	A	
T	2815,56	6	171	B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1811,68687					
Error: 145952,7769 gl: 4					
Tipo agua	Parcela	Medias	n	E.E.	
L	2	306,7	2	270,14	A
L	3	356,91	2	270,14	A
L	1	775,78	2	270,14	B
T	2	2446,51	2	270,14	A
T	3	2916,61	2	270,14	A
T	1	3083,56	2	270,14	C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=612,40190					
Error: 145952,7769 gl: 4					
Vegetación	Medias	n	E.E.		
L	Alfalfa	798,72	6	155,97	A
L	CN	2496,63	6	155,97	B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1269,83177					
Error: 145952,7769 gl: 4					
Vegetación	Tipo agua	Medias	n	E.E.	
L	Alfalfa	-325,1	3	220,57	A
L	CN	1284,68	3	220,57	B
L	Alfalfa	1922,54	3	220,57	B
T	CN	3708,58	3	220,57	C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					

Tabla 19 – Análisis de Varianza Delta NTfM vs. NTfE Medido

Análisis de la varianza - Delta Nt final Estimado vs Medido - 0-40 cm - Modelo II					
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV	
Delta Nt fin	12	0,97	0,92	78,64	
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)					
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	16844465	7	2406352,1	19,84	0,0059
Tipo agua	6155065,8	1	6155065,8	50,74	0,0021
Tipo agua>Parcela	406773,62	4	101693,41	0,84	0,5658
Tipo agua>Vegetación	10282625	2	5141312,7	42,38	0,002
Error	485250,99	4	121312,75		
Total	17329716	11			
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=558,32049					
Error: 121312,7482 gl: 4					
Tipo agua	Medias	n	E.E.		
L	-1159,07	6	142,19	A	
T	273,3	6	142,19	B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1651,69622					
Error: 121312,7482 gl: 4					
Tipo agua	Parcela	Medias	n	E.E.	
L	2	-1413,35	2	246,29	A
L	1	-1094,25	2	246,29	B
L	3	-969,62	2	246,29	A
T	2	29,2	2	246,29	A
T	1	327,31	2	246,29	B
T	3	463,4	2	246,29	B
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1157,69253					
Error: 121312,7482 gl: 4					
Tipo agua	Vegetación	Medias	n	E.E.	
L	Alfalfa	-1997,2	3	201,09	A
T	Alfalfa	-732,34	3	201,09	B
L	CN	-320,94	3	201,09	B
T	CN	1278,94	3	201,09	C
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)					

Tabla 21 –Análisis de varianza Delta NH₄⁺(80cm)

Análisis de la varianza - Delta NH ₄ ⁺ - 80 cm							
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV			
Delta NH ₄ ⁺	12	0,78	0,7	17,69			
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)							
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor		(Error)
Modelo	23,97	3	7,99	9,52	0,0051		
Tipo agua	4,33	1	4,33	sd	sd		(Tipo agua:
Tipo agua>P	0	0	0	sd	sd		
Vegetación	19,53	1	19,53	23,28	0,0013		
Vegetación*	0,11	1	0,11	0,13	0,731		
Error	6,71	8	0,84				
Total	30,68	11					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=NAN							
Error: NAN gl: 0							
Tipo agua	Medias	n	E.E.				
T	4,58	6	0 A				
L	5,78	6	0 A				
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)							
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1,21963							
Error: 0,8392 gl: 8							
Tipo agua	Medias	n	E.E.				
T	4,58	6	0,37 A				
L	5,78	6	0,37 A				
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)							
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=1,21963							
Error: 0,8392 gl: 8							
Vegetación	Medias	n	E.E.				
CN	3,9	6	0,37 A				
Alfalfa	6,46	6	0,37			B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)							
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=2,39526							
Error: 0,8392 gl: 8							
Vegetación	Tipo agua	Medias	n	E.E.			
CN	T	3,4	3	0,53 A			
CN	L	4,41	3	0,53 A			
Alfalfa	T	5,76	3	0,53 A		B	
Alfalfa	L	7,15	3	0,53		B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)							

Tabla 22 – Análisis de varianza Delta NO₃⁻ (80cm)

Análisis de la varianza - Delta NO ₃ ⁻ - 80 cm							
Variable	N	R ²	R ² Aj	CV			
Delta NO ₃ ⁻	12	0,72	0,62	52,56			
Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)							
F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor		(Error)
Modelo	677,66	3	225,89	6,88	0,0132		
Tipo agua	221,79	1	221,79	sd	sd		(Tipo agua>
Tipo agua>f	0	0	0	sd	sd		
Vegetación	451,29	1	451,29	13,76	0,006		
Vegetación*	4,58	1	4,58	0,14	0,7185		
Error	262,47	8	32,81				
Total	940,13	11					
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=NAN							
Error: NAN gl: 0							
Tipo agua	Medias	n	E.E.				
L	6,6	6	0 A				
T	15,2	6	0 A				
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)							
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=7,62595							
Error: 32,8087 gl: 8							
Tipo agua	Medias	n	E.E.				
L	6,6	6	2,34 A				
T	15,2	6	2,34			B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)							
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=7,62595							
Error: 32,8087 gl: 8							
Vegetación	Medias	n	E.E.				
CN	4,77	6	2,34 A				
Alfalfa	17,03	6	2,34			B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)							
Test:Tukey Alfa=0,05 DMS=14,97675							
Error: 32,8087 gl: 8							
Vegetación	Tipo agua	Medias	n	E.E.			
CN	L	1,08	3	3,31 A			
CN	T	8,45	3	3,31 A		B	
Alfalfa	L	12,11	3	3,31 A		B	
Alfalfa	T	21,95	3	3,31		B	
Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)							