

Preparado para:



**DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE NITRÓGENO  
DE DIVERSAS FUENTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS,  
EN CUENCAS PILOTO SELECCIONADAS.**

**INFORME FINAL**

**GP-INF-S-247, Rev. Q**

**Octubre 2012**

**GP Consultores Ltda.**®  
Recursos Hídricos y Medio Ambiente



Preparado para:



**DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE NITRÓGENO  
DE DIVERSAS FUENTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS,  
EN CUENCAS PILOTO SELECCIONADAS.**

**INFORME FINAL**

Q	02 Octubre 2012	Informe aprobado por: ASPROCER SAG FONDO SAG	EFA	RA	AGD	ASPROCER SAG FONDO SAG e-mail del jueves 27/09/2012
0	17 Julio 2012	Revisión ASPROCER	EFA	RA	AGD	DAG/RCG e-mail del miercoles 25/07/2012
0.1	11 Junio 2012	Revisión interna	EFA	MPP	AGD	
<b>REV</b>	<b>FECHA</b>	<b>EMITIDO PARA</b>	<b>POR</b>	<b>REV.</b>	<b>APR.</b>	<b>APR.</b>
			<b>GP Consultores Ltda.</b>			<b>ASPROCER</b>
			<b>Proyecto: GP-08-04</b>			
			<b>GP-INF-S-247</b>			<b>REV</b> <b>Q</b>

Preparado para:



# **DETERMINACIÓN DE LA PRESENCIA DE NITRÓGENO DE DIVERSAS FUENTES EN AGUAS SUBTERRÁNEAS, EN CUENCAS PILOTO SELECCIONADAS.**

## **Informe Final**

**GP-INF-S-247, Rev. Q**

**Octubre 2012**

Este estudio ha sido desarrollado bajo los estándares establecidos por un Sistema de Gestión de Calidad aprobado por Bureau Veritas Certification conforme con ISO 9001:2008. Certificado Bureau Veritas Certification: 4018 y CL 101.655

<b>Elaboró</b>	<b>Revisó</b>	<b>Aprobó</b>
Emilio Fernández Ing. Civil (Hidráulica), MSc Junio 2012	Ramón Aravena Geoquímico PhD Octubre 2012	Alejandro Grilli Ing. Civil (Hidráulica) Octubre 2012

## **EQUIPO PROFESIONAL**

---

**GP Consultores Ltda.**

Alejandro Grilli	Ing. Civil (Hidráulica)
Ramón Aravena	Geoquímico, PhD
Emilio Fernández	Ing. Civil (Hidráulica), MSc.
Marlin Rempel	Hidrogeólogo MSc.
Rossana Tapia	Geólogo
Viviana Avendaño	Geólogo
Juan Salgado	Ingeniero Civil en Geografía
Gabriel Letelier	Ingeniero Civil (Hidráulica)
Susana Sagardia	Ingeniero Agrónomo
Makarena Avila	Química

**ASPROCER.**

Rodrigo Castañon	Ing. Civil Industrial, Gerente General
Daniela Álvarez	Ingeniero Agrónomo, Jefe Departamento Ambiental

**Contraparte Técnica.**

Subdepartamento de Gestión Ambiental, Servicio Agrícola y Ganadero.



## ÍNDICE DE MATERIAS

---

	<b><u>Pág.</u></b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Antecedentes Generales.....	4
1.3. Objetivos del Proyecto.....	8
1.4. Organización del Informe.....	9
<b>2. MARCO CONCEPTUAL.....</b>	<b>10</b>
2.1. Cómo se Contaminan los Acuíferos .....	10
2.2. El Ciclo del Nitrógeno.....	12
2.3. Controles en la Concentración de Nitratos en Aguas Subterráneas.....	13
2.4. Uso de Isótopos Estables en Estudios de Contaminación por Nitratos.....	15
2.5. Otras Aplicaciones de Interés de Isótopos Estables y Radioactivos en Estudios de Contaminación	19
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>25</b>
3.1. Introducción.....	25
3.2. Selección de los Sectores Pilotos.....	25
3.3. Caracterización de los Sectores Pilotos Seleccionados.....	28
3.4. Caracterización Físico-Química e Isotópica de las Potenciales Fuentes de Nitratos a las Aguas Subterráneas.....	29
3.5. Caracterización Físico-Química e Isotópica de las Aguas Subterráneas.....	31
3.6. Interpretación de la Información Físico-Química e Isotópica de las Aguas.....	37
3.7. Estudio Complementario de Suelos.....	39
<b>4. SELECCIÓN DE SECTORES PILOTOS.....</b>	<b>40</b>
4.1. Introducción.....	40
4.2. Producción Porcina.....	41
4.3. Criterios Aplicados para la Selección de los Sectores Pilotos.....	43
4.4. Reconocimiento Inicial de los Sectores en Comuna San Pedro.....	51
4.5. Reconocimiento Inicial del Sector Tinguiririca (Comuna Pichidegua).....	52
4.6. Reconocimiento Inicial del Sector Estero La Higuera (Comuna Melipilla).....	53
4.7. Selección de Dos Sectores Pilotos.....	54
<b>5. FUENTES POTENCIALES DE NITRATOS.....</b>	<b>56</b>
5.1. Sector San Pedro.....	56
5.2. Sector Pichidegua.....	72
<b>6. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO, SECTOR SAN PEDRO.....</b>	<b>85</b>
6.1. Introducción.....	85
6.2. Geomorfología del Área.....	85
6.3. Geología de Superficie.....	89

	<u><b>Pág.</b></u>
6.4. Geología de Subsuperficie.....	103
6.5. Dinámica de las Aguas Subterráneas.....	107
<b>7. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO, SECTOR PICHIDEGUA.....</b>	<b>115</b>
7.1. Introducción.....	115
7.2. Geomorfología del Área.....	115
7.3. Geología de Superficie.....	118
7.4. Geología de Subsuperficie.....	131
7.5. Dinámica de las Aguas Subterráneas.....	136
<b>8. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.....</b>	<b>143</b>
8.1. Sector San Pedro.....	143
8.2. Sector Pichidegua.....	167
<b>9. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....</b>	<b>189</b>
9.1. Sector San Pedro.....	189
9.2. Sector Pichidegua.....	209
<b>10. RESUMEN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>226</b>
10.1. Sector San Pedro.....	227
10.2. Sector Pichidegua.....	242
10.3. Conclusiones Generales.....	256
<b>11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>261</b>

**ANEXOS:**

- ANEXO A:** Selección de Sectores Pilotos
- ANEXO B:** Balance de Nitrógeno
- ANEXO C:** Estudio Complementario de Suelo
- ANEXO D:** Geología e Hidrogeología
- ANEXO E:** Resultados Monitoreos Físico – Químicos

**DVD:**

SIG sectores San Pedro y Pichidegua

## 1. INTRODUCCIÓN

---

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El presente informe integra los resultados del proyecto “Determinación de la Presencia de Nitrógeno de Diversas Fuentes en Aguas Subterráneas, en Cuencas Piloto Seleccionadas” que se inicia a comienzos del año 2008, extendiéndose por cuatro años, y que corresponde a una iniciativa público privada, liderada por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) y la Asociación de Productores de Cerdos de Chile (ASPROCER). Durante la ejecución del proyecto se generaron una serie de informes semestrales y anuales con el detalle de las actividades ejecutadas y sus resultados, así como también informes específicos referidos a la selección de los sectores pilotos (GP-INF-S-014B de agosto 2008 y GP-INF-S-024 de enero 2009), y a la determinación de los parámetros hidráulicos en las series de suelos de San Pedro y Pichidegua (GP-INF-S-145, julio 2010).

El proyecto se enmarca en el Segundo Acuerdo de Producción Limpia<sup>1</sup> del sector de producción porcina intensiva y, en particular, en los compromisos adquiridos en esa oportunidad por la Asociación de Productores de Cerdos<sup>2</sup> de Chile.

Los sectores públicos y privados participantes en ese Acuerdo, promovieron la iniciativa de generar información que permita superar las incertidumbres existentes en relación con la falta de información técnica relativa al proceso del nitrógeno en el suelo, a la presencia de nitrógeno en

---

<sup>1</sup> Un Acuerdo de Producción Limpia (APL) es un instrumento de gestión ambiental que se perfecciona a través de un pacto público-privado, cuyo objetivo es que un determinado sector productivo cumpla ciertos compromisos y metas de carácter ambiental. Con ello se pone énfasis en la gestión empresarial para resolver problemas ambientales, con preferencias a criterios exclusivamente sancionatorios. En tal sentido, los APL constituyen una innovación importante por parte del Estado en materia de gestión ambiental, por cuanto constituyen un instrumento basado en la coordinación, el diálogo y la acción conjunta de los actores involucrados en la implementación de la política de producción limpia, propiciando un desarrollo gradual, que permita mejoras continuas e incrementales. Su adhesión tiene carácter voluntario por parte de las empresas; sin embargo, una vez suscrito, todas las partes firmantes y suscriptoras del Acuerdo deben cumplir los compromisos adquiridos y someterse a las instancias que aquel establezca.

<sup>2</sup> La Asociación de Productores de Cerdos de Chile (ASPROCER) está compuesta por productores industriales, medianos y pequeños, reuniendo a 35 empresas que suman más de 196 mil hembras reproductoras, lo que representa alrededor de un 90% de la producción total de cerdos del país.

las aguas subterráneas y a las posibles fuentes aportantes, como una herramienta de ayuda en el proceso de toma de decisión.

La producción de ganado porcino presenta una alta concentración de planteles de explotación en la zona central del país, localizados principalmente en zonas agrícolas donde generalmente coexisten con otras potenciales fuentes de nitrógeno tales como fertilizantes industriales, aguas servidas usadas en regadío y focos puntuales asociados a fosas sépticas y pozos negros. El nitrógeno por lo tanto, es un tema transversal a toda la agricultura derivado de la aplicación de fertilizantes orgánicos e inorgánicos. En consecuencia, en áreas donde se encuentra la industria del cerdo y donde los purines<sup>3</sup> son utilizados en el regadío de cultivos o como fertilizantes orgánicos, o bien como aporte de materia orgánica a los suelos, se estima necesario evaluar el aporte de nitratos a las aguas subterráneas proveniente de los purines, en relación a las otras fuentes históricas que han existido en esas zonas agrícolas.

Una de las características de los purines de cerdos es su contenido de Nitrógeno, el cual se encuentra en forma de Nitrógeno Orgánico y Amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Dado que un alto porcentaje de los purines son utilizados como abono orgánico o mejoradores del suelo, el nitrógeno eventualmente puede llegar al agua subterránea como Nitrato, causando un problema potencial en el uso del recurso hídrico, principalmente limitando su uso en agua potable (bebida de la población).

En el país se han realizado estudios que analizan el proceso del nitrógeno proveniente de la aplicación de purines, pero sólo a nivel de las raíces de las plantas. Ha predominado una visión agronómica. Sin embargo, no se han analizado los procesos del nitrógeno en el perfil de suelo no-saturado (bajo la profundidad de las raíces) y en las aguas subterráneas mismas, donde es importante la inclusión de una serie de variables hidrogeológicas específicas del sitio de estudio para obtener una visión más completa del proceso del Nitrógeno en el suelo.

Las preguntas que surgen, son:

- ¿Qué procesos sufre el Nitrógeno en el suelo, más allá de la zona radicular? ¿Cuáles son las variables relevantes que participan en este proceso?
- ¿Cuáles son los niveles actuales de concentración de Nitratos en las aguas subterráneas en los sectores en donde se emplazan los productores de cerdo?
- ¿Son los productores de cerdo y específicamente la aplicación de purines que efectúan agricultores como fertilizantes, responsables de la presencia de Nitratos en las aguas subterráneas? ¿Existen otros aportes de Nitrógeno en los sectores donde se ubican los productores de cerdos?

---

<sup>3</sup> En la crianza convencional de cerdos, los animales son mantenidos en corrales sobre piso falso, los cuales son lavados diariamente, y los residuos generados corresponden a una suspensión acuosa denominada **purín**, que contiene las excretas animales líquidas y sólidas, el agua de lavado de pisos y la cama animal propiamente tal (paja, viruta, u otro material) compuesta mayoritariamente por residuos vegetales fibrosos.

La recopilación y análisis de la información disponible en el país (servicios públicos, universidades y productores) muestra que no existe información suficiente para responder las preguntas antes formuladas.

Por lo tanto, se requiere avanzar en el conocimiento de materias, tales como:

- ♦ Análisis del proceso del Nitrógeno en el suelo más allá de la zona radicular.
- ♦ Caracterización de la calidad de las aguas de los acuíferos ubicados en el área de influencia de las instalaciones o planteles de cerdo o en los terrenos en donde se aplican los purines (si estos se encuentran fuera del plantel productor).
- ♦ Evaluación del posible efecto en el agua subterránea a nivel regional, del eventual aporte de nitrato al acuífero en áreas en que se utilizan purines como fertilizantes.

Para el logro de lo anterior se requiere capturar en terreno nueva información que permita evaluar la incidencia de la aplicación de purines y de las otras potenciales fuentes aportantes, identificando las características particulares que hacen variar la cantidad de Nitratos que llega a las aguas subterráneas y las concentraciones resultantes en la zona saturada del sistema acuífero.

Es sabido que el aporte de Nitratos depende de múltiples factores tales como el clima, las características hidrogeológicas del suelo y los acuíferos, pendiente del terreno, carga de Nitrógeno de diferentes fuentes aportantes, entre otros. En un análisis de sensibilidad realizado por Arumi et al (2002), se postula que la percolación de Nitratos desde la zona no-saturada y que finalmente afecta la concentración de Nitratos en las aguas subterráneas, depende en forma importante del nivel inicial de nitrógeno en el suelo, de la permeabilidad del suelo y del monto de lluvias.

Lo anterior deja en evidencia la importancia de las características específicas del área de estudio en la evaluación de las concentraciones de Nitratos y su relación con sus distintas fuentes potenciales, por lo que es necesario efectuar el análisis caso a caso. Considerando lo señalado, el proyecto considera su ejecución en cuencas o sectores hidrogeológicos pilotos, a ser seleccionados dentro del proyecto (en la zona central del país), en base a la aplicación de diferentes criterios consensuados entre los Productores de Cerdos y el Servicio Agrícola y Ganadero.

Se espera que los resultados del proyecto permitan validar una metodología de evaluación de los niveles de Nitrógeno en las aguas subterráneas, sus posibles fuentes de origen y la incidencia del sector agropecuario, lo cual a su vez permitirá evaluar la eficacia de los planes de aplicación de purines de cerdos. Todo lo anterior con el propósito de alcanzar una producción porcina sustentable y una mejor toma de decisión en proyectos e inversiones futuras.

## 1.2 ANTECEDENTES GENERALES

Las aguas subterráneas representan una de las principales fuentes de agua para consumo humano debido a su óptima calidad y segura disponibilidad. Dado lo anterior, existe una gran presión sobre este recurso, la cual se superpone a actividades antrópicas que afectan o potencialmente pueden alterar la calidad del recurso hídrico subterráneo.

La contaminación de las aguas subterráneas es un tema de especial preocupación a nivel mundial en términos de sus potenciales impactos en las fuentes de abastecimiento de agua potable y por ende en la salud de la población, y en aguas superficiales que se alimentan de éstas. Cuando el agua subterránea ha sido contaminada, uno de los aspectos más importantes que deben ser evaluados para la determinación de las causas y de las posibles medidas o soluciones a ser aplicadas, corresponde a la identificación de los agentes contaminantes y de la localización de las fuentes causantes de la contaminación.

En áreas dedicadas a la agricultura, la identificación de los agentes contaminantes, asociados usualmente a nitrato y pesticidas, es una tarea esencial para efectuar posteriormente un plan de manejo que permita reducir el ingreso de contaminantes a las aguas subterráneas. Sin embargo, en estos sectores es difícil obtener esta información, especialmente cuando existen múltiples plumas<sup>4</sup> para un mismo contaminante y superpuestas entre sí.

Tomando en cuenta el tipo y origen de la contaminación de las aguas subterráneas, Bedient et. al (1999), clasifica las fuentes de contaminación de aguas subterráneas en 6 categorías principales, las cuales se presentan en la **Tabla N°1.1**.

El principal interés del presente proyecto corresponde al estudio de los niveles de nitratos en aguas subterráneas en áreas agrícolas y rurales de Chile central, las cuales estarían asociadas a las fuentes incluidas en la Categoría IV (**Tabla N°1.1**). En ese caso, las potenciales fuentes de nitratos son difusas y estarían asociadas principalmente a prácticas agrícolas, relacionadas con la aplicación de nitrógeno orgánico e inorgánico sobre grandes extensiones de terreno cultivado (p.e. purines y fertilizantes sintéticos). Estas prácticas a nivel mundial se han visto incrementadas fuertemente en los últimos 50 a 60 años (Mosier, et al., 2001). Además, para el caso del sector rural, típicamente compuesto de pequeñas comunidades, se presentan adicionalmente otras fuentes puntuales y localizadas de nitratos hacia las aguas subterráneas (Categoría I, **Tabla N°1.1**), principalmente asociadas al tipo de manejo sanitario de las aguas residuales en estas comunidades rurales, las cuales presentan principalmente tanques sépticos y/o pozos negros.

En cierto tipo de problemas de contaminación de aguas subterráneas y para ciertos contaminantes específicos, la utilización de trazadores isotópicos para analizar el problema puede entregar valiosísima información en la identificación de la o las fuentes contaminantes, así como también, proveer de información que permita identificar los principales procesos que estén afectando la concentración de los contaminantes en el sistema subterráneo (Aravena y Mayer, 2009).

---

<sup>4</sup> Flujo identificable, con una composición diferente a la de su ambiente.

**Tabla N°1.1:** Fuentes de contaminación de Aguas Subterráneas (adaptado de Bedient et. al, 1999).

CATEGORIA	Definición	Descripción
I	Fuentes diseñadas para descargar	Percolación Subsuperficial (ej. tanques sépticos y pozos negros) Pozos de Inyección
II	Fuentes diseñadas para almacenar, tratar y/o disponer sustancias; Descargas no planificadas	Rellenos Sanitarios Embalses abiertos Tranques superficiales Tranques de relaves Pilas de desechos Pilas de acumulación de materiales Estanques de almacenamiento superficiales Estanques de almacenamiento subterráneos Lugares de disposición de elementos Radioactivos
III	Fuentes diseñadas para retener sustancias durante el transporte y transmisión	Tuberías Materiales de transporte y transferencia
IV	Descargas de Fuentes como consecuencias de otras actividades planificadas.	Prácticas de riego Aplicaciones de pesticidas Aplicación de fertilizantes Operaciones de alimentación Animal Escorrentía Urbana Percolación de contaminantes atmosféricos Minería y drenaje minero
V	Fuentes provenientes de conductos de descarga o descargas inducidas mediante alteración de los patrones de flujo	Pozos de producción Otros pozos Construcción excavación
VI	Fuentes naturales cuyas descargas es creada y/o exacerbada por actividad humana	Interacción aguas subterráneas – aguas superficiales Lixiviación Natural Intrusión Salina

### Contaminación por Nitratos

El Nitrógeno puede ser encontrado en aguas naturales en variadas formas químicas, incluyendo las formas acuosas  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , gases disueltos  $\text{N}_2$  y  $\text{NH}_3$ , y en moléculas orgánicas (Org-N). El Nitrógeno en el suelo y aguas subterráneas es afectado por tres reacciones principales, las que corresponden a la Amonificación, Nitrificación y Desnitrificación. De las reacciones antes mencionadas, los nitratos se ven envueltos en las reacciones de Nitrificación y Desnitrificación. En general, en la zona no saturada del suelo el oxígeno es abundante, por lo que la mayor parte del nitrógeno aplicado en superficie que alcanza las aguas subterráneas ha sido afectado por nitrificación, encontrándose en su forma oxidada como nitrato (Roadcap, et. al, 2002).

La contaminación de las aguas subterráneas por nitratos puede presentar fuentes variadas. Eventualmente, las fuentes de nitratos son fácilmente identificables en superficie (p.e. cuando existe sólo una fuente de nitratos); sin embargo, en la mayoría de los casos, por ejemplo en áreas agrícolas y rurales que han sido urbanizadas, es extremadamente difícil distinguir entre las fuentes antropogénicas de las naturales. Motzer (2006), enumera las siguientes fuentes de nitratos principales:

Fuentes Antrópicas:

- ◆ Sistemas sépticos,
- ◆ Descargas de Aguas Servidas,
- ◆ Desechos Animales,
- ◆ Fertilizantes Nitrogenados utilizados en hogares y sectores agrícolas,
- ◆ Explosivos y elementos pirotécnicos tales como fuegos artificiales, bengalas, antorchas y municiones,
- ◆ Degradación de cianuro ( $CN^-$ ), usualmente encontrado en áreas de emplazamiento histórico de fábricas de gas.

Fuentes Naturales:

- ◆ Depósitos derivados de desiertos,
- ◆ Caliche y depósitos de evaporación,
- ◆ Suelos en zonas desérticas.

La contaminación por nitratos de las aguas subterráneas es un problema de especial importancia en los países o regiones con agricultura intensiva y/o con alta densidad de población, ya que este tipo de contaminación puede producir problemas a la salud de la población, así como también, impactos ambientales (Addiscott, 2005).

La bibliografía consultada identifica que los dos principales efectos sobre la salud humana, asociados a la contaminación de aguas por nitratos, son la metahemoglobinemia y el cáncer. Por ejemplo, cuando el nitrato es consumido por los animales y los seres humanos es reducido a nitrito en el tracto digestivo, acción que es mediada por bacterias. Después de esta reducción, el nitrito es absorbido en la sangre donde se combina con la hemoglobina formando metahemoglobina, la que no es capaz de transportar oxígeno. Como resultado, el suministro de oxígeno a los tejidos del cuerpo se reduce. Esta enfermedad se llama metahemoglobinemia o síndrome del bebé azul (Addiscott, 2005).

Por otra parte, Fukada et. al (2004) señala, a partir de un estudio elaborado por Nomura (1996), que hay evidencia sustancial, sobre la base de experimentos con animales, que se han encontrado compuestos cancerígenos N-nitrosos en el estómago y el tracto intestinal después de la ingestión crónica de nitratos elevados.

Debido a lo anterior, con el fin de evitar problemas a la salud humana se ha establecido como concentración máxima de nitratos en agua potable un límite de 10 mg/L de  $N-NO_3^-$  (o 50 mg/L de  $NO_3^-$ ), estableciéndose así dicho límite como un estándar mundial para la calidad del agua potable (establecido por la Organización Mundial de la Salud). En concordancia con ello, la concentración máxima de nitratos permitida por la NCh 409/1 para las aguas de consumo humano es de 50 mg/L.

Respecto a los impactos ambientales de la contaminación por nitratos, el foco de interés se coloca también en la interacción entre el agua subterránea contaminada y cuerpos de agua superficiales, debido a que un alto nivel de nitrato puede causar eutrofización de las aguas superficiales. Asimismo, durante la nitrificación o desnitrificación incompleta se genera óxido nitroso, compuesto que contribuye al efecto invernadero y a la destrucción de la capa de ozono en la atmósfera (Addiscott, 2005).



## **Contaminación de Nitratos asociada a la Agricultura**

Un caso particular de la contaminación por nitratos corresponde al que se puede encontrar en zonas rurales. En estas zonas, las prácticas agrícolas representan una amenaza importante para las aguas subterráneas, ya que el nitrógeno, al ser uno de los nutrientes más importantes requeridos por los cultivos, se añade artificialmente para fomentar el crecimiento de las plantaciones. La aplicación de nitrógeno se efectúa mediante el uso de fertilizantes sintéticos y purines.

A pesar de que las descargas de aguas residuales y la presencia de fosas sépticas no están necesariamente relacionadas a las áreas agrícolas es muy común encontrar estos sistemas en zonas rurales. Por ejemplo, las aguas residuales a veces son aplicadas como regadío en tierras cultivadas y los pozos sépticos son utilizados generalmente como los sistemas de saneamiento en estas pequeñas comunidades.

Luego, es posible encontrar diferentes fuentes de nitrato en las zonas agrícolas, las cuales podrían afectar la concentración de nitratos en las aguas subterráneas. Por esta razón, la evaluación de las fuentes de contaminación por nitratos es fundamental en el diseño de programas eficaces de gestión de nutrientes, lo cual controlará la posibilidad de contaminación de las aguas subterráneas en el sistema y reducirá los riesgos para la salud humana y los posibles efectos ambientales.

### **Aplicación de Purines de Cerdo en Áreas Agrícolas de Chile**

En Chile, el desarrollo de actividades agrícolas es muy frecuente e importante para la economía del país. Algunos ejemplos de ello corresponden a la producción de frutas, vegetales y a la producción vitivinícola, todo esto, tanto para consumo interno como para exportación. Asociado a estas actividades, surge también la producción pecuaria, siendo frecuente la existencia de criaderos de animales, entre los cuales destaca la producción de cerdos.

La industria porcina en Chile se concentra en la zona central del país, mayoritariamente en áreas agrícolas. Esta industria se encuentra en crecimiento y ha experimentado un desarrollo muy dinámico en la última década (ASPROCER, 2008). Este desarrollo conlleva el incremento en la producción de purines de cerdos, los cuales presentan un alto contenido de nitrógeno, principalmente en sus formas de nitrógeno orgánico y amonio ( $\text{NH}_4^+$ ). Eventualmente, el nitrógeno puede alcanzar el sistema acuífero como nitrato, lo cual implica que existe un potencial de contaminación de nitratos en aquellas áreas con cultivos en donde se aplica purines de cerdo en exceso.

Cabe hacer notar que, la aplicación de purines en agricultura típicamente coexiste con otras fuentes potenciales de nitratos, como por ejemplo, fertilizantes sintéticos, aguas servidas utilizadas en riego, y algunas fuentes puntuales como pozos sépticos y pozos negros. Luego, el nitrógeno es un tópico transversal al sector agrícola, debido al uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos.

De esta manera, en áreas donde se ubica la industria porcina y donde se utiliza los purines de cerdos (como un fertilizante orgánico o como mejorador de suelo), se hace muy necesaria la evaluación y seguimiento de los niveles de nitratos en las aguas subterráneas, y desarrollar una

metodología de estudio, que permita evaluar el aporte de las diferentes fuentes de nitratos potenciales (orgánicas e inorgánicas) en estas áreas.

### **1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO**

El Objetivo General del proyecto es determinar el nivel de presencia de compuestos nitrogenados de origen agrícola, y sus fuentes, en aguas subterráneas.

Los Objetivos Específicos son los siguientes:

1. Seleccionar sectores hidrogeológicos (“sectores pilotos”) para la realización del proyecto. Los “sectores pilotos” deben cumplir con al menos las siguientes condiciones:
  - ◆ Presentar diferentes características litológicas en la zona no-saturada (importancia relativa de la presencia de suelos finos en el perfil de suelo),
  - ◆ Presentar una alta densidad de Planteles de cerdos,
  - ◆ Presentar tecnologías similares de aplicación de purines,
  - ◆ Presencia de Nitratos en las aguas subterráneas,
  - ◆ Que exista acceso a la caracterización de las potenciales fuentes de nitratos,
  - ◆ Existan antecedentes hidrogeológicos previos.
2. Caracterizar los sectores seleccionados, identificando las potenciales fuentes aportantes de Nitrógeno al suelo, las características hidrogeológicas y la información disponible en cada sector. En ellos, evaluar la condición actual de concentraciones de nitrato en las aguas subterráneas.
3. Caracterizar las Potenciales Fuentes Superficiales de nitratos al agua subterránea en los sectores pilotos. En lo fundamental, comprende:
  - a) Identificar potenciales fuentes de aporte de N al suelo en los sectores pilotos,
  - b) Evaluar la carga de N que disponen en el suelo,
  - c) Efectuar balances de nitrógeno por sectores, de las diferentes aplicaciones en la superficie del terreno.
4. Identificar Trazadores Químicos y/o Isotópicos de los purines, para evaluar su aporte relativo de Nitratos al Agua Subterránea. Comprende:
  - a) Identificar elementos trazas y el contenido isotópico ( $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) de las potenciales fuentes de aportes por nitratos de las aguas subterráneas, tales como: purines, fertilizantes utilizados en agricultura, residuos domésticos, de animales, otras.
  - b) Caracterizar las aguas subterráneas en el entorno de los Planteles de cerdos en relación a la concentración de nitratos y a la presencia y magnitud de los trazadores químicos e isotópicos previamente identificados en las fuentes.
5. Identificar el impacto de la aplicación de purines sobre los contenidos de nitratos en aguas subterráneas. Integrar la información y conclusiones del proyecto, en un informe final.

## **1.4 ORGANIZACIÓN DEL INFORME**

El informe ha sido organizado en los siguientes capítulos:

**Capítulo 1:** Introducción y Objetivos del Proyecto

**Capítulo 2:** Marco Conceptual

**Capítulo 3:** Metodología Aplicada

**Capítulo 4:** Criterios Aplicados y Selección de dos Sectores Pilotos, donde se desarrolla el Proyecto

**Capítulo 5:** Fuentes Potenciales de Nitratos en los dos Sectores Pilotos Seleccionados (San Pedro y Pichidegua)

**Capítulo 6:** Marco Geológico e Hidrogeológico, Sector San Pedro

**Capítulo 7:** Marco Geológico e Hidrogeológico, Sector Pichidegua

**Capítulo 8:** Caracterización Hidroquímica e Isotópica de las Aguas Subterráneas en los dos Sectores Pilotos

**Capítulo 9:** Discusión de los Resultados

**Capítulo 10:** Conclusiones

**Capítulo 11:** Referencias Bibliográficas

## 2. MARCO CONCEPTUAL

---

### 2.1 CÓMO SE CONTAMINAN LOS ACUÍFEROS

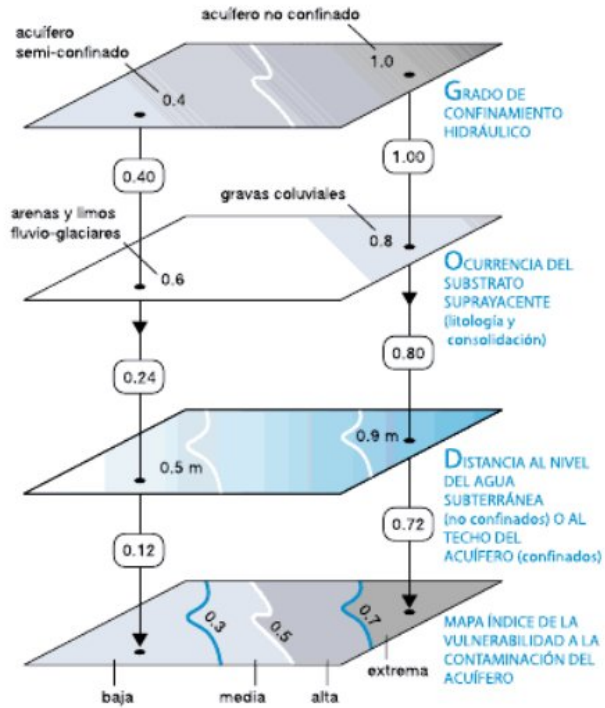
La contaminación de acuíferos ocurre si la carga contaminante sub-superficial generada por descargas y lixiviados antropogénicos no se controla adecuadamente y (en ciertos componentes) excede la capacidad natural de atenuación del terreno y los estratos subyacentes (Foster et al, 2002). Entonces, el peligro de contaminar las aguas subterráneas dependerá de la interacción entre la vulnerabilidad de un acuífero a la contaminación y la carga contaminante que es, será o pudiera ser aplicada al ambiente sub-superficial.

La vulnerabilidad es función de una serie de características intrínsecas del acuífero, referidas a la parte del terreno situada sobre la superficie del nivel saturado. Esas características incluyen aspectos mineralógicos, nivel de consolidación y fisuración y grado de desarrollo del suelo vegetal (ver **Figura N°2.1**). Según esta definición, la vulnerabilidad dependerá de (Foster, 1991):

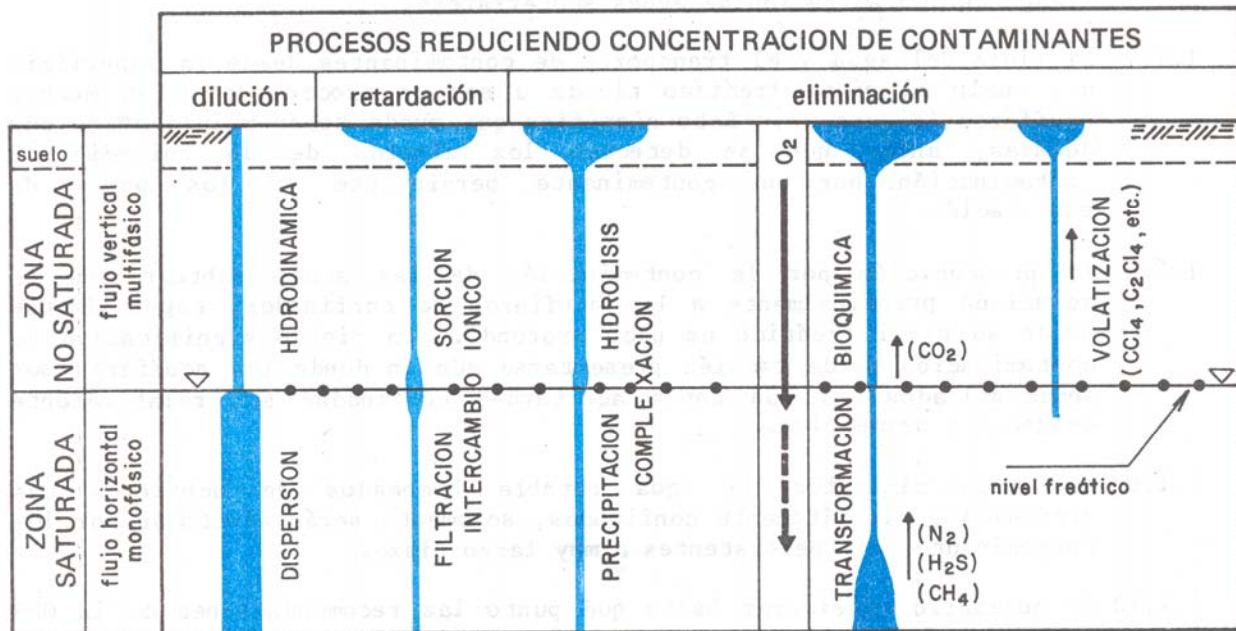
- la inaccesibilidad hidráulica de la zona no saturada a la penetración de contaminantes;
- la capacidad de atenuación de dicha zona como resultado de la retención físico-química o de la reacción de los contaminantes con el terreno.

Asimismo, los procesos que determinan el alcance y evaluación de la contaminación de las aguas subterráneas (ver **Figura N°2.2**) pueden resumirse en (adaptado de Custodio y Llamas, 1976):

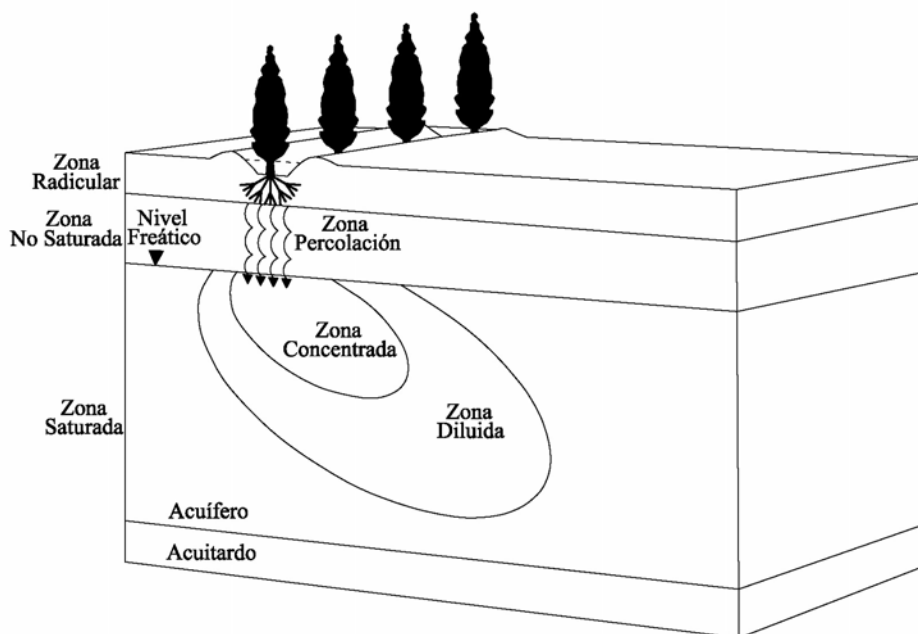
- Filtración mecánica de las partículas y bacterias en suspensión, acentuada en acuíferos con porosidad intergranular y poros de pequeños tamaños y uniformemente distribuidos.
- Oxidación-reducción, en particular de compuestos nitrogenados y metales pesados durante su paso por la zona no saturada, en la que es más intensa la actividad de microorganismos, especialmente en la zona de raíces.
- Adsorción y absorción, que incrementan el período de permanencia del contaminante en el terreno y, por consiguiente, la posibilidad de una depuración mayor, favorecida por el intercambio iónico y la acción bacteriana.
- Dilución por mezcla con aguas de mejor calidad, especialmente en la zona saturada del acuífero (**Figura N°2.3**). La capacidad de almacenamiento del acuífero condiciona en este caso el alcance del proceso.
- Transformaciones bioquímicas.



**Figura N°2.1:** Generación de un mapa de vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, utilizando la metodología GOD, con base en las características hidrogeológicas de la zona no saturada o de las capas confinantes suprayacentes (adaptado de Foster, et al., 2002)



**Figura N°2.2:** Procesos que producen atenuación de contaminantes en los sistemas de aguas subterráneas. El grosor de la correspondiente línea azul indica típicamente la importancia relativa del proceso en el suelo (zona de raíces), sobre (zona no saturada), dentro y debajo (zona saturada) del nivel freático de las aguas subterráneas (adaptado de Foster, S y R. Hirata, 1991)



**Figura N°2.3:** Esquema de los procesos de infiltración/percolación de un flujo que transporta solutos desde la superficie del terreno y su movimiento, dispersión y dilución en la zona saturada del sistema acuífero

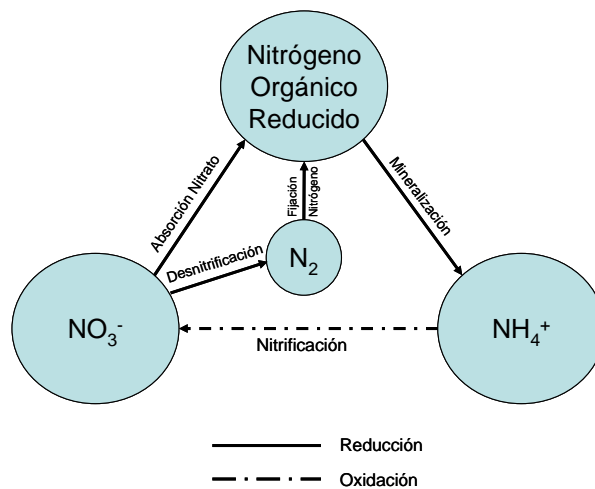
## 2.2 EL CICLO DEL NITRÓGENO

El ciclo del nitrógeno representa uno de los ciclos más importantes de nutrientes en los ecosistemas terrestres. La principal fuente de nitrógeno corresponde al nitrógeno atmosférico ( $N_2$ ), el cual se encuentra presente naturalmente en el ambiente en forma de gas, siendo convertido a nitrógeno orgánico a través de procesos de fijación de nitrógeno. Luego de la muerte de las plantas, los compuestos orgánicos del nitrógeno son degradados por microorganismos a través de un proceso llamado mineralización. Como resultado de la mineralización se produce amonio inorgánico, el cual, a su vez, se transforma en nitrato por un proceso de oxidación llamado nitrificación. Continuando con el ciclo, la desnitrificación se produce en ambientes anóxicos, donde algunos microorganismos son capaces de utilizar el nitrato en lugar de oxígeno gaseoso en sus procesos metabólicos para producir nitrógeno gas ( $N_2$ ) y/o óxido nitroso ( $N_2O$ ). (Hounslow, 1995).

El nitrógeno es consumido por las plantas como uno de los nutrientes necesario para su crecimiento, en sus formas de amonio ( $NH_4^+$ ) o nitrato ( $NO_3^-$ ). Cuando la materia orgánica se oxida, el nitrógeno se libera en forma de nitrato, y si el nitrato no se consume (por ejemplo, por plantas), es posible que llegue al sistema acuífero, alcanzando las aguas subterráneas. El nitrógeno se pierde en el suelo por lixiviación, desnitrificación, volatilización y por inmovilización, llegando a las aguas subterráneas, principalmente a través del proceso de lixiviación, donde el nitrato, debido a su solubilidad en agua, puede fácilmente moverse con el agua en el suelo.

Un esquema simplificado del ciclo del nitrógeno en el subsuelo, propuesto por Hounslow (1995), se presenta en la **Figura N°2.4**, donde es posible observar que la mayoría de las reacciones

requieren de condiciones oxidantes o reductoras específicas (indicadas por las líneas continuas o segmentadas en el diagrama).

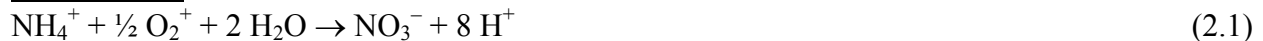


**Figure N°2.4:** Esquema Simplificado del Ciclo del Nitrógeno en Subsuperficie (Hounslow, 1995).

### 2.3 CONTROLES EN LA CONCENTRACIÓN DE NITRATOS EN AGUAS SUBTERRÁNEAS

En el medioambiente, el Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) se encuentra envuelto en dos tipos de reacciones principales. La primera de estas reacciones corresponde a la reacción de nitrificación, cuyo resultado es la producción de nitrato en presencia de oxígeno. La reacción de nitrificación es la siguiente:

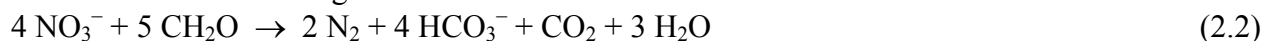
Nitrificación:



La segunda reacción de importancia que involucra al nitrato corresponde a la reacción de desnitrificación que se realiza en condiciones anaeróbicas. El dador de electrones en esta reacción corresponde usualmente a Carbono Orgánico o minerales sulfurados (e.g. pirita). Como productos intermedios de esta reacción se forma nitrito y óxido nitroso (Roadcap, 2002). La Desnitrificación representa un importante mecanismo de atenuación de altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en los sistemas de aguas subterráneas. Las siguientes ecuaciones corresponden a ejemplos típicos de reacciones de desnitrificación:

Desnitrificación:

Oxidación de Materia Orgánica:



Oxidación de Pirita:





A partir de estas reacciones, que representan las vías por las cuales se produce o consume nitratos, pueden ser visualizados los diferentes factores que controlan la disponibilidad del  $\text{NO}_3^-$  en las aguas subterráneas. Estos factores fueron resumidos por Rempel (2008) como sigue:

◆ Producción de  $\text{NO}_3^-$

Los factores más importantes que controlan las tasas de nitrificación corresponden a la disponibilidad del  $\text{NH}_4^+$  y del  $\text{O}_2$  (Firestone y Davidson, 1989; Strauss et al., 2002; Kemp y Dodds, 2002).

Asimismo, otro factor de importancia es el contenido de agua en el suelo, ya que éste controla la difusión del  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{O}_2$ , limitando la tasa de nitrificación.

Además, la disponibilidad de  $\text{NH}_4^+$  puede ser afectada por otros factores, incluyendo las tasas de mineralización, las cuales dependen del contenido de materia orgánica en el suelo, disponibilidad de agua y temperatura. Otra limitante en la disponibilidad de  $\text{NH}_4^+$  corresponde a la absorción de  $\text{NH}_4^+$  efectuada por la vegetación y la adsorción física en el suelo (Robertson, 1989). En sectores agrícolas, la cantidad de fertilizantes amoniacales incorporados en los cultivos también corresponde a un factor que controla la disponibilidad de  $\text{NH}_4^+$ .

◆ Consumo de  $\text{NO}_3^-$

Los factores más importantes que controlan la tasa de desnitrificación corresponden a la disponibilidad de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{O}_2$ , y carbono orgánico como un dador de electrones (Firestone y Davidson, 1989; Robertson, 1989).

El nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y el carbono orgánico corresponden a los reactantes en el proceso de desnitrificación (**ecuación 2.2**), y por esta razón presentan una correlación positiva con la desnitrificación. Por otro lado, la presencia de  $\text{O}_2$  inhibe el proceso de desnitrificación.

La difusión de estos constituyentes es controlada por la presencia de agua y la temperatura.

Obviamente, la disponibilidad de  $\text{NO}_3^-$  en áreas agrícolas es afectada por las prácticas de fertilización y de las otras cargas de nitrógeno existentes en superficie (e.g. pozos sépticos).

Finalmente, se produce un consumo adicional de  $\text{NO}_3^-$  captado por la vegetación.



## 2.4 USO DE ISÓTOPOS ESTABLES EN ESTUDIOS DE CONTAMINACIÓN POR NITRATOS

La medición de la composición isotópica de  $\text{NO}_3$  ( $\delta^{15}\text{N}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ ) en aguas subterráneas y superficiales es potencialmente útil como un método de evaluación de fuentes y procesos que afectan al nitrato en las aguas subterráneas. En este sentido, la composición isotópica es de utilidad para las siguientes evaluaciones:

- ◆ Permite distinguir fuentes de contaminación por nitratos y evaluar sus respectivas contribuciones.
- ◆ Permite evaluar variaciones y tendencias en la contaminación por nitratos.
- ◆ Permite cuantificar el impacto de la desnitrificación y otros procesos de atenuación.
- ◆ Permite definir medidas adecuadas para reducir la contaminación por nitratos y evaluar el grado de efectividad de las medidas aplicadas.

Respecto a la aplicación de la técnica isotópica mencionada, en los puntos siguientes se presenta la base conceptual para su desarrollo.

### 2.4.1 Fundamentos sobre Geoquímica de Isótopos Estables

Los isótopos corresponden a diferentes tipos de átomos de un mismo elemento químico, cada uno con un número diferente de neutrones en su núcleo. En otras palabras, considerando que cada elemento químico queda caracterizado por su número atómico, entonces los isótopos corresponden a elementos con igual número atómico (mismo elemento químico), pero con un número másico diferente (diferente masa).

El Nitrógeno presenta dos isótopos estables,  $^{14}\text{N}$  y  $^{15}\text{N}$ , con una abundancia relativa en el medio ambiente de aproximadamente 99,6 y 0,4 %, respectivamente. Del mismo modo, el oxígeno presenta tres isótopos estables,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{17}\text{O}$  y  $^{18}\text{O}$ , con una abundancia relativa de aproximadamente 99,76, 0,04 y 0,20%, respectivamente.

La medición de Isótopos estables se expresa en delta per mil ( $\delta$  ‰), relativo a algún estándar internacional, tal como se señala en la siguiente expresión:

$$\delta_{\text{muestra}} (\text{‰}) = 1000 \cdot [(R_{\text{muestra}} - R_{\text{estándar}}) / (R_{\text{estándar}})] \quad (2.4)$$

Donde, R corresponde a la razón entre los isótopos más pesado y más liviano, tanto de la muestra, como del estándar, respectivamente. Por ejemplo, en el caso de los isótopos del nitrógeno, R corresponde a la razón  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ , para el caso de los isótopos del oxígeno, R es la razón entre  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ .

Respecto a los estándares utilizados en las mediciones isotópicas, los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  son reportados relativos al aire atmosférico (AIR) y los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  son reportados relativos al agua de mar, representada por el estándar “Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW)”. Luego, los valores isotópicos pueden indicar un enriquecimiento (valores positivos) o empobrecimiento (valores negativos) en los isótopos más pesados.

Los isótopos estables están sujetos a fraccionamiento cinético, lo que significa que el sustrato remanente se enriquece isotópicamente en el isótopo más pesado, lo cual es caracterizado por un factor de enriquecimiento ( $\epsilon$ ) en ‰, el cual se define de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\epsilon = 1000 \cdot (\alpha - 1) \quad (2.5)$$

Donde  $\alpha$  corresponde al factor de fraccionamiento, el cual se define de la siguiente manera:

$$\alpha = K_{^{15}\text{N}}/K_{^{14}\text{N}} \quad \text{o} \quad \alpha = K_{^{18}\text{O}}/K_{^{16}\text{O}} \quad (2.6)$$

Donde, K es una tasa constante en el proceso de transformación.

En un sistema cerrado, la ecuación de Rayleigh representa el enriquecimiento isotópico, tal como sigue:

$$\delta_{S_t} = \delta_{S_0} + \epsilon \ln(S_t/S_0) \quad (2.7)$$

Donde  $\delta_{S_0}$  y  $\delta_{S_t}$  corresponden a la composición isotópica del sustrato al tiempo 0 y t, respectivamente;  $\epsilon$  es el factor de enriquecimiento isotópico;  $S_0$  y  $S_t$  corresponden a las concentraciones del sustrato al tiempo 0 y t, respectivamente (Clark y Fritz, 1997).

#### **2.4.2 Trazadores de Fuentes de Nitrógeno en Aguas Subterráneas: Isótopos Estables, $\delta^{15}\text{N}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en $\text{NO}_3^-$**

El uso de los isótopos estables del nitrógeno y oxígeno ( $^{15}\text{N}$  y  $^{18}\text{O}$ ) son muy comunes en el estudio de problemas de contaminación asociados al nitrato. Ambos isótopos son parte de la molécula del nitrato y proveen de información muy importante y de utilidad como trazadores de fuentes de nitratos, dado que, dependiendo del origen del nitrato, imprime una marca isotópica muy distintiva a las aguas (Aravena y Mayer, 2009).

Se ha observado que el rango típico de valores de  $\delta^{15}\text{N}$  en nitrato se encuentra entre -10 y +25 ‰. Al respecto, cabe destacar que la marca en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$  de las aguas servidas (incluyendo los purines) se distingue frecuentemente de las que presentan otras fuentes de nitratos, sobre la base del valor relativamente alto de  $\delta^{15}\text{N}$  que ellas presentan, el cual responde principalmente al proceso de volatilización de amoníaco, previo a la nitrificación (Hubner, 1986). Por otro lado, la marca de  $\delta^{15}\text{N}$  en nitrato de fertilizantes sintéticos presenta valores cercanos a cero per mil, debido principalmente a que su origen se encuentra en nitrógeno atmosférico. Respecto al nitrato en el suelo, formado por la oxidación de nitrógeno orgánico, presenta en promedio valores de  $\delta^{15}\text{N}$  en un rango que se sobrepone a los valores más altos asociados a fertilizantes sintéticos y a los valores más bajos asociados a desechos animales o aguas residuales (Aravena y Mayer, 2009, **Figura N°2.5**).

En problemas de contaminación asociados al uso de purines, generalmente durante el tiempo en que los purines son almacenados en lagunas o tranques, se tiene que el nitrógeno ahí presente (en forma de amonio,  $\text{NH}_4^+$ ) se encuentra sometido a un proceso de volatilización (Karr et al., 2001). Luego, el nitrógeno remanente en forma de  $\text{NH}_4^+$  se enriquece en los isótopos más pesados ( $^{15}\text{N}$ ).

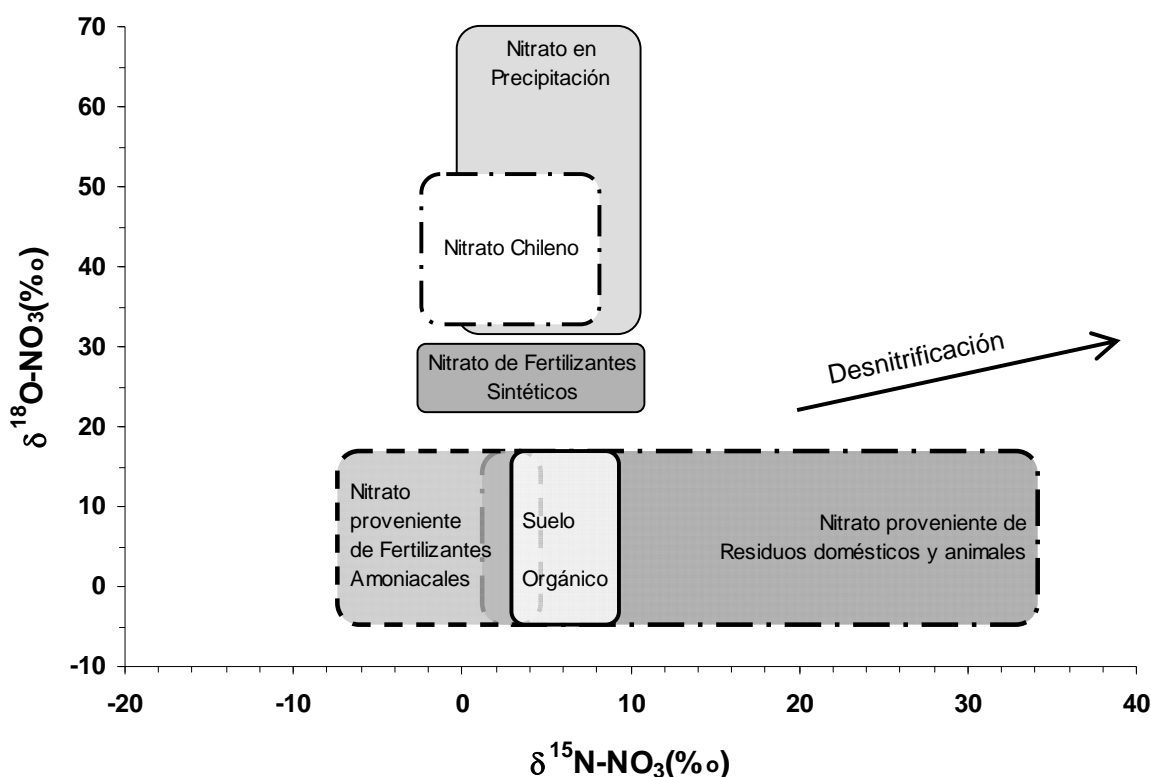
De esta manera, el nitrato que proviene de esta fuente (previa nitrificación) se imprime de una marca isotópica muy distintiva con respecto a las marcas encontradas en fertilizantes o en aguas residuales domésticas (pozos negros, tanques sépticos, etc.). (Aravena y Mayer, 2009)

En el caso de Chile, el nitrato proveniente de depósitos en desiertos (desde el desierto de Atacama) presenta una composición isotópica mucho más enriquecida en  $\delta^{18}\text{O}$  que aquella proveniente de aguas residuales o incluso purines (Aravena y Mayer, 2009).

En resumen, la evaluación de las fuentes de nitrógeno aportantes a las aguas subterráneas se basa en la comparación entre análisis efectuados sobre muestras de aguas subterráneas y las diferentes marcas isotópicas asociadas a las potenciales fuentes. En la **Tabla N°2.1** y en la **Figura N°2.5** se presentan valores típicos de  $\delta^{15}\text{N}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  en nitratos, asociados a distintas fuentes.

**Tabla N°2.1:** Marca isotópica ( $\delta^{15}\text{N}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ ) típicas en nitrato disuelto ( $\text{NO}_3^-$ ) asociadas a diferentes fuentes (Motzer, 2006).

FUENTE POTENCIAL	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)
Fertilizante Comercial	-4 a +4	+18 a +26
Nitrato Chileno	-3 a +8	+32 a +52
Desechos Animales o Humanos	> +10	-4 a +12
Precipitación	-3	+18 a +60
Nitrógeno Orgánico en Suelos	+4 a +9	-4 a +1



**Figura N°2.5:** Valores de  $\delta^{15}\text{N} - \text{NO}_3^-$  y  $\delta^{18}\text{O} - \text{NO}_3^-$  asociados a diferentes fuentes de nitratos (Motzer, 20006; Kendall, 1998).

### 2.4.3 Fraccionamiento de los Isótopos Estables del Nitrato: Procesos Involucrados

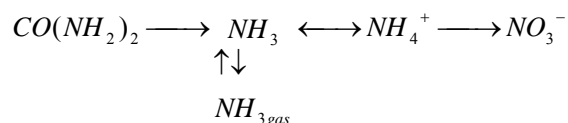
La concentración de nitrógeno en las aguas subterráneas puede no tan sólo estar controlada por el ingreso de éste al sistema, si no que también por reacciones (procesos) o por mezclas de agua de origen diferente. En este sentido, el uso de la información isotópica dada por la medición de  $^{15}\text{N}$  y  $^{18}\text{O}$  permite evaluar si la concentración de los nitratos en las aguas subterráneas está siendo controlada por la desnitrificación o por la mezcla con aguas de diferente tipo (aguas limpias o aguas con nitratos provenientes de otras fuentes) (Aravena y Mayer, 2009).

Los isótopos del Nitrógeno pueden fraccionarse por procesos bioquímicos, como por ejemplo: nitrificación (oxidación de compuestos nitrogenados), desnitrificación (reducción de nitratos a nitrógeno molecular- $\text{N}_2$ ), y fijación de nitrógeno (conversión de nitrógeno disuelto en compuestos orgánicos nitrogenados). En estos procesos mediados por bacterias, los isótopos más livianos ( $^{14}\text{N}$ ,  $^{16}\text{O}$ ) reaccionan con mayor facilidad y como resultado de ello el sustrato remanente se enriquece isotópicamente en los isótopos más pesados ( $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ).

Si bien se espera que durante la nitrificación se produzca un pequeño cambio en  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{15}\text{N}$ , una vez en el suelo, principalmente en la zona más superficial, el nitrógeno puede sufrir un fraccionamiento isotópico, siendo el nitrato un elemento más conservativo en los sectores más profundos de la zona no saturada (Fukada et. al, 2004).

Debido a que en general todo el  $\text{NH}_4^+$  es convertido en nitrato durante la nitrificación en la parte superficial del suelo, el  $\delta^{15}\text{N}$  del  $\text{NO}_3^-$  es similar al  $\delta^{15}\text{N}$  del  $\text{NH}_4^+$ . Luego la composición isotópica del  $\text{NO}_3^-$  no cambia durante el transporte en las zonas no-saturada y saturada en condiciones aeróbicas (Fukada et al., 2004). Un proceso que afecta la marca isotópica del nitrógeno en el suelo corresponde a la volatilización del amoníaco, en donde como resultado del fraccionamiento isotópico asociado a este proceso, se obtiene un enriquecimiento de  $\delta^{15}\text{N}$  en el nitrógeno remanente en el suelo, el cual es reflejado en el  $\text{NO}_3^-$  que se forma de ese nitrógeno.

De acuerdo a lo anterior, en sectores con aplicación de fertilizantes sintéticos (urea), podría observarse marcas enriquecidas en  $\delta^{15}\text{N}$ , las cuales probablemente son atribuibles a un fraccionamiento isotópico por volatilización durante el tiempo en que la urea reside en el suelo previo a la aplicación del regadío. Esta condición es particularmente evidente en áreas donde la urea es el único fertilizante aplicado. El fraccionamiento mencionado se produciría en la producción de  $\text{NH}_{3\text{gas}}$  como producto intermedio del proceso de hidrólisis de la urea, tal como se señala a continuación:



Tal como se indica en el proceso anterior, el amonio producido (enriquecido isotópicamente en  $^{15}\text{N}$ ) es posteriormente transformado a Nitrato, lo cual generará una marca de  $\delta^{15}\text{N}_{\text{nitrato}}$  relativamente enriquecida, comparada con aquella esperada para los casos en que el nitrato proviene de fertilizantes sin volatilización de urea (Aravena y Mayer, 2009). El proceso de

volatilización que afecta al nitrógeno durante el almacenamiento del purín también explica los valores enriquecidos de  $\delta^{15}\text{N}$  que se observan en el nitrato proveniente de purines.

Se destaca que, en condiciones aeróbicas, el amoniaco residual (no volatilizado) reacciona con el oxígeno disuelto, generándose nitrito y agua. Los nitritos son oxidados rápidamente a nitratos, siendo muy raramente encontrados en concentraciones importantes en las aguas subterráneas.

De acuerdo a experiencias de laboratorio (Kumar et. al (1983), Andersson y Hooper (1983) y Hollocher (1984)), durante el proceso de nitrificación se cumple la siguiente relación:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{NO}_3} = 2/3 \delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}} + 1/3 \delta^{18}\text{O}_{\text{O}_2} \quad (2.8)$$

Es así como, en la formación de la molécula de nitratos, dos átomos de oxígeno provendrían de la molécula de agua, y el restante provendría del oxígeno disuelto, el cual presentaría una composición como la del oxígeno atmosférico de +23,2 ‰ (Horibe et al. 1973).

Por otro lado, si las condiciones en el suelo y/o en el acuífero cambian a condiciones anaeróbicas, se puede producir el proceso de desnitrificación, que corresponde a una reacción de oxidación-reducción, anaeróbica, generalmente utiliza carbono orgánico como dador de electrones. Acerca de este proceso y de su efecto en la composición isotópica, se señalan los siguientes puntos:

- Debido a efectos cinéticos de fraccionamiento isotópico, los isótopos pesados  $^{15}\text{N}$  y  $^{18}\text{O}$  se enriquecen en el nitrato residual (Böttcher et al., 1990).
- El factor de enriquecimiento isotópico para el  $^{15}\text{N}$  es del orden de  $\epsilon^{15}\text{N}_{\text{N}_2\text{-NO}_3^-} \approx -5$  a  $-20\%$ .
- Para el  $^{18}\text{O}$ ,  $\epsilon^{18}\text{O}_{\text{prod-NO}_3^-}$  presenta un valor aproximadamente la mitad del factor que le corresponde al  $^{15}\text{N}$ .
- Muestras con marca isotópica enriquecida para los isótopos de los nitratos sugiere que se está produciendo desnitrificación mediada por bacterias.

En otras palabras, si a partir del análisis isotópicos en muestras de agua se observa en un gráfico de  $\delta^{15}\text{N}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  en  $\text{NO}_3^-$  un enriquecimiento en los isótopos pesados (con una pendiente de aproximadamente  $\delta^{18}\text{O}_{\text{nitrato}} : \delta^{15}\text{N}_{\text{nitrato}} \approx 1:2,1$ ), esa situación es atribuible a un proceso de desnitrificación (Aravena y Robertson, 1998).

## **2.5 OTRAS APLICACIONES DE INTERÉS DE ISÓTOPOS ESTABLES Y RADIOACTIVOS EN ESTUDIOS DE CONTAMINACIÓN**

El uso de otros isótopos estables y radioactivos es de gran utilidad en la evaluación del origen de las aguas (recarga natural vs. antrópica) y de su dinámica en el sistema (tiempos de residencia). En particular, la medición de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  en  $\text{H}_2\text{O}$ , conjuntamente con mediciones de tritio ( $^3\text{H}$ ), se encuentra orientada a la identificación del ciclo del agua y de la influencia del riego u otras actividades antrópicas sobre el sistema acuífero.

## Trazadores para Establecer el Origen de las Aguas Subterráneas: Isótopos Estables, $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en $\text{H}_2\text{O}$

Los trazadores naturales más utilizados en hidrología subterránea corresponden a los isótopos estables del Oxígeno, denominado Oxígeno-18 [ $^{18}\text{O}$ ], y del Hidrógeno, denominado Deuterio [ $^2\text{H}$ ] (Clark y Fritz, 1997).

El contenido de dichos isótopos en la precipitación es función de la historia de las masas de aire y del proceso de fraccionamiento isotópico que ocurre durante la condensación del vapor de agua en el proceso de precipitación. El contenido isotópico del agua subterránea representa el promedio ponderado de la composición isotópica de la precipitación que recarga al acuífero (que toma en cuenta la cantidad de precipitación). Luego, cuando el agua pierde contacto con la atmósfera, los valores de los isótopos se mantienen constantes durante el recorrido del agua por la zona saturada del sistema acuífero. De esta forma, el contenido de los isótopos refleja las características del agua en la zona de recarga del sistema acuífero.

Luego que las precipitaciones alcanzan la superficie terrestre, una parte de las aguas se infiltra a través del suelo hasta encontrar zonas del terreno que las contengan, formando las aguas subterráneas. En su recorrido por el suelo, el agua adquiere las características químicas del terreno que atraviesa pero no cambia su marca isotópica, por lo que las características isotópicas del agua son las mismas que donde se produjo la infiltración del agua. Por tanto, aguas del mismo origen (similar área de recarga) deben presentar el mismo contenido de isótopos naturales estables, o por lo menos estar en una igual línea de evolución por la fase terrestre del ciclo de escorrentía.

Los datos isotópicos se reportan en unidades de  $\delta$  per mil (ver **ecuación 2.4**). Específicamente, los datos de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  se reportan con respecto al estándar internacional VSMOW (Vienna Sea Mean Ocean Water).

Los principales factores involucrados en la variación de la concentración de los isótopos ambientales estables en la precipitación son: la continentalidad y la altitud.

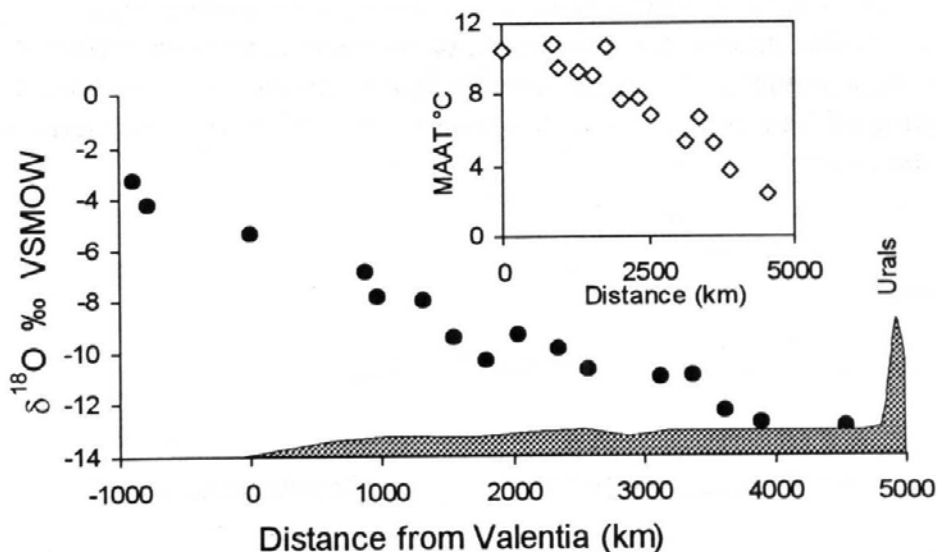
Durante la precipitación, las moléculas de agua con los isótopos más pesados tienden preferentemente a precipitar, con lo cual el agua en la masa de aire se empobrece en los isótopos más pesados. Esto se puede ver en la **Figura N°2.6**, en donde, a modo de ejemplo, se muestra como la composición isotópica de la precipitación cambia a medida que la nube entra en el continente europeo. Las precipitaciones se van haciendo cada vez más empobrecidas en los isótopos más pesados (los valores de  $\delta$  tienden a valores negativos más altos) a medida que el frente de humedad precipita tierras adentro. Luego, las lluvias costeras son más enriquecidas en los isótopos más pesados en comparación con las precipitaciones dentro del continente. Este es el llamado efecto continental (Clark y Fritz, 1997).

El mismo fenómeno ocurre durante las lluvias orográficas: cuando las masas de aire suben en altitud, las precipitaciones se van haciendo cada vez más empobrecidas en los isótopos más pesados. Eso se observa en la **Figura N°2.7**, la que muestra como las precipitaciones y las aguas superficiales cambian su composición isotópica en relación a la altitud en Chile, Argentina y Ecuador. Por ejemplo en Chile, las aguas en la costa son mucho más enriquecidas en  $^{18}\text{O}$  ( $\delta = \sim$

-5 ‰) en comparación a las aguas que precipitan a los 3.000 metros sobre el nivel del mar ( $\delta \approx -18 \text{ ‰}$ ) (Rozanski et al., 1993).

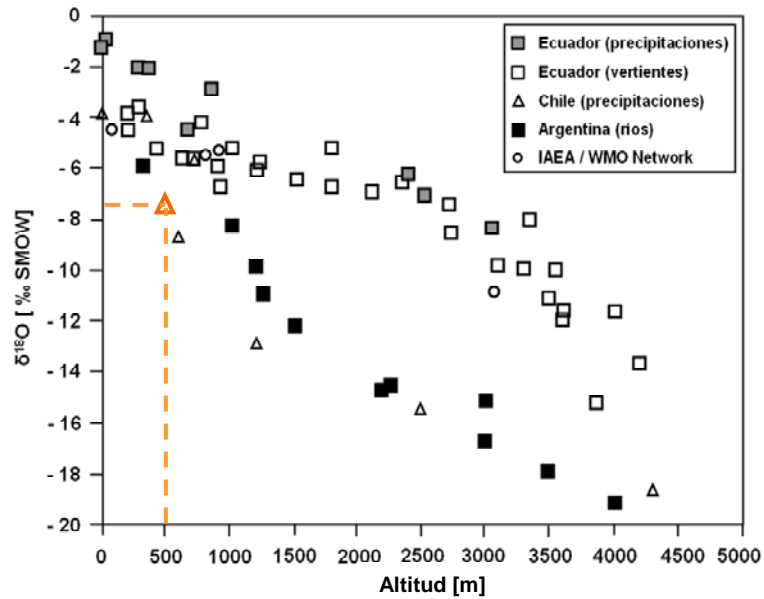
El fraccionamiento isotópico durante el proceso de precipitación afecta tanto a los isótopos de oxígeno como a los isótopos del hidrógeno. Luego, la composición isotópica de las precipitaciones se caracteriza a través de una relación lineal entre el  $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$  que a nivel mundial se llama Línea de Agua Meteorica Global (GMWL), y que es definida por la siguiente ecuación:  $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$  (ver **Figura N°2.8**, Clark y Fritz, 1997). De esta forma, por ejemplo en el caso de Chile, tomando los datos presentados en la **Figura N°2.7**, las aguas subterráneas en la costa quedan graficadas en una región muy diferente en la línea meteórica que las aguas subterráneas que tienen las áreas de recarga sobre los 2.500 m.s.n.m.

El otro fenómeno que puede afectar la composición isotópica de las aguas superficiales es el proceso de evaporación. Durante este proceso, el fraccionamiento es mayor para el  $^{18}\text{O}$  que para el  $^2\text{H}$ . Luego, las aguas afectadas por evaporación tienden a seguir una relación lineal que se aparta de la línea meteórica y que se llama línea de evaporación (Clark and Fritz, 1997). Esto se puede ver en la **Figura N°2.8**, la que muestra que a medida que la evaporación aumenta, el agua residual se va enriqueciendo isotópicamente a lo largo de una pendiente diferente a la que presenta la línea meteórica. Las aguas que se han evaporado en un 80 % son mucho más enriquecidas en  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  que las aguas que se han evaporado en un 20 %. La pendiente de la línea de evaporación es función de la humedad relativa. Las aguas en embalses están afectadas por evaporación, luego estas aguas se imprimen con una composición isotópica que es muy diferente a las aguas subterráneas o superficiales que no han sido afectadas por la evaporación.

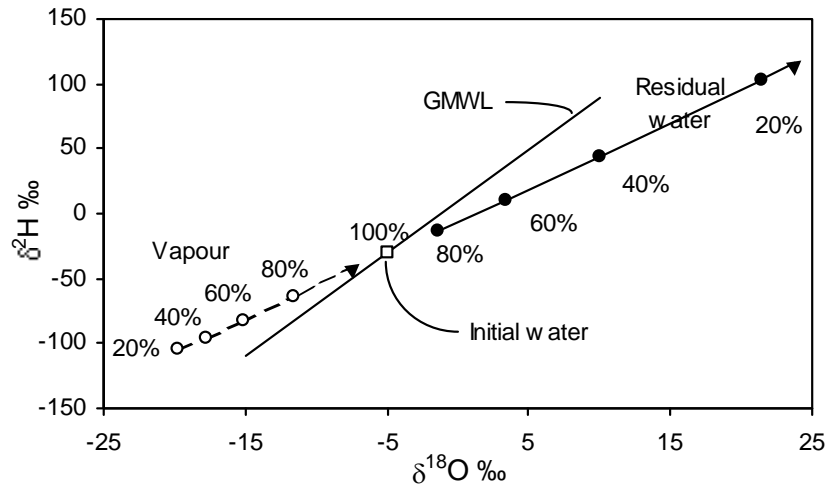


**Figura N°2.6:** Efecto de la continentalidad en la composición isotópica de la precipitación en Europa. (Clark y Fritz, 1997).





**Figura N°2.7:** Efecto de la altitud en la composición isotópica en aguas muestreadas en países de América Latina (Rozanski et al, 1993).



**Figura N°2.8:** Línea Meteorica Mundial (GMWL) y efecto de la evaporación en la composición isotópica (Clark y Fritz, 1997).



### **2.5.1 Trazadores para Evaluar Tiempos de Residencia de las Aguas Subterráneas: Isótopos Radiactivos, Tritio ( $^3\text{H}$ )**

Los isótopos con decaimiento radiactivo son isótopos que se degradan en el tiempo, generando otros isótopos del mismo elemento (si se pierde un neutrón durante la reacción) u otro elemento (si se pierde un protón durante la reacción). Estos isótopos, por su carácter radioactivo, son utilizados en estudios que incluyen el parámetro tiempo (tiempo de residencia del agua subterránea).

El tritio corresponde a un isótopo radiactivo del Hidrógeno, el cual presenta una vida media de 12,43 años (IAEA, 1983). En la atmósfera se forma por acción de los rayos cósmicos y también provienen de los ensayos termonucleares que fueron importantes en las década del 50 y 60. La mayor parte del tritio atmosférico se incorpora en las moléculas de agua y de esta manera pasa a formar parte del ciclo hidrológico, por lo que constituye un marcador muy útil del agua que ha estado en la atmósfera en los últimos 40 años. Este indicador isotópico entregará información sobre el tiempo de tránsito o de renovación de agua en el sistema.

La gran dilución que experimenta el tritio en el agua hace que su concentración sea sumamente baja, especialmente en el Hemisferio Sur, y sólo pueda medirse gracias a su radiactividad, en general, tras un tratamiento de enriquecimiento isotópico. El contenido en tritio de las aguas naturales se expresa en unidades de tritio (UT), que corresponde a una concentración de 1 átomo de tritio por 1018 átomos de hidrógeno.

Los rayos cósmicos producen una concentración de unas 10 UT en las precipitaciones de las zonas templadas continentales. Además, desde 1953 se han dispersado en la atmósfera grandes cantidades de tritio producido por el hombre en los ensayos termonucleares. En las precipitaciones del hemisferio norte, representada por la estación de Viena, se alcanzaron en 1963 concentraciones de hasta 6.000 UT y el hemisferio Sur las concentraciones de tritio, representada por la estación de Pretoria, llegaron a solo 110 UT en la misma década (**Figura N°2.9**). Desde aquella fecha las concentraciones de tritio han disminuido notablemente debido al término de las explosiones de artefactos termonucleares en la atmósfera (**Figura N°2.9**; Clark y Fritz, 1997). El contenido actual del tritio en el Hemisferio Sur es del orden de 5 UT. El contenido en tritio de las precipitaciones presenta considerables variaciones estacionales y geográficas, resultantes del lugar donde se dispersan las mayores cantidades y de los mecanismos de transporte desde la estratósfera o la tropósfera a las aguas superficiales.

En los estudios hidrológicos, las mediciones del tritio proporcionan información sobre el tiempo de tránsito o de renovación del agua de un sistema. En un sistema cerrado de aguas subterráneas pueden establecerse relaciones entre la concentración del tritio en el agua y la cantidad de este isótopo que se sabe se ha depositado en la precipitaciones, con las modificaciones pertinentes debidas a los efectos de la recarga y de la mezcla dispersiva.

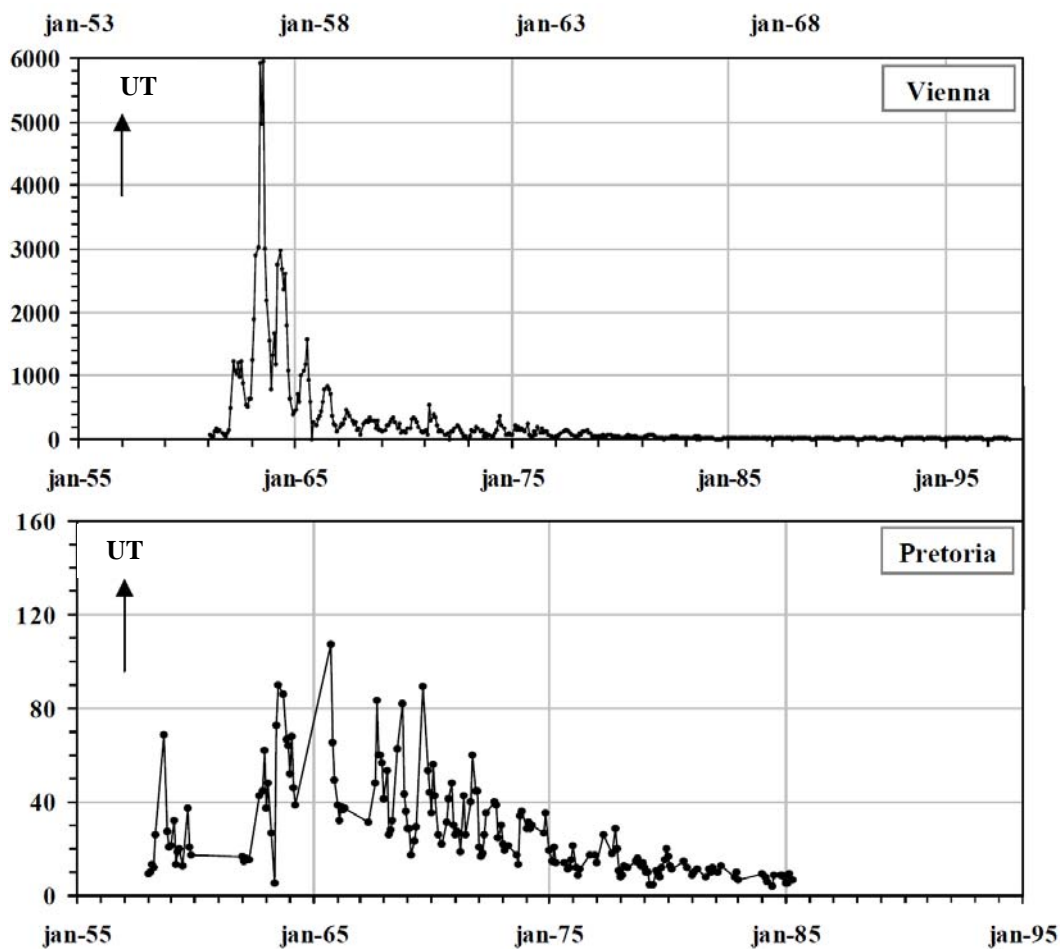


Figura N°2.9: Contenido de tritio en precipitación en los Hemisferio Norte y Sur.

## **3. METODOLOGÍA**

---

### **3.1 INTRODUCCIÓN**

El análisis de la presencia y concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas debe incluir la evaluación de su entorno hidrogeológico. No solo se debe caracterizar la calidad de las aguas subterráneas y de las potenciales fuentes de Nitratos, sino también se requiere caracterizar el sistema hidrogeológico en su conjunto (características geológicas y propiedades hidráulicas del sistema acuífero, profundidades al agua subterránea, recargas y direcciones de flujos).

Considerando incluir lo anterior, el proyecto desarrolla las siguientes actividades principales:

- ◆ Selección de dos sectores hidrogeológicos “pilotos”, donde ejecutar el proyecto.
- ◆ Caracterización de los sectores seleccionados, identificando las potenciales fuentes aportantes de Nitrógeno al suelo, las características hidrogeológicas y la información disponible en cada sector. Se incluye la evaluación de la condición actual de concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas.
- ◆ Caracterización de las potenciales fuentes superficiales de nitratos al agua subterránea, en los sectores pilotos.
- ◆ Identificación de trazadores químicos y/o isotópicos de las potenciales fuentes de nitratos existentes en los sectores pilotos, específicamente se analizaron los purines, fertilizantes sintéticos y guano, con el fin de evaluar los respectivos aportes relativos de nitratos al agua subterránea.
- ◆ Identificación del impacto actual de la aplicación de purines sobre los contenidos de nitratos en las aguas subterráneas de esos sectores pilotos.

### **3.2 SELECCIÓN DE LOS SECTORES PILOTOS**

#### **3.2.1 Criterios Generales**

Los factores que influyen en las concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas dependen de las condiciones particulares de los sectores en evaluación. Por este motivo, se requiere en primer lugar seleccionar los sitios donde se realizará el proyecto, los cuales deben cumplir con ciertos requisitos para que sean representativos de la problemática en evaluación.

Uno de los objetivos específicos es evaluar los niveles de concentración de nitratos en zonas agrícolas de Chile, con especial atención en los sitios donde se aplican purines de cerdo. Por esta razón, los sectores pilotos son seleccionados teniendo en cuenta aspectos tales como:

- ◆ Deben presentar litologías diferentes en la zona no saturada,
- ◆ Deben presentar una alta densidad de plantas de producción porcina,
- ◆ Deben presentar tecnologías similares de la aplicación de purines,
- ◆ Deben presentar otras posibles fuentes de nitratos, además de purín de cerdo.

Por otra parte, en esos sectores deben existir al menos los antecedentes necesarios siguientes:

- ◆ Existencia y disponibilidad de pozos desde donde se puedan obtener muestras de agua subterránea,
- ◆ Diferentes tipos de fuentes potenciales de nitrógeno,
- ◆ Actividades agrícolas,
- ◆ Diversidad de sistemas de riego.

### **3.2.2 Aplicación de los Criterios Generales en la Selección de los Sectores Pilotos**

Para la selección de los sectores pilotos se utiliza un análisis cualitativo de la información disponible, según tres escalas geográficas:

- ◆ Nivel regional,
- ◆ Nivel comunal, y
- ◆ Nivel de sectores hidrogeológicos.

#### **Análisis a nivel regional:**

A nivel regional se cuantifica la cantidad de planteles en cada región del país y se seleccionan las regiones con la mayor cantidad de planteles.

#### **Análisis a nivel comunal:**

Para seleccionar las comunas donde realizar el proyecto, en las regiones previamente seleccionadas del país, se consideran los siguientes factores:

- ◆ Número de Planteles. Se identifican las comunas donde se concentra la actividad de producción porcina.
- ◆ Número de estudios hidrogeológicos. Cantidad de estudios existentes para cada comuna. Este criterio permite verificar si existe información hidrogeológica necesaria para el desarrollo del proyecto.
- ◆ Peso de los animales. Se evalúa la suma ponderada entre la cantidad total de animales y el peso promedio de cada animal por plantel y por comuna. Representa el tamaño de la industria en cada comuna y por lo tanto el potencial impacto de la actividad, ya que animales con más peso producen más purines y guanos.
- ◆ Número de planteles con aplicación de purines. Se evalúa el número de planteles en la comuna que aplican sus purines al suelo.

## **Análisis a nivel de sectores:**

Para seleccionar los sectores con industria porcina en las comunas escogidas se considera tanto la diversidad de casos a estudiar como el acceso a la información base disponible. Los factores que se utilizan en la selección de los sectores, se señalan a continuación:

Actividades Actuales y Potenciales en superficie: Corresponden a los factores asociados a las posibles fuentes de nitratos:

- ◆ Número de Planteles.
- ◆ Usos de Suelos. Permite representar la diversidad de actividades agrícolas y también la existencia de diversas fuentes de nitrógeno.
- ◆ Capacidades de Usos de Suelos. La valorización de las capacidades de usos de suelos asigna mayores valores a sectores que por su calidad (aptitud) permiten mayor diversidad de usos. Los suelos con altas capacidades de usos corresponden directamente a suelos ubicados sobre los acuíferos principales (valles).
- ◆ Número de Planteles con el mismo Tipo de Tratamiento de Purines. La valorización de este factor es mayor en aquellos sectores con mayor número de planteles con un mismo tipo de tratamiento de purines.
- ◆ Tipo de Cultivos Regados. Se asigna la mayor valorización a los sectores donde los planteles aplican sus purines sólo sobre cultivos de uso agrícola (trigo, alfalfa, avena, frutas, etc.), dado que se asume representan zonas de diversidad agrícola y por ende se utilizan además otros tipos de fertilizantes.
- ◆ Promedio N Kjeldhal o N total (de purines). Para evaluar la calidad de los purines (como fuente), se asigna un mayor factor a las concentraciones más altas de nitrógeno en los purines antes de efectuar la aplicación.

Zona No Saturada, corresponden a los factores relacionados con las características de la zona entre la superficie del terreno y el acuífero:

- ◆ Tipos de Suelos (Texturas). A mayor número de tipos de texturas de suelo en el sector, mayor es la valoración para su selección.
- ◆ Nivel de la Napa. El nivel de las aguas subterráneas corresponde al espesor del área no saturada, por lo que es un indicador de los tiempos de tránsito del nitrato desde la superficie hasta alcanzar el acuífero. Es así como a mayor profundidad la vulnerabilidad del acuífero es menor. La valorización de este factor se efectúa considerando que niveles de aguas más someros implican una mayor probabilidad de encontrar mayores concentraciones de nitratos.

Acuífero, corresponden a factores que dicen relación con las características del acuífero desarrollado en los distintos sectores de la comuna:

- ◆ Número de Estudios Hidrogeológicos.
- ◆ Permeabilidad del Acuífero. La permeabilidad del acuífero considera características hidrogeológicas que reflejan suelos (subsuelo) más profundos. Mediante este criterio se pretende identificar los procesos que afectan al nitrógeno en las aguas subterráneas debido a diferentes tipos de sedimentos y estratigrafías, las cuales quedan caracterizadas por las unidades hidrogeológicas de cada sector potencial.

- ◆ Tipo de Acuífero. La valorización del tipo de acuífero en los sectores potenciales se ha definido de manera de priorizar las zonas donde sea posible realizar el proyecto bajo distintos tipos de acuíferos. Por lo anterior, la valorización es mayor en aquellos sectores donde se presentan acuíferos libres y confinados, por sobre aquellos que solamente presentan un sólo tipo de acuífero (libre o confinado).
- ◆ Número de Pozos. Valoriza la existencia de mayor cantidad de pozos en los cuales se pueda efectuar monitoreo y seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas.
- ◆ Concentración Promedio de Nitratos en las Aguas Subterráneas. Prioriza los sectores que presentan mayores concentraciones de Nitratos, asignando valores mínimos a sectores sin información o con concentraciones muy bajas.
- ◆ Posibilidad a tener un punto de control. Se asigna un valor de 0 si no es posible tener un punto de control y, si es posible, se asigna un valor máximo de 1.

### **Selección de los Sectores Pilotos:**

Los sectores son seleccionados de la suma ponderada de los factores valorizados/normalizados con los valores de ponderación definidos para cada factor. De acuerdo con este método, los dos sectores con índices mayores serán los seleccionados para la investigación a desarrollar en el proyecto.

### **3.3 CARACTERIZACIÓN DE LOS “SECTORES PILOTOS” SELECCIONADOS**

Para caracterizar los sectores seleccionados se evalúan las siguientes variables:

#### **3.3.1 Prácticas Agrícolas Actuales e Históricas**

Se realiza una encuesta a los agricultores, para recopilar información sobre sus prácticas agrícolas. Incluye los siguientes ítems principales:

- ◆ Tipos de fertilizantes que se utilizan (purines vs. fertilizantes sintéticos).
- ◆ Nombre y marca del fertilizante utilizado.
- ◆ Superficie utilizada para fines agrícolas.
- ◆ Tasa de fertilizante utilizado por unidad de área.
- ◆ Calendario de aplicación de fertilizantes.
- ◆ Historia del uso de fertilizantes en el área.

La información capturada es compilada, confeccionándose mapas temáticos para representar las prácticas agrícolas actuales en los sectores del proyecto.

Asimismo, se efectúa una evaluación de las cargas de nitrógeno asociadas a la actividad agrícola, efectuándose una estimación del balance de nitrógeno en los sectores de interés.

#### **3.3.2 Reconocimiento de Pozos y Norias Existentes**

Se realiza un reconocimiento preliminar del terreno, orientado al reconocimiento de pozos y norias disponibles para realizar los monitoreos requeridos. Se seleccionan pozos que permitan

caracterizar las zonas subsuperficial (norias<sup>5</sup>) y profunda (pozos) de las aguas subterráneas del sistema acuífero.

Como parte del reconocimiento inicial, se realiza una campaña de monitoreo para medir parámetros físicos y químicos, con el objetivo de obtener una primera visión de los niveles (concentración) de nitratos en los sectores del proyecto.

### **3.3.3 Caracterización Hidrogeológica de los Sectores del Proyecto**

Se caracteriza el sistema hidrogeológico de los sectores evaluando los siguientes puntos principales:

- ◆ Entradas y salidas de agua del sistema acuífero (p.e. riego, recarga lluvia, bombeos),
- ◆ Parámetros hidráulicos del sistema,
- ◆ Dinámica de las aguas subterráneas en el sector (dirección y velocidad de los flujos),
- ◆ Características litológicas de la zona no-saturada (primera barrera al ingreso de contaminantes a las aguas subterráneas).

La base de la evaluación corresponde a estudios previos o información existente de la zona, sumado a las mediciones efectuadas durante el proyecto en pozos y norias seleccionadas (levantamiento topográfico de pozos/norias, medición de niveles freáticos y medición de isótopos estables y radiactivos).

## **3.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA E ISOTÓPICA DE LAS POTENCIALES FUENTES DE NITRATOS A LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

La composición isotópica asociada a diferentes fuentes de nitrógeno es distintiva y puede ser utilizada en la identificación de la participación individual en la contaminación del sistema de aguas subterráneas (Kendall and Aravena, 2000). Por lo anterior, la caracterización de las potenciales fuentes de nitratos al agua subterránea incluye su caracterización isotópica, además de la tradicional caracterización físico-química.

Con esta caracterización se identifican “marcas” químicas y/o isotópicas, las cuales permiten identificar el aporte relativo de nitratos al agua subterránea proveniente de las diferentes fuentes potenciales.

### **3.4.1 Caracterización de los Purines de Cerdo**

En los sectores pilotos seleccionados se caracterizan las áreas con producción de cerdos, en las cuales se identifican los diferentes manejos que se efectúan sobre los purines generados.

Los manejos típicos de purines consideran almacenamiento de ellos en lagunas, previo a su disposición como mejoradores de suelo o a la aplicación directa (sin regulación previa). En estos casos se efectúan monitoreos de ellos a la entrada y salida del sistema de almacenamiento, lo cual permite medir las variaciones en el purín durante su permanencia en las lagunas, especialmente con respecto a su composición isotópica.

---

<sup>5</sup> Las “norias” corresponden a pozos someros, generalmente escavados sin maquinarias.



La caracterización de los purines incluye las siguientes mediciones físicas, químicas e isotópicas.

**Parámetros In Situ:**

Temperatura, Conductividad Específica (25°C), pH, Oxígeno Disuelto.

**Parámetros Químicos:**

Boro Total, Calcio Total, Hierro Total, Potasio Total, Magnesio Total, Sodio Total, Estroncio Total, Zinc Total, Bicarbonatos, Carbonatos, Cloruros, Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Total, Nitrógeno de Nitrato, Fósforo, Sulfatos y Carbono Orgánico Disuelto.

**Parámetros Isotópicos<sup>6</sup>:**

$\delta^{15}\text{N}$  en  $\text{NH}_4^+$



Muestreo de purines almacenados en lagunas, con botella muestreadora horizontal de doble tapa

**3.4.2 Caracterización de Fertilizantes Comerciales**

Los fertilizantes comerciales representan una importante fuente potencial de nitrato al sistema de aguas subterráneas. Por ello, se recolectan muestras de los fertilizantes utilizados en los sectores del proyecto para análisis de isótopos. Los fertilizantes nitrogenados analizados son los siguientes:

Tipo de Muestra	Marca/Fuente
urea	Soquimich
urea	Anagra
urea	Vitra
mezcla N-P-K	Anagra
mezcla N-P-K	Vitra
nitrato de potasio	Vitra
guano	Productores

<sup>6</sup> Previo al envío de las muestras a laboratorio (Universidad de Waterloo, Canadá), se adecua pH en torno a 5 (con ácido clorhídrico), de manera de evitar volatilización que pudiese cambiar la marca isotópica de la muestra. También se diluyen las muestras (100 veces), de manera de evitar una contaminación de los laboratorios isotópicos de la Universidad de Waterloo.



Los análisis isotópicos incluyen el análisis de  $\delta^{15}\text{N}$  para todos ellos, así como también el análisis de  $\delta^{18}\text{O}$  en fertilizantes del tipo nitratos de potasio.

Se incluye el muestreo de Guano como fuente potencial de nitrato, principalmente para su caracterización isotópica.

### **3.4.3 Caracterización de Otras Fuentes Potenciales**

Respecto a la mineralización de suelo orgánico (también fuentes potenciales de nitrógeno a las aguas subterráneas) no se ha considerado un muestreo, sino más bien considerar valores reportados en la literatura especializada.

Asimismo, respecto a las aguas servidas domésticas, por corresponder éstas a una fuente de carácter puntual en el área del proyecto que se encuentra acotada a los sectores de asentamientos humanos, no se ha considerado su muestreo, si no más bien los valores característicos reportados en la literatura especializada.

## **3.5 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA E ISOTÓPICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

Para identificar el impacto de la actual aplicación de purines (y de otras fuentes potenciales) sobre los contenidos de nitratos de las aguas subterráneas, se efectúan campañas de monitoreos de las aguas presentes, colectando muestras de agua en pozos y norias seleccionados, además de aguas superficiales en los casos que se observen en los sectores. En esas muestras se analizan parámetros físicos, químicos e isotópicos.

Los criterios para seleccionar los pozos o norias a ser monitoreados, consideran los siguientes aspectos principales:

- ◆ Ubicación del pozo/noria con respecto al sistema de flujo de las aguas subterráneas.
- ◆ Ubicación del pozo/noria con respecto a los otros pozos/norias existentes en los sectores.
- ◆ Ubicación del pozo/noria con respecto a los terrenos en los cuales se aplica purines u otras posibles fuentes de nitratos.
- ◆ Concentraciones de nitrato en el pozo/noria y disponibilidad de información geoquímica histórica.
- ◆ Profundidad del pozo/noria (representatividad aguas profundas vs. someras) y habilitación (si está disponible).

El muestreo es efectuado en aguas superficiales (esteros/canales) y en subterráneas (pozos/norias/afloramientos). El procedimiento de muestreo varía en función de la naturaleza del agua y de las instalaciones presentes.

Con respecto a las mediciones de Nitratos, cabe señalar que las mediciones son efectuadas como  $\text{N-NO}_3$ . Es decir, la unidad usada en el informe para describir concentraciones de nitratos ( $\text{N-NO}_3$ ) es **mg N/L**. Esta unidad está referida a exclusivamente el peso del nitrógeno dentro de la molécula de nitrato en un litro de muestra de agua. Esta representación difiere de la

concentración de nitratos ( $\text{NO}_3$ ) en **mg/L**, que describe el peso de la molécula completa de nitrato (nitrógeno más oxígeno) en un litro de una muestra de agua.

Las mediciones in situ, el muestreo, preservación y transporte de muestras se efectuaron de acuerdo a los procedimientos específicos que ha desarrollado GP Consultores, los que cumplen con lo señalado en las siguientes normas:

- Norma Chilena NCH 411/6-1998. Calidad del agua. Muestreo. Parte 4: Guía para el muestreo de ríos y cursos de agua.
- Norma Chilena NCH 411/10-2005. Calidad del agua. Muestreo. Parte 10: Muestreo de Aguas Residuales. Recolección y Manejo de las muestras.
- Norma Chilena NCH 411/11-1998. Calidad del agua. Muestreo. Parte 11: Guía para el muestreo de Aguas Subterráneas.
- Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 21 th - 2005.

Las muestras físico químicas fueron realizadas por ALS, laboratorio que se encuentra acreditado para el análisis de los parámetros solicitados.

Por su parte, el muestreo, preservación y transporte de las muestras para análisis isotópicos se efectuó de acuerdo a las instrucciones proporcionadas por los laboratorios donde se efectúan los análisis.

Las mediciones isotópicas de  $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$  en  $\text{NO}_3^-$  y Tritio son analizadas en el Environmental Isotope Laboratory (EIL) de la Universidad de Waterloo, Canadá. Mientras las mediciones de isótopos estables  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  en agua se realizaron en el Chyn Laboratory de la Universidad de Neuchatel, Suiza.

A continuación se presentan los principales aspectos considerados en los muestreos realizados.

### ***Muestreo de Aguas Superficiales***

La obtención de muestras de aguas superficiales es realizada introduciendo en forma directa una botella de muestreo a la corriente de agua. Se destaca que las botellas de muestreo son ambientadas en las aguas, previo a la toma de muestra.

### ***Muestreo de Aguas Subterráneas***

Los procedimientos a utilizar dependen en general de las instalaciones que presentan los pozos y norias a ser monitoreados. Así por ejemplo, los procedimientos de muestreo variarán para el caso de un muestreo en un pozo con bomba instalada, respecto del muestreo en otro pozo que no cuente con dicho equipamiento. Se destaca que, al igual que en el caso de las aguas superficiales, las botellas son ambientadas antes de la toma de muestra.

- Muestreo con bomba manual del tipo *Waterra*

Quando el muestreo con bomba eléctrica no es posible, por ejemplo por el reducido diámetro de apertura del sondaje, se utiliza una bomba manual *Waterra*. La desventaja

de este método es el mayor tiempo que requiere el muestreo.



Muestreo de aguas subterráneas (pozo) con bomba manual tipo Watterra

- ◆ Muestreo con botella muestreadora de doble tapa

En ciertos puntos, con un nivel freático muy profundo o con poca accesibilidad, sólo se tiene como alternativa el muestreo de las aguas subterráneas con botella muestreadora. Este método presenta algunas desventajas, principalmente la imposibilidad de purgar la noria o pozo; sin embargo, permite seleccionar la profundidad de muestreo.



Muestreo de aguas subterráneas (noria), con botella muestreadora vertical de doble tapa

- ◆ Muestreo con bomba instalada en el pozo/noria

Es necesario tener presente que utilizar una bomba instalada puede representar una fuente de contaminación de la muestra, por cuanto no se conoce el estado del sistema hidráulico ni de su mantención y limpieza. Para evitar esa interferencia, el muestreo es realizado

después de un tiempo de funcionamiento de la bomba, de forma tal de sacar el agua estancada en el equipo y pozo.



Muestreo de aguas subterráneas en pozo con bomba instalada

El muestreo de aguas subterráneas se realiza después de un procedimiento de purga del pozo, el que consiste en evacuar entre dos a tres veces el volumen del agua presente en el pozo o noria, antes de proceder a tomar la muestra. Sin embargo, en la práctica no siempre es posible efectuar la purga, principalmente cuando la recuperación del nivel en la captación es muy lenta, dificultando la obtención del volumen de agua de muestreo, existiendo además la posibilidad de que el dueño del pozo (o noria) quede sin agua para sus requerimientos rutinarios.

### ***Medición de Parámetros In Situ***

La Conductividad Específica, el pH, el contenido de oxígeno disuelto (OD) y la Temperatura son medidos directamente en terreno en la muestra de agua colectada, con un equipo multiparámetro o mediante sondas independientes.



Medición de parámetros *In Situ*, en purines y en aguas naturales



### ***Medición In Situ de Sulfatos y Nitratos***

Las mediciones de Sulfatos y Nitratos en terreno han sido realizadas con un fotómetro Nova 60 marca Merck. Este tipo de equipo funciona midiendo la absorción de la luz por el agua mezclada con un reactivo específico. De este valor de adsorción se deduce la concentración de Sulfatos o Nitratos en el agua (o de otros iones, dependiendo del reactivo utilizado).



Fotómetro Nova 60

Adicionalmente, se consideran mediciones cruzadas por laboratorios externos en parte de las muestras, principalmente en los análisis de nitratos. Esas mediciones servirán de contraste a las obtenidas por GP. Los resultados del laboratorio y del análisis de GP no se esperan exactamente iguales: las diferencias de método y de proceso de análisis, como el margen de error de los dos métodos, inducen diferencias de resultados.

Por la simplicidad y la rapidez de realización de los procesos de muestreo y de medición, este tipo de análisis en terreno se realiza en todos los puntos monitoreados (aguas subterráneas, norias y pozos, y aguas superficiales). Permiten obtener una visión rápida de la situación general de la calidad de las aguas en el sector del proyecto.

### ***Análisis de macroelementos químicos y elementos traza seleccionados***

Las muestras de agua colectadas para análisis químicos en laboratorio son almacenadas en coolers llenos con refrigerantes, las cuales se mantienen en dichas condiciones en terreno hasta que se someten a los respectivos análisis en laboratorio. Los análisis químicos de laboratorio han sido realizados en el laboratorio ALS, el cual está acreditado por el Instituto Nacional de Normalización (INN) según la norma ISO 17025 para el análisis de parámetros físico-químicos de agua potable, aguas superficiales y residuales (<http://www.alsglobal.com/Tribology/Labs/Quality.aspx?key=26>). Los análisis están basados en los métodos APHA.

Los parámetros medidos en laboratorio son: boro, calcio, hierro, potasio, magnesio, sodio, estroncio, zinc, bicarbonato, carbonato, cloruro, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, nitratos, fósforo, sulfato, y el carbono orgánico disuelto. Todos los resultados se expresan en mg/L.

El análisis de los iones mayores del agua permite verificar el balance iónico del agua. Se utiliza como criterio para la validación de resultados químicos enviados a laboratorio, el “Error en el Balance Iónico”, cuya ecuación se presenta a continuación:

$$\text{ErrorBI}(\%) = 100 \times \frac{\sum \text{Cationes}(\text{meq/l}) - \sum \text{Aniones}(\text{meq/l})}{\sum \text{Cationes}(\text{meq/l}) + \sum \text{Aniones}(\text{meq/l})}$$

Considerando que el agua debe estar eléctricamente neutra, el error máximo admitido es de 10%. Esa verificación no toma en cuenta la calidad del análisis específico de cada ión, pero da una idea global de la calidad general del análisis de la muestra. Cabe tener presente que la presencia de sedimentos en la muestras de agua no siempre permite este método de verificación.

El análisis de los iones mayores del agua entrega básicamente una idea de la composición de las aguas del sector, así como mezclas de agua proveniente de diferentes orígenes.

Los valores medidos de las concentraciones de Nitrógeno Total, Nitratos, Cloruros y Sulfatos proveen de valiosa información sobre los niveles de nitrógeno, particularmente sobre la concentración de nitratos en las aguas subterráneas, así como también, de las condiciones redox que presenta el sistema, las cuales a menudo pueden limitar las concentraciones de los nitratos en las aguas subterráneas, en caso que se tengan condiciones propicias para que se produzca desnitrificación.

El oxígeno disuelto corresponde a un parámetro muy indicativo de la condición redox en el sistema. En este sentido, en aguas en condiciones aeróbicas, es común que se encuentre nitrato, al igual que concentraciones medibles de oxígeno disuelto (por definición de aguas aeróbicas), con ausencia de H<sub>2</sub>S y CH<sub>4</sub>. Por otro lado, aguas en condiciones anaeróbicas se pueden clasificar en dos tipos, aguas levemente reductoras y fuertemente reductoras. Las aguas ligeramente reductoras se caracterizan por ausencia de oxígeno disuelto y H<sub>2</sub>S, mientras que las aguas fuertemente reductoras se caracterizan por la ausencia de oxígeno disuelto, pero con presencia de H<sub>2</sub>S o CH<sub>4</sub>. El nitrato puede estar presente en un ambiente con agua ligeramente reductora.

En cuanto al nitrógeno, en el proyecto se ha considerado la medición de nitrógeno total y principalmente de nitratos. Los primeros son medidos con mayor importancia en las primeras campañas y en aguas más someras, en tanto que los nitratos son frecuentemente medidos durante todo el proyecto.

Además se efectúan mediciones de cloruro, pues éste es considerado como un trazador conservativo en el sistema de aguas subterráneas, sobre todo porque este parámetro se relaciona con algunas de las fuentes de nitrógeno posibles de encontrar en zonas rurales.

Se mide la concentración de sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) básicamente como indicador del proceso de oxidación del sulfuro de hierro con nitrato en condiciones extremas de reducción.

### ***Medición de parámetros isotópicos***

Se considera el muestreo de aguas para análisis de <sup>15</sup>N y <sup>18</sup>O en NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Estos isótopos estables proporcionan información para la identificación de marcas de las eventuales fuentes de nitratos, y para la identificación de procesos que puedan estar afectando la concentración de nitratos en el acuífero (p.e. desnitrificación). Por otra parte, para generar líneas de evidencia adicionales, que

permitan determinar las fuentes de los nitratos en el sistema, las mediciones de  $^{15}\text{N}$  y  $^{18}\text{O}$  en  $\text{NO}_3^-$  se combinan con el análisis de los isótopos estables del agua,  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ , y radioactivo,  $^3\text{H}$ , en puntos seleccionados.

Los resultados de las mediciones de  $^{15}\text{N}$  y  $^{18}\text{O}$  de  $\text{NO}_3^-$ , junto a las mediciones de  $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$  en agua, se expresan de manera habitual (valores delta, ‰). Los análisis de tritio se reportan en unidades de tritio (UT).

### **3.6 INTERPRETACIÓN DE LA INFORMACIÓN FÍSICO-QUÍMICA E ISOTÓPICA DE LAS AGUAS**

La química del agua es definida por las interacciones con el tipo de roca presente en el subsuelo, por interacción entre aguas superficiales y subterráneas y por mezclas con aguas que podrían haber sido afectadas por actividades agrícolas. Se espera entonces poder diferenciar los diferentes tipos de agua presentes en el sistema, basándose en la “marca química”.

En el análisis de los datos químicos se utilizan diagramas para la comparación de los resultados. En particular son de interés los siguientes:

- ◆ Diagramas de **Piper** (ver **Figura N°3.1**):  
El diagrama de Piper permite la identificación de tendencias y de mezclas entre las muestras analizadas.
- ◆ Otros Diagramas (de **Stiff**, de **Schöeller**):  
El diagrama de Stiff ilustra cada tipo de agua con una forma geométrica diferente. Es entonces útil para la identificación de tipos de aguas radicalmente diferentes. Por otro lado, el diagrama de Schöeller permite la comparación rápida de las diferentes muestras.

La información que proporciona la “marca química” es complementada con la “marca isotópica”. En el capítulo correspondiente al Marco Conceptual ha sido presentada en detalle la metodología utilizada para interpretar la información isotópica.

Finalmente, la identificación del impacto de la actual aplicación de purines sobre los contenidos de nitratos en las aguas subterráneas es efectuada en base a la identificación y seguimiento de las marcas químicas e isotópicas de las potenciales fuentes y de su presencia y magnitud en las aguas subterráneas.

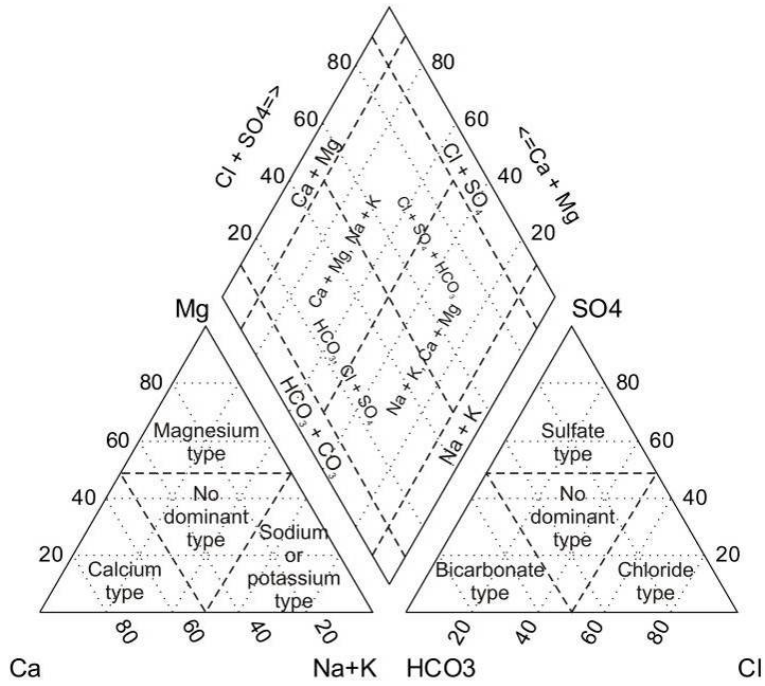


Figura N°3.1: Diagrama de Piper con delimitaciones de los diferentes tipos de agua (a partir de Fetter, 2000)

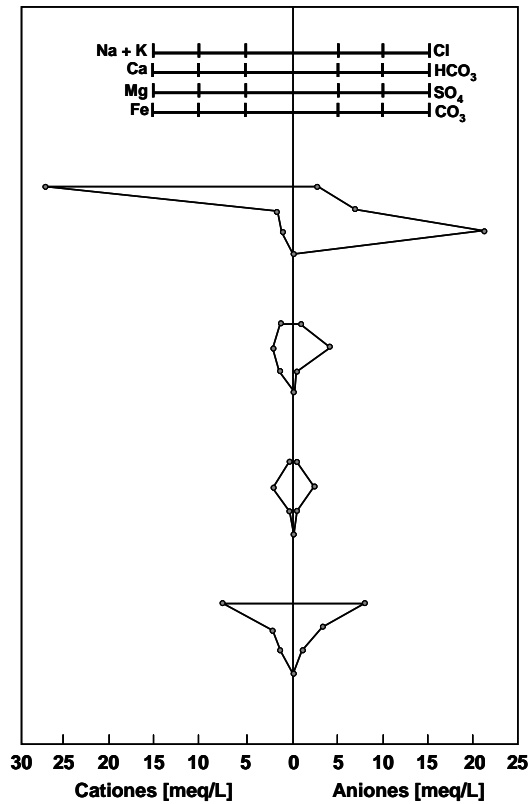


Figura N°3.2: Ejemplo de un diagrama de Stiff con representación de cuatro muestras.



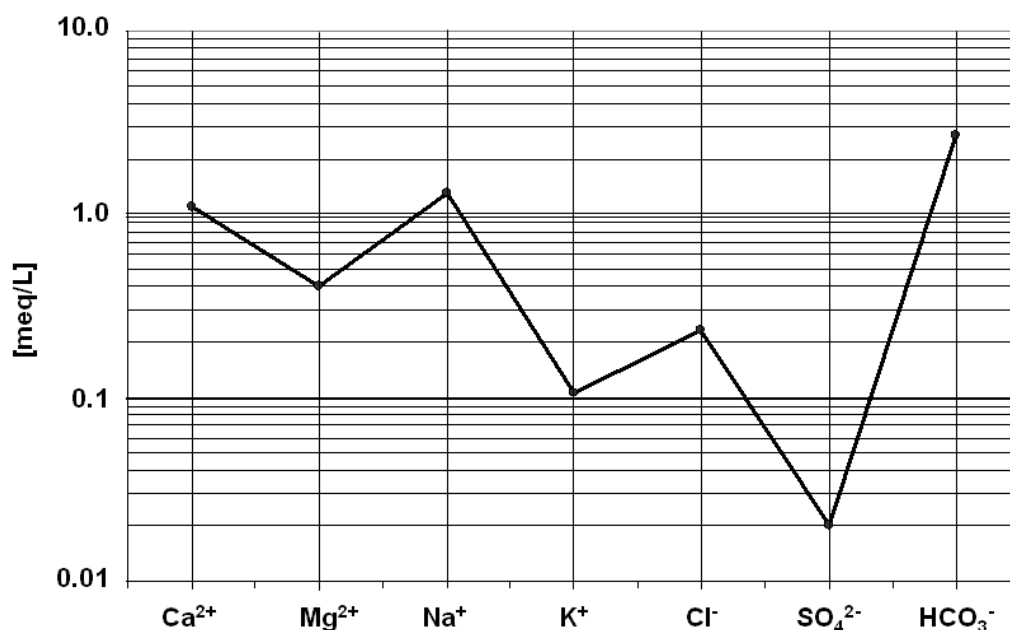


Figura N°3.3: Ejemplo de un diagrama de Schöeller con representación de una muestra.

### 3.7 ESTUDIO COMPLEMENTARIO DE SUELOS

Con el objetivo de mejorar el entendimiento de los procesos en el suelo que atenúan el alcance hasta el acuífero de las cargas de nitrógeno existentes en la superficie, en el último año del proyecto se realizaron mediciones en perfiles verticales del suelo para evaluar pérdidas potenciales de formas nitrogenadas (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). El estudio complementario de suelo fue desarrollado por la Universidad de Chile, e incluyó un monitoreo continuo en el periodo Abril a Octubre de 2011. El estudio completo se adjunta en **Anexo C**.

El sector seleccionado para efectuar las mediciones corresponde a suelos de textura gruesa (escenario conservador), cultivados con maíz y sometidos a aplicaciones de purín de cerdo en la temporada anterior.

Las tareas desarrolladas contemplaron los siguientes alcances:

- ◆ Evaluar continuamente los niveles de NO<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub> en los suelos hasta 1 m de profundidad.
- ◆ Determinar las tasas de mineralización neta de N.
- ◆ Establecer un balance hídrico en los suelos.
- ◆ Establecer un índice de riesgo de lixiviación de N-NO<sub>3</sub> y validarlo para las condiciones estudiadas.
- ◆ Evaluar los niveles de NO<sub>3</sub> y NH<sub>4</sub> en los suelos al final del estudio, hasta 3 m de profundidad.

## 4. SELECCIÓN DE SECTORES PILOTOS

---

### 4.1 INTRODUCCIÓN

Es conocido que hay una serie de variables que intervienen en el proceso del Nitrógeno en el suelo, principalmente:

- ◆ Carga de N de diferentes fuentes,
- ◆ Carga de N de los diferentes tipos de purines aplicados,
- ◆ Tipo de manejo de éstos, método de aplicación,
- ◆ Tipo de cultivos regados,
- ◆ Estado de crecimiento de los cultivos,
- ◆ Clima y su variabilidad,
- ◆ Cantidad de nutrientes existentes en suelo,
- ◆ Características de los suelos vegetales en que se aplica,
- ◆ Pendiente del terreno,
- ◆ Características hidrogeológicas del suelo y del acuífero,
- ◆ Características de la zona no saturada,
- ◆ Profundidad a la que se encuentra la napa,
- ◆ Tipo de acuífero (libre o confinado),
- ◆ Recarga del acuífero.

Estas variables tienen incidencia en procesos que controlan el Nitrógeno en el suelo, tales como:

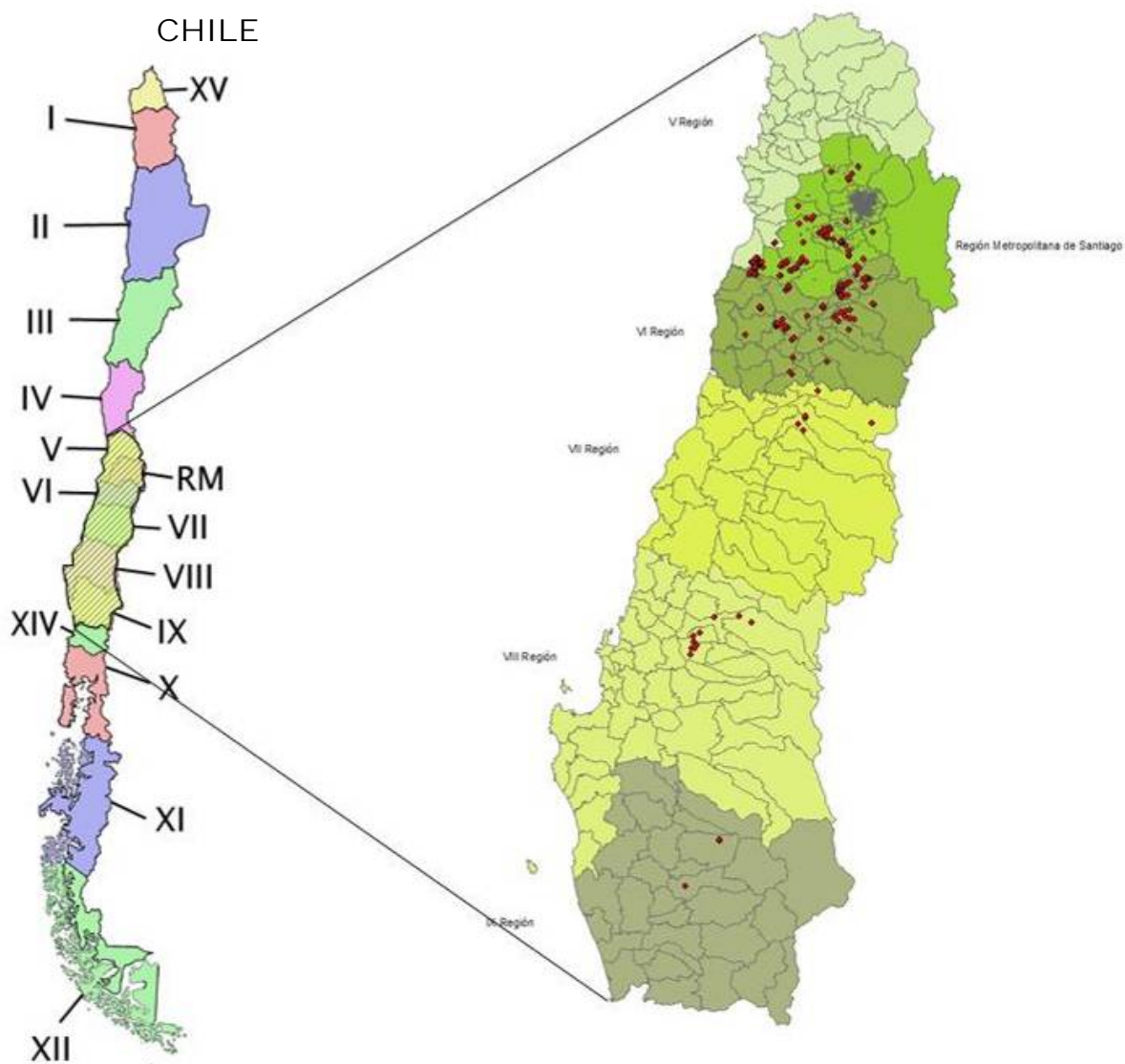
- ◆ Tiempos de residencia,
- ◆ Tasas de desnitrificación y/o nitrificación,
- ◆ Dilución,
- ◆ Otros.

La inclusión de estas variables en el análisis hace necesario desarrollar la evaluación en sectores pilotos; es decir, estudiarlos como un proceso relacionado a un sitio específico, el cual entregará indicaciones que permitan mejorar principalmente la definición de los planes de manejo de purines.

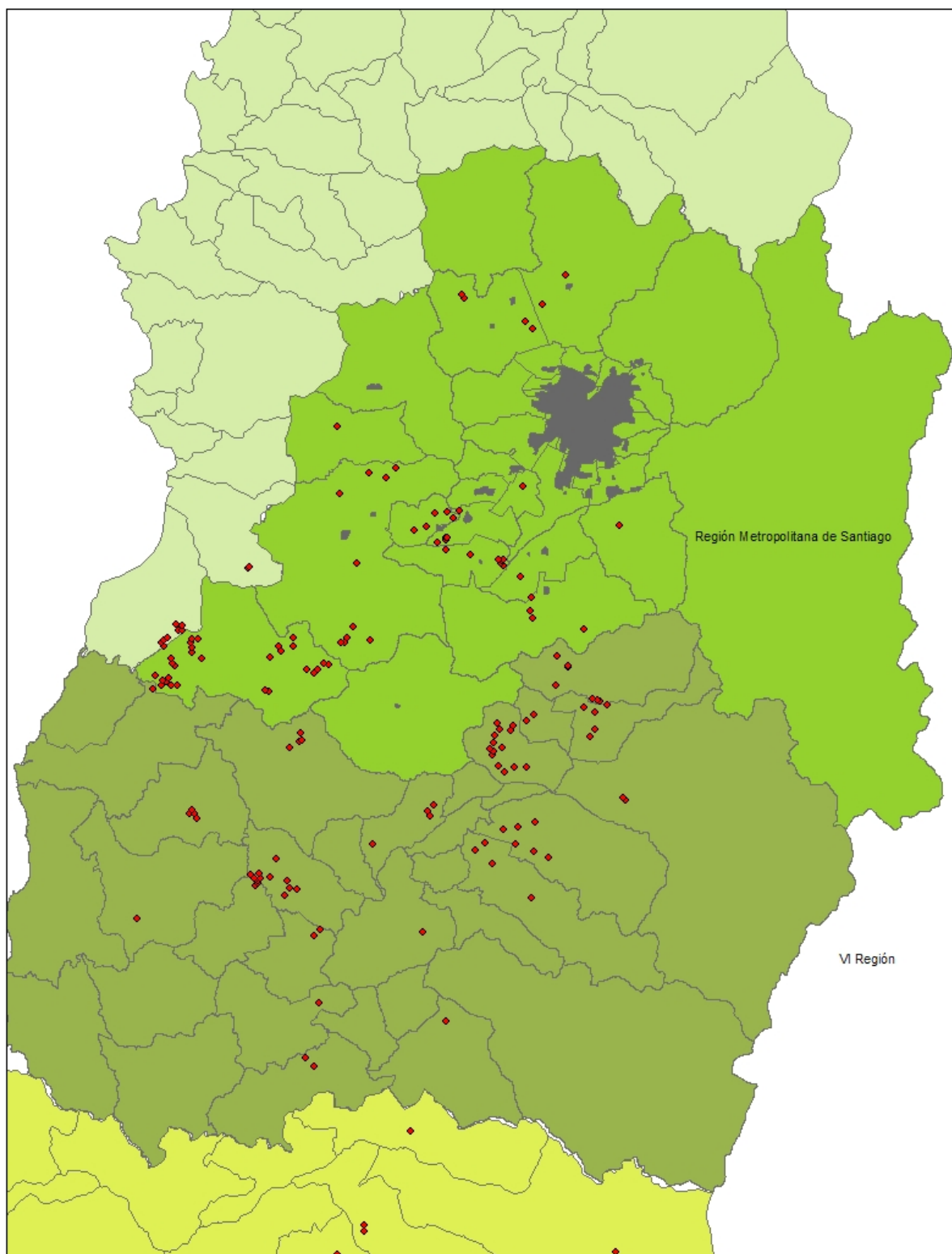
Para que los resultados sean efectivos, el proyecto se desarrolla en sectores donde se concentra la producción de cerdos, pudiendo así obtener información cuantitativa respecto a la condición de las aguas subterráneas y al impacto relativo de los purines en relación a otras fuentes aportantes de N.

## 4.2 PRODUCCIÓN PORCINA

En Chile, la industria porcina se concentra en la zona central del país (**Figura N°4.1**), principalmente en áreas agrícolas. En estas áreas coexisten diferentes fuentes potenciales de nitrato, por ejemplo, aplicación de fertilizantes sintéticos, riego con aguas servidas con distinto grado de tratamiento, tanques sépticos, así como también, aplicación de purines de cerdo. De acuerdo a lo anterior, cualquier concentración de nitratos que se detecte en estas áreas podría corresponder a alguna combinación de las fuentes potenciales o a aportes individuales de ellas.



**Figura N°4.1(a):** Ubicación de criaderos de cerdo asociados a la industria porcina de Chile. Los círculos rojos corresponden a la ubicación de criaderos individuales.



**Fig.Nº4.1(b):** Emplazamiento de Planteles en las Regiones Metropolitana y VI (Fuente: ASPROCER).

### **4.3 CRITERIOS APLICADOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS SECTORES PILOTOS**

Se ha considerado seleccionar dos sitios o sectores pilotos, en donde se desarrollará el proyecto. En **Anexo A** se presentan en detalle los criterios y principales resultados del proceso de selección de los sectores pilotos.

En términos generales, para la selección de los sectores pilotos se empleó un análisis cualitativo crítico de la información disponible, según tres escalas geográficas:

- Nivel regional.
- Nivel comunal, y
- Nivel de sectores.

Para efectos de establecer un criterio de selección de sitios pilotos, se aplica un proceso de valorización-normalización-ponderación de los datos asociados a distintos factores, con el fin de construir un índice a nivel de las escalas geográficas consideradas que permita definir zonas de interés para el proyecto.

En la primera etapa de análisis se efectúa la **valorización** de los factores definidos como relevantes en la selección de los sitios pilotos. Para esto se recopila la información cuantitativa o cualitativa asociada a cada factor en cada escala y luego se definen valores característicos para cada uno de ellos. Dependiendo del factor analizado es posible utilizar el dato original o también es posible asignarle un valor arbitrario (como valor único o como un rango de datos).

Posteriormente, se **normalizan** los datos valorizados para generar criterios comparables entre los factores definidos para cada escala geográfica. Este proceso consiste en determinar la pendiente entre el dato más bajo y el dato más alto y de acuerdo a esta pendiente reasignar los valores del rango original a una escala de 0 y 1 (escala porcentual).

A cada factor normalizado se la asigna un “peso” o **ponderación** con el cual se establece una importancia relativa entre los factores definidos para cada escala geográfica, los cuales finalmente se suman para generar el **índice para selección de sitios piloto**.

#### **Análisis a nivel regional**

A nivel regional se analiza el factor número de planteles, para lo cual se cuantifica la cantidad de planteles en cada región y se seleccionan las regiones con la mayor cantidad de planteles. Las regiones seleccionadas correspondieron a la región Metropolitana y la región del Libertador Bernardo O'Higgins.

#### **Análisis a nivel comunal**

A nivel de comunas se analizan los siguientes factores:

- ◆ El número de planteles
- ◆ El peso de los animales
- ◆ El número de planteles con aplicación de purines, y

- ♦ El número de estudios hidrogeológicos.

En base a esta información se generó la valorización, normalización y ponderación de los datos asociados a cada factor según se presenta a continuación.

### **Factor: Número de Planteles**

La valorización utilizada para caracterizar este factor refleja las comunas en donde se concentra mayoritariamente la actividad de producción porcina.

### **Factor: Número de Estudios Hidrogeológicos (HG)**

La valorización del criterio de número de estudios HG se realizó directamente según la cantidad de estudios existentes para cada comuna. Este criterio es importante al nivel de comuna ya que es posible verificar si existe información hidrogeológica para investigaciones posteriores (a nivel de sector).

### **Factor: Peso Total de Animales**

La valorización del factor del Peso Total de Animales se estima mediante la suma ponderada entre la cantidad total de animales y el peso promedio de cada animal por plantel y por comuna.

Dicho factor refleja el tamaño de la industria en cada comuna y por lo tanto refleja también el potencial impacto ambiental en cada comuna, ya que animales con más peso producen más purines y guanos. Por esa razón los valores más altos ocurren en comunas con animales de mayor peso.

### **Factor: Número de Planteles con Aplicación de Purines**

Este factor es importante a esta escala porque representa a los planteles con el mismo tratamiento final de purines y donde además se puede estudiar los resultados de dicha aplicación de purines. Los valores del factor se asocian directamente al número de planteles en la comuna que aplican sus purines al suelo.

De acuerdo a lo anterior, se aplican los criterios de valorización para cada uno de los factores establecidos, para las diferentes comunas de la Región Metropolitana y de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

## **Análisis a nivel de sectores**

A nivel de sectores los factores analizados son:

### **Factor: Número de Planteles**

La valorización del factor de número de planteles refleja directamente la cantidad de planteles por sectores. El factor asignado es directamente proporcional al número de planteles existente en el sector.

### **Factor: Número de Estudios Hidrogeológicos (HG)**

La valorización de este factor sigue la misma lógica del factor anterior, es decir, se efectúa de acuerdo al número de estudios por sector.

### **Factor: Tipos de Suelos (Texturas)**

La valorización del criterio de variabilidad de tipos de suelos está basada en el número de texturas diferentes para los sectores potenciales de las comunas seleccionadas. A mayor número de tipos de texturas de suelo en el sector, mayor es la valoración.

La justificación de esto está basada en uno de los objetivos principales de este proyecto, que consiste en aumentar el nivel de conocimiento de los procesos que afectan al nitrógeno que proviene de la aplicación de purines a los suelos. Los procesos que afectan al nitrógeno, y que se requiere conocer, varían dependiendo del tipo de suelo y del tipo de texturas. En un sector con alta variabilidad de texturas es más probable que los purines sean aplicados sobre una variedad de texturas de suelos.

### **Factor: Usos de Suelos**

Los usos de suelos para cada sector han sido cuantificados sumando el número de diferentes actividades agrícolas (distintos cultivos regados) con el número de parcelas con actividad. Las actividades agrícolas en estos sectores corresponden a terrenos regados y que cuentan con cultivos anuales, terrenos agrícolas regados con predominio de frutales y viñas, y terrenos agrícolas de secano con cultivos anuales. Esta clasificación permite representar la diversidad de actividades agrícolas y permite también representar la existencia de diversas fuentes de nitrógeno, ya que se toman en cuenta las diferentes prácticas agrícolas asociadas con diferentes actividades, incluyendo el tipo de riego, la calidad de aguas de riego, y los tipos de fertilizantes.

Los mayores valores de este factor representan una mayor variación en los usos de suelos.

### **Factor: Capacidades de Usos de Suelos**

La valorización de las capacidades de usos de suelos asigna mayores valores a sectores que permiten una alta capacidad de uso. La justificación es que en los suelos con altas capacidades de uso existe una gran diversidad de cultivos potenciales y una amplitud en las actividades



agrícolas que son posibles de desarrollar. Además, en estos sectores, existen otras fuentes potenciales de nitrógeno como otros tipos de fertilizantes, incluyendo guanos de otros animales y fertilizantes de tipo inorgánicos. Asimismo, suelos con altas capacidades de usos corresponden directamente a suelos ubicados sobre los acuíferos principales (valles) de los sectores potenciales.

### **Factor: Permeabilidad del Acuífero**

La justificación del sistema de valorización para la permeabilidad del acuífero es la misma que para la variabilidad de texturas de suelos, sin embargo, la permeabilidad del acuífero considera características hidrogeológicas que reflejan suelos (subsuelo) más profundos. Mediante este criterio se pretende identificar los procesos que afectan al nitrógeno en las aguas subterráneas debido a diferentes tipos de sedimentos y estratigrafías, las cuales quedan caracterizadas por las unidades hidrogeológicas de cada sector potencial.

Este factor representa la cantidad de diferentes propiedades de permeabilidad existentes en un solo sector.

### **Factor: Tipo de Acuífero**

La valorización del tipo de acuífero en los sectores potenciales se ha definido de manera de priorizar las zonas en donde sea posible realizar el proyecto bajo distintos tipos de acuíferos. Por lo anterior, la valorización es mayor en aquellos sectores donde se dan acuíferos libres y confinados, por sobre aquellos que solamente presentan un sólo tipo de acuífero (libre o confinado).

### **Factor: Número de Pozos**

La valorización de este factor intenta representar la existencia de puntos en los cuales se pueda efectuar monitoreo y seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas. Por lo anterior, se tiene una mayor valoración del factor a mayor cantidad de pozos en el sitio.

### **Factor: Nivel de la Napa**

En general, el nivel de la napa en los sectores potenciales presenta variaciones que se desarrollan en escalas de tiempo anuales. Por esta razón, se utiliza el parámetro estadístico de la **mediana**, calculado sobre los datos disponibles para los niveles de la napa, de manera de representar el nivel de napa que está presente la mayor parte del año.

En zonas donde el nivel de la napa está más superficial se asignan valores mayores, ya que es más probable que se detecten altos contenidos de Nitratos pues el acuífero somero se encuentra más expuesto a las distintas fuentes de este elemento.

### **Factor: Concentración Promedio de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en las Aguas Subterráneas**

El proyecto considera priorizar los sectores con presencia de nitratos en las aguas subterráneas. De esta forma la valorización de este factor asigna a los sectores sin información o con



concentraciones muy bajas el valor mínimo, por otra parte, en sectores con concentración de nitratos mayores se les asigna un mayor factor.

### **Factor: Número de Planteles con mismo Tipo de Tratamiento de Purines**

La valorización de este factor es mayor en aquellos sectores con mayor número de planteles con un mismo tipo de tratamiento de purines. Las comunas sin información reciben una valorización igual a 0.

### **Factor: Tipo de Cultivo Regado**

La información sobre los tipos cultivos donde se aplican los purines es obtenida a partir de los Planes de Aplicación de Purines (PAP) existentes. A los sectores donde no existe esta información se les asigna un valor igual a 0 (mínimo), en cambio, los sectores donde existe información acerca del tipo de cultivo (pradera, eucalyptus y cultivos con uso agrícola), son representados mediante valores no nulos.

En sectores donde los planteles aplican sus purines sólo sobre cultivos de uso agrícola (trigo, alfalfa, avena, frutas, etc.) se asigna la mayor valorización, dado que se asume que en estos sectores se utilizan además otros tipos de fertilizantes, y también porque representan zonas de diversidad agrícola. Por otra parte, en sectores de tipo pradera y eucalyptus, se asume que la única fuente de nitrógeno corresponde a la aplicación de purines, por esta razón se les asigna un menor valor. Sectores que representan la combinación de los tipos de cultivos descritos recientemente son valorizados con el valor medio del rango.

### **Factor: Promedio N Kjeldhal o N total (de purines)**

Para evaluar la calidad de los purines (como fuente) antes de efectuar la aplicación se utiliza el valor promedio de N Kjeldhal o de N total, a partir de la información disponible para los planteles. En general, los dos tipos de nitrógeno tienen la misma magnitud, pues los purines están dominados principalmente por nitrógeno de tipo orgánico y de tipo amoniacal (N Kjeldhal). Las valorizaciones asignan un mayor factor a las concentraciones más altas de nitrógeno.

### **Factor: Factibilidad de tener un punto de control**

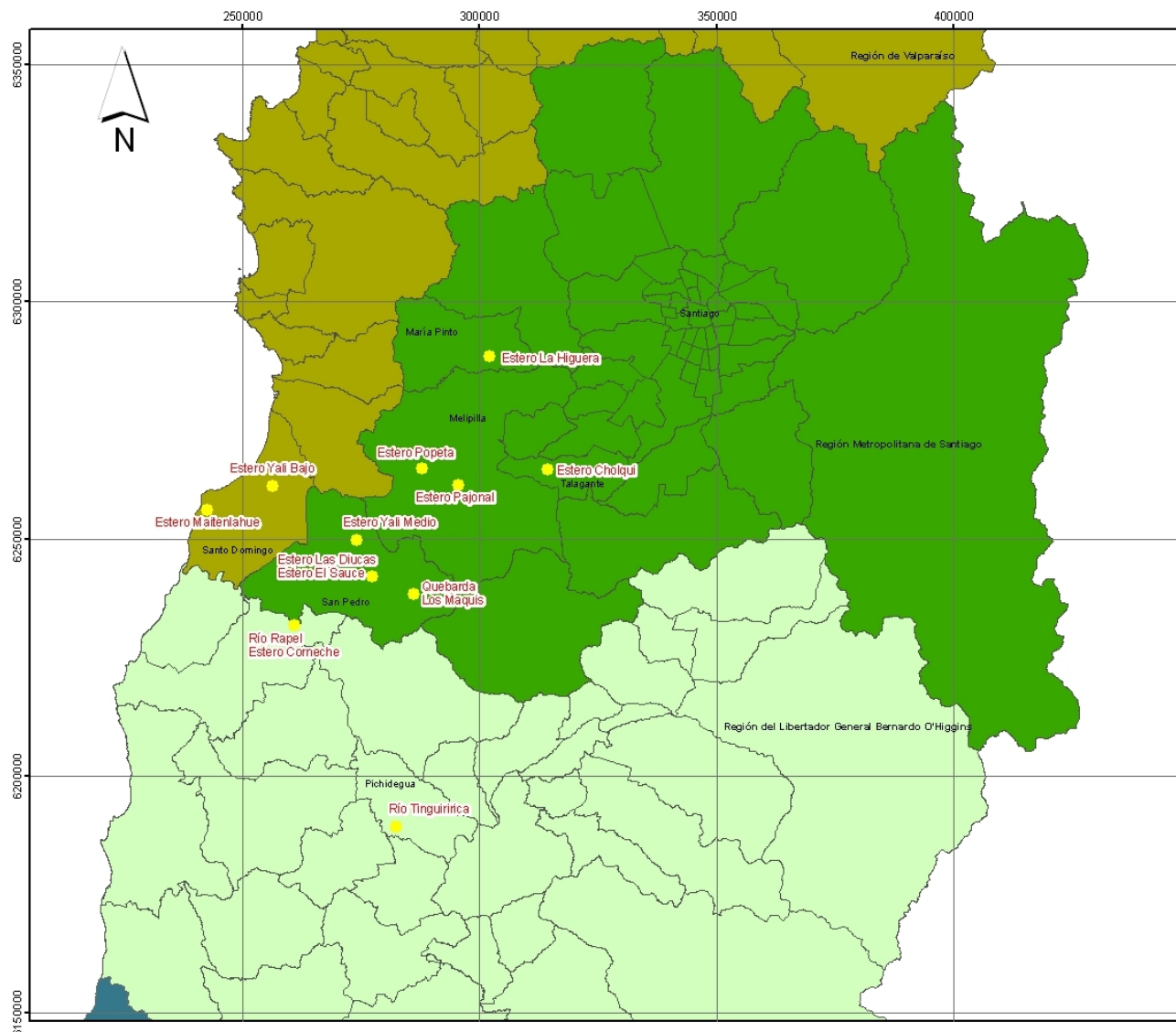
Para la valorización de la posibilidad a tener un punto de control en los sectores, se asigna un valor de 0 si no es posible tener un punto de control y en el caso que sí sea posible se asigna un valor de 1.

### **Cálculo del Índice para Selección de Sitios Pilotos a Nivel de Sectores**

El índice se calcula como la suma ponderada de los factores valorizados/normalizados con los valores de ponderación definidos para cada factor. De acuerdo con este método, los sectores con índices mayores son los más adecuados para la investigación a nivel de detalle. La **Tabla N°4.1** presenta la aplicación del índice por sector para las comunas seleccionadas.

**Tabla N°4.1:** Índice de selección de sectores para las comunas de San Pedro, Melipilla y Pichidegua

ID	Comuna	Sectores	Ponderación N° de Planteles	Ponderación N° Estudios Hidrogeológicos	Ponderación N° de Pozos (DGA)	Ponderación Concentración Promedio NO3	Ponderación N° Planteles con Tratamiento Purines	Ponderación Tipo de Tratamiento Purines	Ponderación Uso de Suelos	Ponderación Capacidad de Uso de Suelos	Ponderación Variabilidad de Texturas	Ponderación Tipo de Acuífero	Ponderación Permeabilidad del Acuífero	Ponderación Nivel de la Napa	Ponderación Posibilidad de Tener un punto de Control	Ponderación N° de Estudios Hidrogeológicos	Ponderación N° de Estudios Hidrogeológicos	SUMA de Ponderaciones	INDICE (%)
0	San Pedro	Río Rapel Estero Corneche	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,00	0,00	0,03	0,00	0,08	0,01	0,25	4,8
1	San Pedro	Estero Maintenlahue	0,07	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,01	0,05	0,00	0,00	0,08	0,00	0,08	0,03	0,36	6,8
2	San Pedro	Estero Yali Bajo	0,04	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,02	0,03	0,00	0,00	0,08	0,00	0,07	0,03	0,28	5,3
3	San Pedro	Estero Las Diucas Estero El Sauce	0,05	0,02	0,03	0,08	0,01	0,04	0,02	0,04	0,06	0,08	0,05	0,03	0,04	0,04	0,03	0,62	11,8
4	San Pedro	Estero Yali Medio	0,01	0,02	0,05	0,00	0,03	0,08	0,00	0,04	0,05	0,04	0,03	0,08	0,04	0,08	0,04	0,59	11,2
5	San Pedro	Quebrada Los Maquis	0,05	0,02	0,08	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,07	0,08	0,06	0,05	0,04	0,05	0,04	0,63	12,0
6	Melipilla	Estero Popeta	0,05	0,04	0,06	0,00	0,00	0,00	0,06	0,04	0,06	0,08	0,08	0,00	0,04	0,05	0,04	0,61	11,7
7	Melipilla	Estero Cholqui	0,00	0,04	0,00	0,00	0,01	0,04	0,04	0,00	0,01	0,08	0,06	0,03	0,04	0,00	0,00	0,35	6,7
8	Melipilla	Estero de La Higuera	0,04	0,04	0,02	0,06	0,04	0,08	0,06	0,00	0,03	0,04	0,06	0,00	0,04	0,04	0,04	0,59	11,2
9	Melipilla	Estero Pajonal	0,00	0,04	0,03	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,03	0,04	0,03	0,00	0,04	0,00	0,00	0,25	4,8
10	Pichidegua	Río Tinguiririca	0,07	0,02	0,02	0,06	0,04	0,08	0,08	0,03	0,08	0,04	0,00	0,08	0,04	0,04	0,04	0,72	13,6
<b>Total</b>																		<b>5,25</b>	<b>100,0</b>



**Fig.N°4.2:** Ubicación de los sectores analizados en **Tabla N°4.1**, en comunas y regiones del país.

De acuerdo con la Tabla anterior, los sectores que cumplen con los requisitos establecidos son:

- ◆ Río Tinguiririca (13,6%), comuna Pichidegua
- ◆ Quebrada Las Maquis (12,0%), comuna San Pedro
- ◆ Estero Las Diucas/El Sauce (11,8%), comuna San Pedro
- ◆ Estero Popeta (11,7%), comuna Melipilla
- ◆ Estero Yali Medio (11,2%), comuna San Pedro
- ◆ Estero La Higuera (11,2%), comuna Melipilla

Los factores con los mayores valores del índice de selección para el sector Río Tinguiririca corresponden al número de planteles, a la concentración promedio de  $\text{NO}_3^-$  en las aguas subterráneas, al tipo de tratamiento, a las texturas de suelos, el nivel de la napa y el tipo de cultivo.

Los criterios más importantes para el sector Quebrada Las Maquis son el número de pozos, las capacidades de usos de suelos, las texturas de los suelos, el tipo y permeabilidad del acuífero y el tipo de cultivo; es decir, las características físicas (tipos de suelos y del acuífero en general).

La concentración de  $\text{NO}_3^-$  en las aguas subterráneas y el tipo de acuífero son los factores con más relevancia para el sector Estero Las Diucas/Estero El Sauce.

Los factores más importantes para el sector Estero Popeta son el número de pozos, la capacidad de usos de suelos, el tipo del acuífero, la permeabilidad del acuífero y el tipo de cultivo.

En el sector Yali Medio los criterios de tratamiento de purines, del nivel de la napa, la concentración de nitrógenos en los purines y el tipo de cultivo contribuyen más.

En Estero de la Higuera, el tipo de tratamiento, la permeabilidad del acuífero, y el tipo de cultivo son los factores de mayor relevancia.

Dado que el sector Estero Yali Medio está en el fundo del sector Quebrada Las Maquis, es posible combinarlos o seleccionar sólo uno de estos sectores.

Los sectores Estero Las Diucas/El Sauce y Estero Popeta son adecuados de acuerdo a los resultados obtenidos, pero los productores existentes no ofrecieron las facilidades necesarias para acceder a sus instalaciones y permitir efectuar los muestreos requeridos de las aguas. Por las dificultades operativas previstas, se propone eliminarlos de la selección.

En base a los criterios anteriores, los sitios seleccionados para ser utilizados como sitios pilotos son los siguientes:

- ◆ Comuna San Pedro, sectores Quebrada Los Maquis y Estero Yali Medio.
- ◆ Comuna Pichidegua, sector Río Tinguiririca.
- ◆ Comuna Melipilla, sector Estero La Higuera.

En ellos se realiza un reconocimiento en terreno, para evaluar las siguientes características:

- ◆ Los pozos disponibles para monitorear y medir las aguas subterráneas,
- ◆ Los niveles de nitratos en las aguas subterráneas,
- ◆ Los tipos de fuentes potenciales de nitrógeno,
- ◆ La diversidad de las actividades agrícolas en estos sectores, y
- ◆ Las infraestructuras, sistemas y ciclos de riego.

Por restricciones económicas, de la selección efectuada se eligen 2 sectores a ser estudiados. Para ello, se efectúa un reconocimiento de terreno en los tres sectores seleccionados con el objetivo de mejor resolver respecto de los que finalmente serán materia del proyecto. En los acápite siguientes se resumen los principales resultados obtenidos del reconocimiento inicial de los sectores y de las mediciones de terreno efectuadas.

#### **4.4 RECONOCIMIENTO INICIAL DE LOS SECTORES EN COMUNA SAN PEDRO**

**Catastro de Pozos y Norias.** Se encontraron los siguientes pozos y norias en el sector.

- ◆ 8 norias
- ◆ 46 pozos profundos. En 2 sistemas (de 3 pozos y 2 pozos) las aguas son bombeadas a una misma descarga, mezclándose, muestreándose aguas representativa de la mezcla
- ◆ 23 de los pozos profundos están registrados en la DGA
- ◆ 23 perfiles estratigráficos y otros antecedentes recopilados en el reconocimiento inicial.

**Niveles de Nitratos en las aguas subterráneas.** Las concentraciones de N-Nitrato (mgN/L), medidos en las aguas subterráneas de los pozos del sector, son las siguientes:

- ◆ Rango de concentraciones: entre 1,99 y 26,7 mg-N/L
- ◆ 16 pozos con concentraciones menores a 5,0 mg-N/L
- ◆ 9 pozos y 6 norias con concentraciones entre 5,0 y 10,0 mg-N/L
- ◆ 5 pozos y 2 norias entre 10,0 y 26,7 mg-N/L
- ◆ 13 pozos no pudieron ser monitoreados (sellados).

**Actividades Agropecuarias.** Las actividades agropecuarias en el sector San Pedro corresponden a cultivos anuales, cultivos de frutales y ganadería. En enero de 2009, los cultivos encontrados en este sector fueron maíz, viñas, duraznos, almendras, olivos, ciruelas, más campos de presiembra. Para ganadería, se identificaron 3 grupos de galpones de aves y 6 grupos de galpones para cerdos. También se observa ganado bovino en los pastos y praderas de este sector.

**Los Sistemas de Riego.** Se identifican los siguientes sistemas de riego:

- ◆ pivote para maíz
- ◆ surcos para alfalfa, pradera natural y presiembra
- ◆ goteo para almendras, duraznos, olivos y ciruelas

**Las fuentes de nitrógeno potenciales** observadas para las aguas subterráneas, son:

- ◆ fertilizantes inorgánicos
- ◆ mineralización de suelos orgánicos
- ◆ purines

#### **Resumen del Reconocimiento Inicial del Sector San Pedro**

- ◆ Existe un número importante de pozos/norias que permiten efectuar muestreos y mediciones *in situ* de las aguas subterráneas y ellos están bien distribuidos en la cuenca.
- ◆ Rango de concentraciones de nitratos: entre 2 y 27 mg-N/L.
- ◆ Las actividades agrícolas en este sector son representativas de las actividades existentes en la Región Metropolitana
- ◆ Las fuentes potenciales de nitrógeno son reconocibles.
- ◆ Se cumplen los requisitos para el proyecto, por lo tanto, es posible evaluar la carga de nitrógeno de fuentes potenciales y efectuar balances de nitrógeno

## **4.5 RECONOCIMIENTO INICIAL DEL SECTOR TINGUIRIRICA (COMUNA PICHIDEGUA)**

**Catastro de Pozos y Norias.** Se encontraron los siguientes pozos y norias en el sector.

- ◆ 16 norias
- ◆ 11 pozos profundos
- ◆ 4 de los 11 pozos profundos registrados en la DGA
- ◆ 3 perfiles estratigráficos y otros antecedentes recopilados en el reconocimiento inicial.

### **Niveles de N-Nitratos en las aguas subterráneas**

- ◆ Rango de concentraciones: entre <0,5 y 34,0 mg-N/L
- ◆ 8 pozos y 11 norias con concentraciones menores a 5,0 mg-N/L
- ◆ 2 pozos y 1 noria presentan concentraciones entre 5,0 y 10,0 mg-N/L
- ◆ 4 norias presentan entre 10,0 y 34,0 mg-N/L
- ◆ 1 pozo no pudo ser monitoreado.

**Actividades Agropecuarias.** En el sector de Pichidegua se observa una intensa actividad agropecuaria, la cual incluye cultivos anuales, cultivo de frutales y ganadería de cerdos. Los cultivos identificados corresponden a maíz, frutales cítricos, viñas, olivos, naranjas, más campos de presiembra y pastos.

**Los Sistemas de Riego** utilizados en el sector corresponden a:

- ◆ surcos para maíz, praderas y presiembra.
- ◆ goteo para viñas, frutales, y olivos.

**Las fuentes potenciales de nitrógeno** para las aguas subterráneas corresponden a:

- ◆ fertilizantes inorgánicos.
- ◆ mineralización de suelos orgánicos.
- ◆ Purines.
- ◆ Guanos.

### **Resumen del Reconocimiento Inicial del Sector Pichidegua**

- ◆ La cantidad y distribución de pozos es adecuada para el proyecto, pero no existe mucha información sobre su litología, profundidad, datos de construcción, etc.
- ◆ Existe mucha información disponible sobre el tratamiento y aplicación de purines y guanos desde los planteles de cerdos.
- ◆ Intensa actividad agrícola en este sector.
- ◆ Las actividades agrícolas en este sector son representativas de las actividades existentes en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins
- ◆ Sector adecuado para el desarrollo del proyecto.

#### **4.6 RECONOCIMIENTO INICIAL DEL SECTOR ESTERO LA HIGUERA (COMUNA MELIPILLA)**

**Catastro de Pozos y Norias.** Se verifica la existencia de:

- ◆ 10 norias
- ◆ 15 pozos profundos
- ◆ De los cuales 3 de los pozos profundos están registrados en la DGA
- ◆ Además, se muestrea en 5 puntos de aguas superficiales.
- ◆ 5 pozos profundos presentan antecedentes de perfiles geológicos y otra información.

**Niveles de Nitratos en las aguas subterráneas.** El resumen de las concentraciones de N-Nitrato (mg-N/L) en las aguas subterráneas de pozos y norias en el sector, es el siguiente:

- ◆ Rango observado: entre 0,04 y 14,2 mg-N/L.
- ◆ 7 pozos y 3 norias con concentraciones menores a 5,0 mg-N/L.
- ◆ 5 pozos y 3 norias presentan concentraciones entre 5,0 y 10,0 mg-N/L.
- ◆ 3 pozos y 4 norias presentan concentraciones entre 10,0 y 14,2 mg-N/L

**Actividades Agropecuarias.** Las actividades agrícolas encontradas en el sector Estero La Higuera corresponden a: cultivos anuales (i.e.: maíz), pastos naturales, plantaciones forestales, praderas, frutales cítricos, y viñas. En ganadería, existen 3 instalaciones para cerdos, 1 instalación para aves y 3 lecherías.

**Los Sistemas de Riego** corresponden a:

- ◆ Goteo para frutales y viñas
- ◆ surcos para cultivos anuales, pastos naturales, praderas, y plantaciones forestales.

**Fuentes potenciales de nitrógeno,** corresponden a:

- ◆ Fertilizantes inorgánicos.
- ◆ Mineralización de suelos orgánicos.
- ◆ Purines.
- ◆ Guanos.

#### **Resumen del Reconocimiento Inicial del Sector Estero La Higuera (Melipilla)**

- ◆ El número, distribución e información de pozos es adecuado para el proyecto.
- ◆ Existe mucha información de los planteles de cerdos sobre tratamiento y aplicación de purines y guanos.
- ◆ Existe mucha información sobre las actividades agrícolas y los sistemas de riego.
- ◆ Existen diferentes fuentes potenciales de nitrógeno.
- ◆ Sector adecuado para desarrollo del proyecto.

## 4.7 SELECCIÓN DE DOS SECTORES PILOTOS

Basado en la información anterior, y condicionado por el presupuesto disponible para la realización del proyecto, se seleccionaron los siguientes dos sectores:

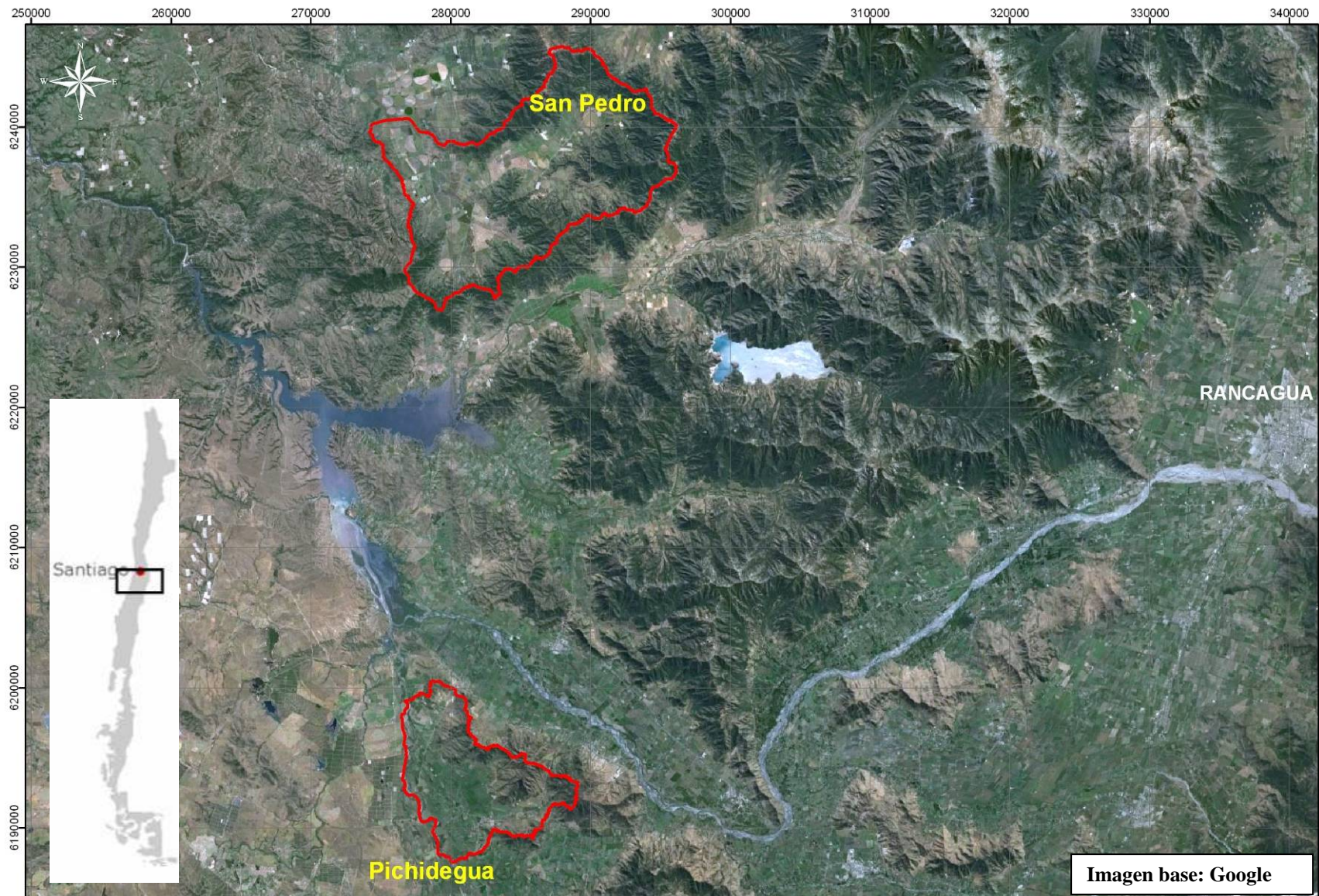
- ◆ Sector San Pedro (Quebrada Los Maquis en comuna San Pedro de la Región Metropolitana de Santiago), y
- ◆ Sector Pichidegua (río Tinguiririca en comuna Pichidegua de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins).

Se observa que es seleccionado un sector por Región. En el caso de la Región Metropolitana, donde postulaban 2 sectores, se priorizó al Sector San Pedro (comuna de San Pedro) por sobre el Sector La Higuera (comuna de Melipilla), por cuanto dicho sector está dominado por instalaciones productoras de cerdos y zonas agrícolas en general y es probable que no esté afectada por otras fuentes de nitrógeno (lo que permitirá un estudio del origen/destino del  $\text{NO}_3^-$  proveniente de fuentes conocidas específicas). En cambio, en el sector Estero La Higuera (comuna de Melipilla) existe además un sistema de canales que conducen aguas desde el Río Mapocho, con probable aporte de nitrógeno proveniente de aguas servidas domésticas, lo cual conduce a un escenario hidrológico/hidrogeológico de mayor complejidad y que probablemente no pueda ser resuelto sólo en base a la información hídrica/hidrogeológica disponible.

Las regiones Metropolitana de Santiago y VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins, donde se ubican los sectores pilotos seleccionados, concentran en conjunto más del 80% de los criaderos de cerdo del país.

Los sectores pilotos se ubican al sur de la ciudad de Santiago y al Oeste de la ciudad de Rancagua (ver **Figura N°4.3**).





**Figura 4.3:** Ubicación de los Sectores Pilotos seleccionados (sectores: San Pedro y Pichidegua).

## 5. FUENTES POTENCIALES DE NITRATOS

---

En el presente capítulo se presenta la identificación y caracterización de las fuentes potenciales de nitratos a las aguas subterráneas, efectuándose una estimación de la carga de nitrógeno asociada a ellas, en los dos sectores seleccionados para ejecutar el proyecto: Sectores San Pedro y Pichidegua.

### 5.1 SECTOR SAN PEDRO

El Sector San Pedro se ubica en la Zona Central de Chile, comuna de San Pedro, Región Metropolitana. Se localiza a 40 km aproximadamente al Sur de Melipilla y 15 Km al Norte del embalse Rapel. Este sector se sitúa en la cabecera de la cuenca asociada al estero Yali, el cual finalmente desemboca en el mar (ver **Figura N°5.1**).



**Figura N°5.1:** Región Metropolitana. Ubicación de comuna de San Pedro (área color rojo) y sector de estudio (delimitado por línea color azul).



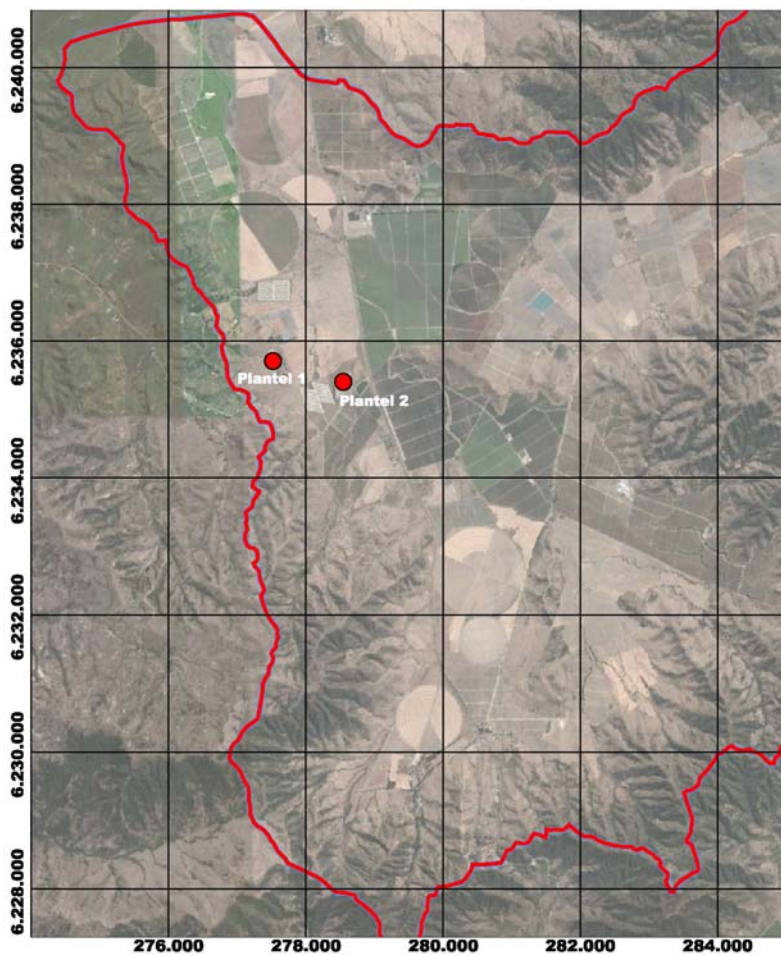
### 5.1.1 Identificación y Caracterización Química de las Fuentes Potenciales

El sector de San Pedro se caracteriza por ser un área eminentemente agrícola, con presencia reciente de la industria de cerdos (a partir de la última década). Los planteles de cerdos existentes producen purines, los cuales son aplicados en zonas de cultivos como mejoradores de suelo. Luego, en este sector, las principales fuentes potenciales de nitratos corresponden a las áreas de cultivos donde se aplican fertilizantes nitrogenados industriales y/o purines. Se destaca que, en este sector, las aguas servidas domésticas corresponden a una fuente potencial de nitratos de carácter puntual, acotada a los sectores de asentamientos humanos.

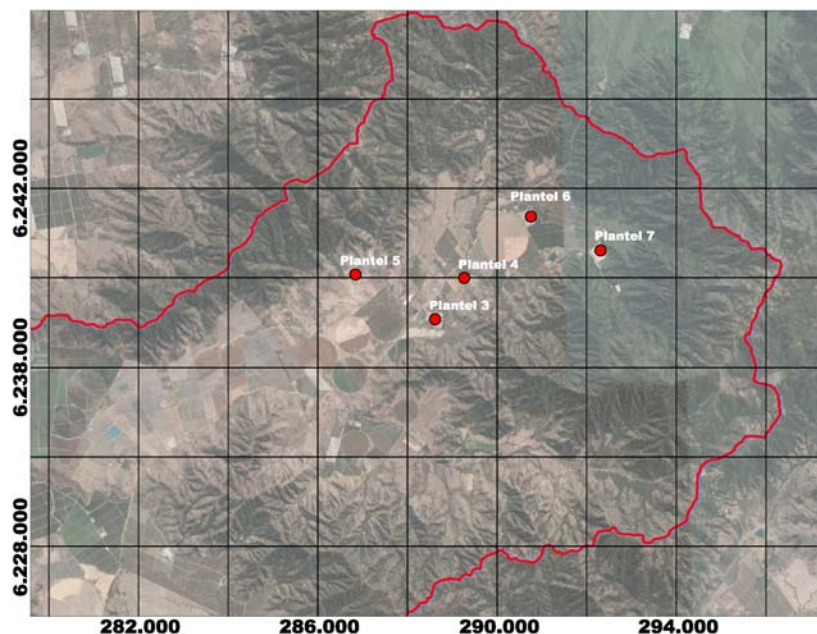
#### a) **Planteles de Cerdos**

En la zona de San Pedro existe un total de 7 planteles de cerdos, correspondientes a:

- ◆ 2 Planteles en sector salida de la cuenca, los cuales se ubican al Oeste de la junta de los esteros Lo Chacón y San Vicente (**Figura N°5.2**).
- ◆ 5 Planteles en sector de cabecera de la cuenca, ubicados hacia la zona Este, en el sector del estero Las Palmas (**Figura N°5.3**).



**Figura N°5.2:** Ubicación de planteles sector Oeste de San Pedro.



**Figura N°5.3:** Ubicación de plantales sector Este de San Pedro.

### Plantales Sector de Salida:

Estos Plantales generan residuos sólidos y líquidos (purines). Los primeros son retirados por camiones, vendidos a vecinos (fuera del área del proyecto) para su incorporación en suelos y para la alimentación de rumiantes, en tanto que los purines se depositan en una laguna de estabilización de 72.000 m<sup>3</sup> de capacidad.

La laguna, aparte de almacenar, tiene la función de facilitar los procesos de biodegradación y estabilización. En este hábitat artificial proliferan las bacterias que degradan los componentes orgánicos y nutrientes a complejos más simples, cuyo proceso contempla un tiempo estimado de al menos 183 días de almacenamiento.

De acuerdo con el análisis químico efectuado por Hidrolab (julio, 2005) y GP (Análisis Laboratorio ALS, 2009), la calidad de los purines en la laguna se presenta en la **Tabla N°5.1**.

**Tabla N°5.1:** Características de Purines de los plantales en sector de Salida.

Sector	Componente	Unidad	Efluente Riego <sup>(1)</sup>	Entrada Laguna <sup>(2)</sup>	Salida Laguna <sup>(2)</sup>
Salida cuenca	Nitrógeno Total	mg/l	2.726	1.034	1.025
	Nitrato	mg/l	5,52	0,40	0,38
	Nitrito	mg/l	0,54	-	-
	Nitrógeno Kjeldahl	mg/l	2.720	-	-
	Fósforo Total	mg/l	356	-	-
	DBO <sub>5</sub>	mg/l	5.845	-	-
	Sólidos Totales	mg/l	25,23	-	-
	Sólidos Suspendedos Totales	mg/l	3,04	-	-
	Sólidos Volátiles Totales	mg/l	2,3	-	-
	Conductividad Eléctrica	µs/cm	27.000	22.600	32.100
pH			8,07	6,58	7,87

<sup>(1)</sup> Muestreo 17 de Julio, 2005. Analizado por Hidrolab (Informe 65168)

<sup>(2)</sup> GP Consultores Ltda. y análisis químicos realizados por el laboratorio ALS (muestreo 30-Abril-2009)

De la tabla anterior se observan diferencias entre las mediciones de nitrógeno total y nitratos en los datos obtenidos en el 2005 y 2009. Estos datos muestran que el nitrógeno de los purines está formado mayoritariamente por nitrógeno orgánico y amonio. Las diferencias entre los resultados obtenidos en las campañas de muestreo pueden estar asociadas a cambios en la alimentación de los cerdos, cambios en el rendimiento del biodigestor, modificación de puntos de muestreo, y variación en técnicas de muestreo. Por su representatividad (contemporaneidad), son los datos del muestreo del año 2009 los utilizados en los siguientes puntos de evaluación del aporte de nitrógeno, balance de nitrógeno y marco hidroquímico.

Cabe hacer notar que, posteriormente, los purines son bombeados desde la laguna a un tranque de acumulación (8.000 m<sup>3</sup>), en donde son mezclados con aguas provenientes de un pozo profundo, a razón de 1/3 (purines) y 2/3 (agua de pozo), lo cual diluye considerablemente la concentración de nitrógeno aportado por el purín. Luego son aplicados en los cultivos de maíz (129 ha) mediante riego por pivote y mediante riego por surcos en pradera natural (16 ha) y de presiembra (5,4 ha).

### **Planteles sector de Cabecera:**

Los purines producidos por estos planteles son almacenados en un estanque de acumulación, luego del cual son bombeados hacia un biodigestor (uno por familia de planteles). Estos biodigestores corresponden a una construcción tipo laguna impermeabilizada y tapada herméticamente. En el caso del biodigestor del grupo de planteles 3,4 y 5, éste presenta un volumen de 48.000 m<sup>3</sup>, en tanto que, en el caso del grupo de planteles 6 y 7, éste presenta un volumen de 68.000 m<sup>3</sup>.

Respecto del sistema de impermeabilización de los biodigestores, cabe destacar que estos sistemas están compuestos por una geomembrana de HDPE colocada sobre arcilla compactada, cuyo objetivo principal es evitar la infiltración de los purines al sistema subterráneo.

Respecto al tratamiento de los purines en los biodigestores propiamente tal, éste consta de la separación gravitacional de los líquidos y sólidos, en donde los sólidos son sometidos a una descomposición microbiana anaerobia. El metano producido en la descomposición es quemado en una flama *in situ*.

Los líquidos tratados en los biodigestores fluyen hacia una laguna de estabilización y almacenamiento de 45.000 m<sup>3</sup> en el sistema asociado al grupo de planteles 3, 4 y 5, y de 80.000 m<sup>3</sup> en el sistema asociado a los planteles 6 y 7. Para este último caso, luego de la laguna de estabilización, las aguas son enviadas a un embalse de riego de 290.000 m<sup>3</sup> de capacidad, el cual recibe también aguas provenientes de la temporada de lluvias, y agua de tres pozos profundos ubicados en la zona de Santa Rosa de Chacón. El aporte de aguas lluvias y de aguas subterráneas al embalse de riego diluye considerablemente la concentración de nitrógeno aportado por el purín (**Tabla N°5.3**).

Cabe señalar que en este proceso no se generan sólidos, ya que los sólidos son consumidos en el proceso del tratamiento.

Las características químicas de Purines a la salida de los Biodigestores y de las Lagunas, asociados a los planteles 3, 4, 5, 6 y 7, se presentan en las **Tablas N°5.2 (2005)** y **5.3 (2009)**. Estos datos muestran que en el 2005 la mayor parte del nitrógeno estaba en la forma de amonio. En el 2009, aproximadamente 50 % del nitrógeno estaba como nitrógeno orgánico y 50 % como nitrógeno amoniacal. El nitrógeno del agua de riego está compuesto en su mayoría de nitrato. Las diferencias entre los resultados obtenidos en las campañas de muestreo pueden estar asociadas a cambios en la alimentación de los cerdos, cambios en el rendimiento del biodigestor, modificación de puntos de muestreo, y variación en técnicas de muestreo. Los datos del año 2009 (más actuales) son los utilizados en la evaluación del aporte de nitrógeno, el balance de nitrógeno, y la definición del marco hidroquímico, presentados en los siguientes puntos.

**Tabla N°5.2:** Características de Purines a la salida de los Biodigestores y lagunas, asociado a los planteles, 2005.

Parámetro	Unidad	Familia de Planteles 3, 4 y 5			Familia de Planteles 6 y 7		
		Entrada Biodigestor	Salida Biodigestor – Entrada Laguna	Salida Laguna	Entrada Biodigestor	Salida Biodigestor – Entrada Laguna	Salida Laguna
Fosfato	[mg/L]	326	251	225	391	301	270
Nitrógeno Total Kjeldhal	[mg/L]	1.392	1.322	1.110	1.670	1.586	1.332
Nitrógeno Amoniacal	[mg/L]	1.055	1.045	919	1.266	1.254	1.103
DBO <sub>5</sub>	[mg/L]	9.865	4.143	3.107	11.838	4.972	3.728
DQO	[mg/L]	15.396	7.981	6.065	18.475	9.577	7.278
Sólidos Suspendedos Totales	[mg/L]	6.459	3.001	2.100	7.750	3.601	2.520
pH	-	7,1	7,8	6 – 7,55	7,1	7,8	6 – 7,55

Fuente: Declaración de Impacto Ambiental, Recibido por CONAMA el 27/12/2005.

**Tabla N°5.3:** Las características de Purines en Biodigestores y lagunas de Planteles 3, 4, 5, 6 y 7, 2009.

MUESTRAS	FECHA	Mediciones <i>in-situ</i> (GP)				Parámetros Químicos (ALS)			
		T (°C)	CE (µS/cm)	pH	OD (mg/L)	Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	Nitrógeno total (mg/L)	Nitrógeno de nitrato (mg N/L)	Fósforo (mg/L)
Salida Laguna Planteles 3, 4 y 5	30-04-2009	13,4	10990	8,22	0,50	471	845	0,23	19,10
Salida Biodigestor Planteles 3, 4 y 5	30-04-2009	20,9	11040	7,45	0,40	638	1050	0,30	12,70
Salida Laguna Planteles 6 y 7	30-04-2009	14,5	13590	8,18	0,40	528	1070	0,22	16,60
Salida Biodigestor Planteles 6 y 7	30-04-2009	20,6	14400	7,56	0,40	413	1350	0,24	17,30
Riego Planteles 6 y 7	30-04-2009	20,3	643	7,90	8,36	1	33	27,58	<0,2

Fuente: Mediciones In-situ realizados por GP Consultores y análisis químicos realizados por el laboratorio ALS.

## b) Cultivos

Los cultivos y la consecuente aplicación de fertilizantes industriales/purines corresponden a la principal fuente potencial de nitrógeno en el sector. Se caracteriza la zona de acuerdo a los siguientes puntos:

- ◆ Identificación de los tipos de fertilizantes aplicados.
- ◆ Caracterización química de los purines.
- ◆ Identificación y delimitación de las áreas de cultivos donde se aplican fertilizantes/purines.

A continuación se presenta una caracterización del área del proyecto en términos de los cultivos y los sistemas de riego existentes. Las principales características identificadas en esta zona corresponden a:

- ◆ Fundos/Predios (ver **Figura N°5.4**);
- ◆ Fertilizantes Aplicados (ver **Figura N°5.5**);
- ◆ Sistemas de Riego (ver **Figura N°5.6**)

En la **Tabla N°5.4** se presenta una caracterización física química de los purines generados en el sector de San Pedro, los cuales son aplicados como mejoradores de suelo y como fertilizantes, como parte del agua de riego. La totalidad de las mediciones efectuadas en purines (parámetros: Boro Total, Calcio Total, Hierro Total, Potasio Total, Magnesio Total, Sodio Total, Estroncio Total, Zinc Total, Bicarbonatos, Carbonatos, Cloruros, Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Total, Nitrógeno de Nitrato, Fósforo, Sulfatos y Carbono Orgánico Disuelto) se incluyen en **Anexo E**.

De la **Tabla N°5.4**, se observa que la conductividad eléctrica de los purines es muy alta (entre 10.990 y 32.100  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), con la excepción de aguas de “Riego planteles 6 y 7”, que por corresponder a una mezcla de purines, aguas subterráneas y aguas lluvia, presenta un valor de 643  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el cual es más similar a los valores observados en las aguas subterráneas. Por otro lado, las concentraciones de oxígeno disuelto son muy bajas: 0,4 a 0,6; lo cual es el resultado del consumo de oxígeno por bacterias en la descomposición aeróbica del material orgánico. El oxígeno disuelto del agua de “Riego Planteles 6 y 7” fue de 8,36 mg/L, valor que también concuerda con su origen, asociado a la mezcla de purines con aguas de pozos.

**Tabla N°5.4:** Análisis físico-químico de purines en sector San Pedro (abril de 2009).

MUESTRAS PURINES	T (°C)	CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	pH	OD (mg/L)	Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	Nitrógeno Total (mg/L)	Nitrógeno Nitrato (mg N/L)
Planteles 1 y 2, Entrada	16,2	22600	6,58	0,6	341	1034	0,4
Planteles 1 y 2, Salida	16,0	32100	7,87	0,6	525	1025	0,38
Planteles 3, 4 y 5, Entrada	20,9	11040	7,45	0,4	638	1050	0,3
Planteles 3, 4 y 5, Salida	13,4	10990	8,22	0,5	471	845	0,23
Planteles 6 y 7, Entrada	20,6	14400	7,56	0,4	413	1350	0,24
Planteles 6 y 7, Salida	14,5	13590	8,18	0,4	528	1070	0,22
Riego Planteles 6 y 7	20,3	643	7,9	8,36	1,04	33,1	27,58

**Nota1:** Las muestras que se indican como Entrada corresponden a purines a la entrada de las lagunas de almacenamiento, en tanto que, las muestras identificadas como salida corresponden a los purines a la salida de la laguna de almacenamiento, previo a su aplicación.



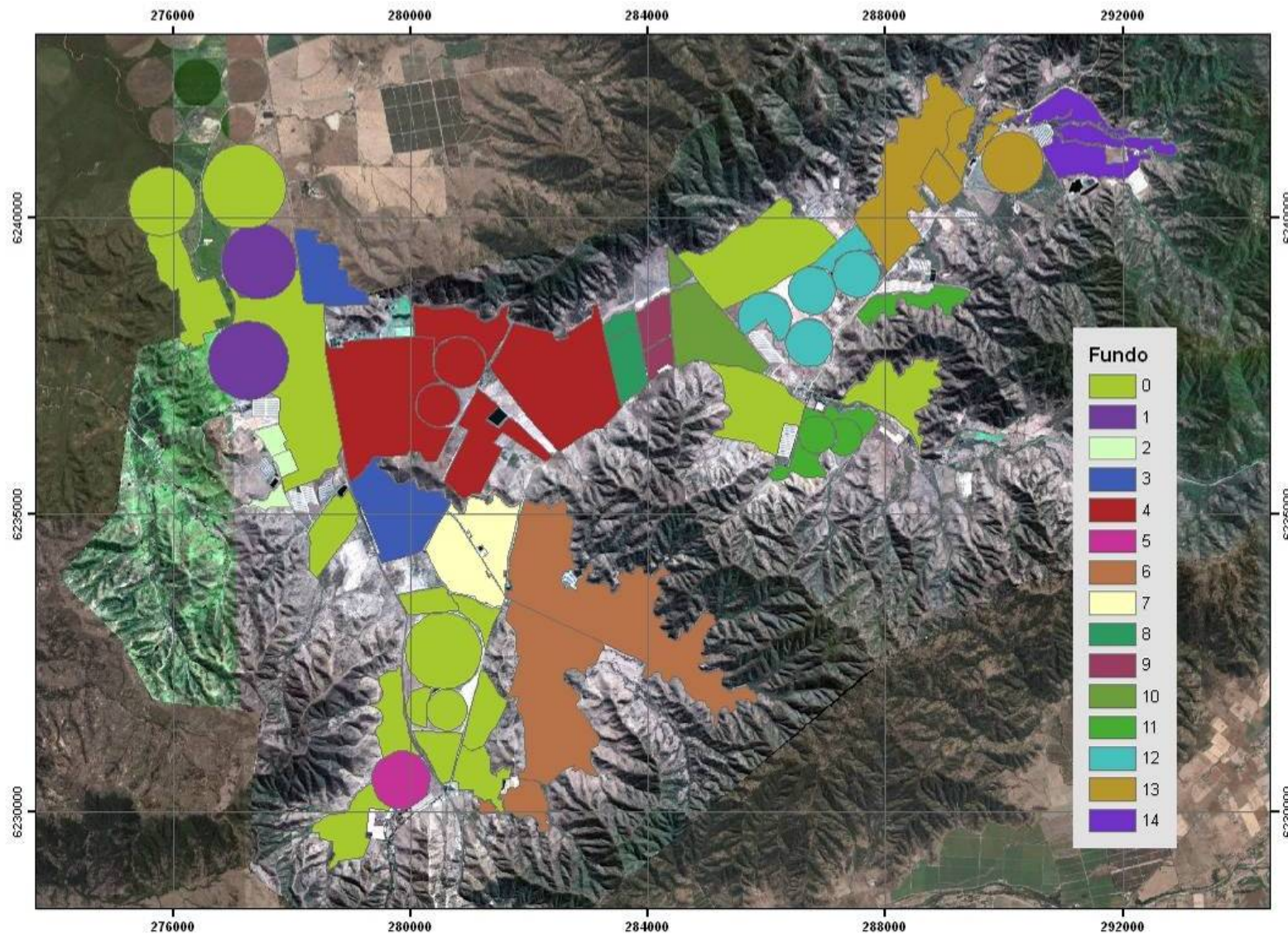
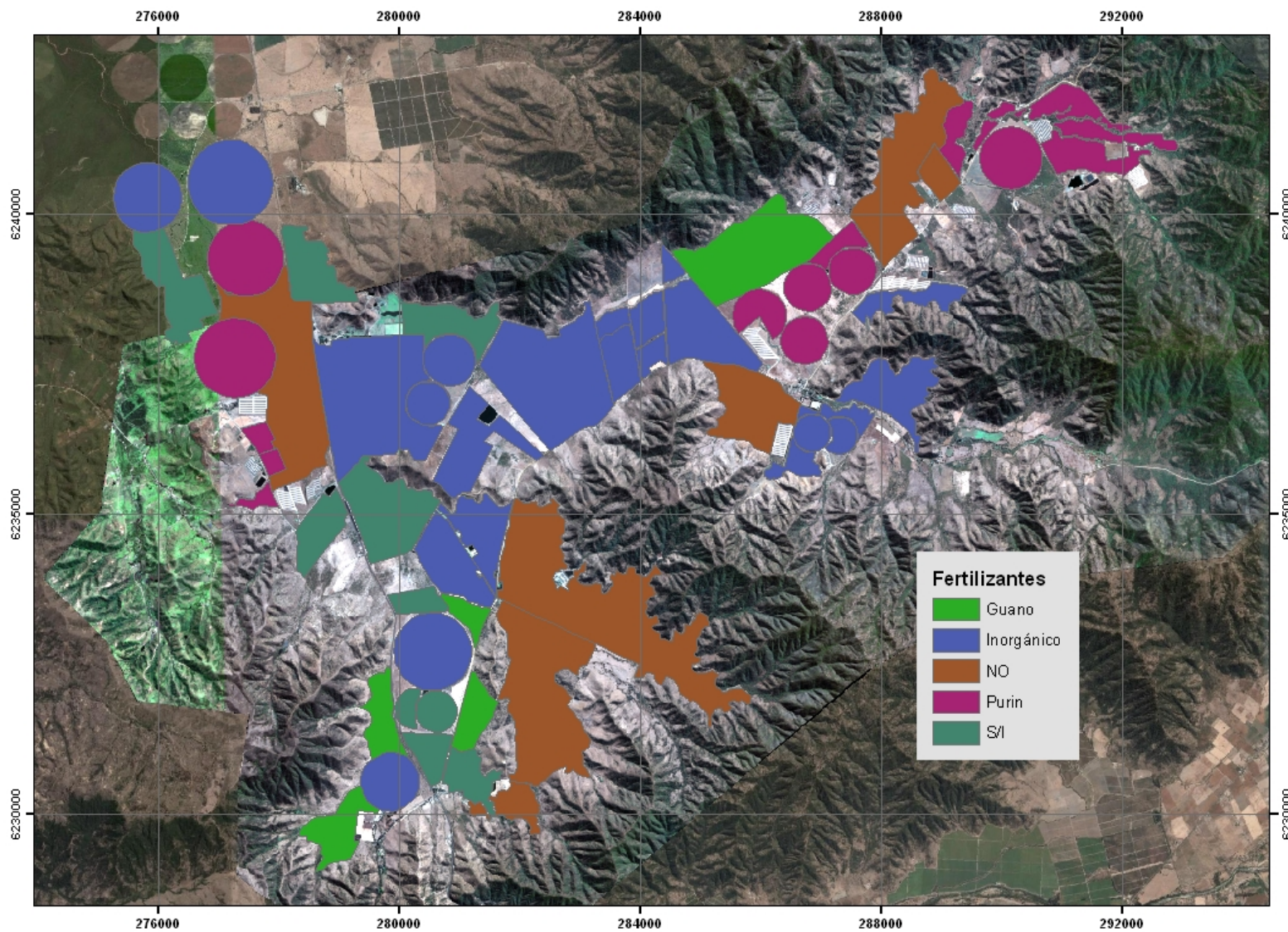


Figura N°5.4: Fondos / Predios existentes en sector San Pedro y códigos internos de identificación (números correlativos designados por GP).





**Figura N°5.5:** Tipo de fertilizantes aplicados en el sector San Pedro. El símbolo “S/I” significa fundos que no proporcionaron información sobre la aplicación de fertilizantes. El símbolo “NO” se refiere a los sectores sin aplicación de fertilizantes.



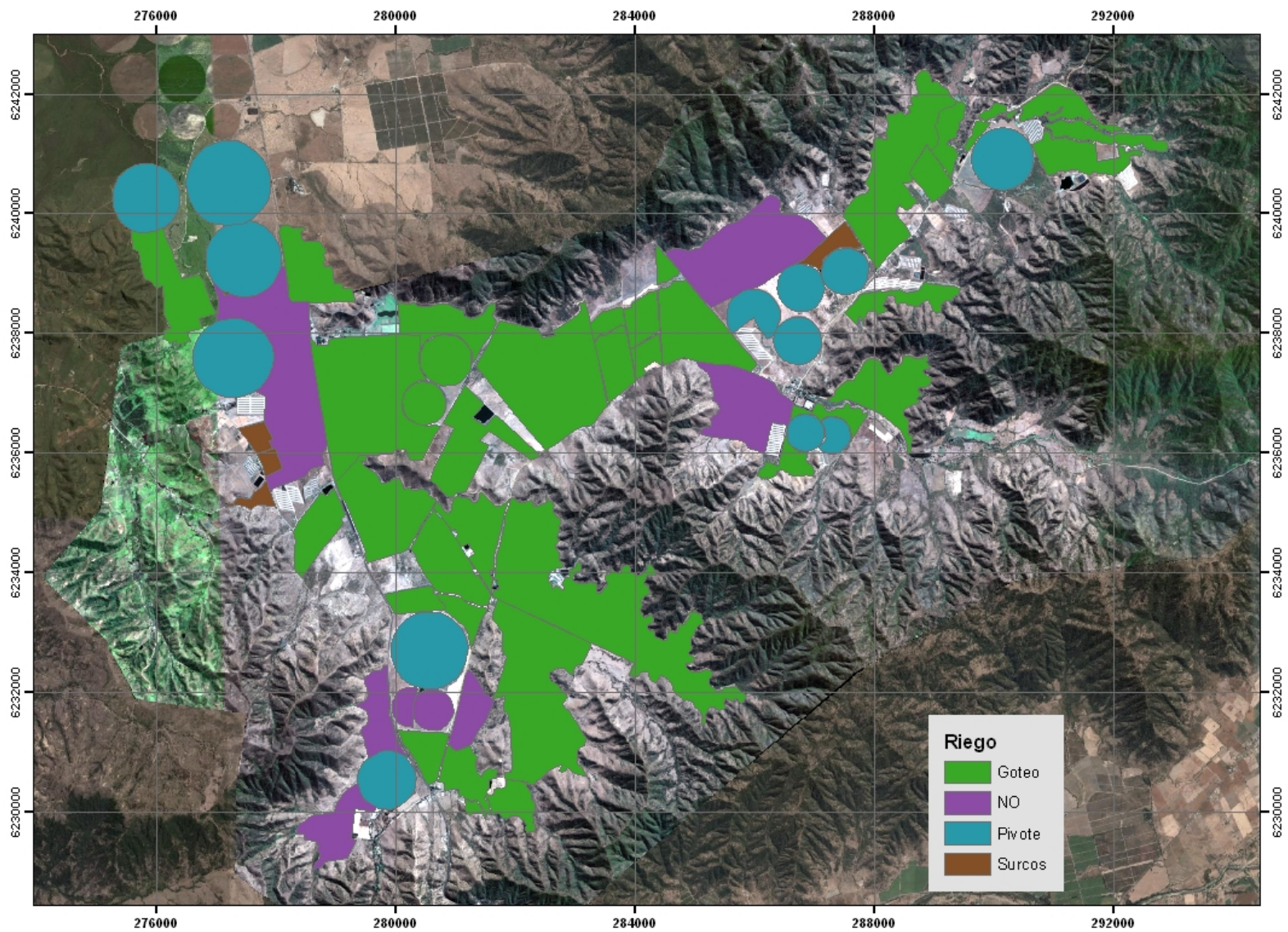


Figura N°5.6: Sistemas de riegos utilizados en el sector San Pedro. El símbolo “NO” se refiere a los sectores sin riego o sin información.

## 5.1.2 Caracterización Isotópica de las Fuentes Potenciales

### a) Purines en Sector San Pedro

Se colectan y analizan muestras de purines para análisis de  $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$ , con el objetivo de identificar su marca isotópica.

Los purines del sector San Pedro son aplicados desde tranques a los distintos terrenos de riego. El muestreo considera la caracterización de las aguas en la zona donde los purines ingresan al tranque, así como también en la zona donde salen del tranque, de manera de identificar diferencias en su composición química e isotópica de amonio, con respecto al tiempo de residencia de los purines en los tranques, lo cual tiene influencia en el proceso de volatilización del amonio.

Las muestras son obtenidas en las siguientes ubicaciones:

- Muestra 1 – Purín Planteles 1 y 2: Entrada a la Laguna de estabilización
- Muestra 2 – Purín Planteles 1 y 2: Salida de laguna de estabilización
- Muestra 3 – Purín Planteles 3, 4 y 5: Entrada al tranque de almacenamiento
- Muestra 4 – Purín Planteles 3, 4 y 5: Salida del tranque de almacenamiento
- Muestra 5 - Purín Planteles 6 y 7: Entrada al tranque de almacenamiento
- Muestra 6 – Purín Planteles 6 y 7: Salida del tranque de almacenamiento

Los resultados de los análisis isotópicos de  $^{15}\text{N-NH}_4^+$  se presentan en la **Tabla N°5.5**.

**Tabla N°5.5:** Resultados análisis  $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$  en muestras de purines, sector San Pedro.

Muestra	NH <sub>4</sub> (mg/L)	<sup>15</sup> N-NH <sub>4</sub>
Purín Planteles 1 y 2, Entrada	341	10,2
Purín Planteles 1 y 2, Salida	525	22,2
Purín Planteles 3, 4 y 5, Entrada	638	4,2
Purín Planteles 3, 4 y 5, Salida	471	11,2
Purín Planteles 6 y 7, Entrada	413	5,1
Purín Planteles 6 y 7, Salida	528	14

Respecto de los resultados, éstos muestran un rango entre 4,2 y 22,2 ‰ en los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  en el  $\text{NH}_4^+$ . Los valores obtenidos muestran claramente el efecto de la volatilización del amonio que ocurre en tranques en la composición isotópica del amonio. El amonio en los purines de alimentación a las lagunas es más empobrecido en  $^{15}\text{N}$  que el amonio a la salida de las lagunas. Por ejemplo, cambia desde 10,2 a 22,2 ‰ en el caso de los planteles 1 y 2, de 4,2 a 11,2 ‰ en el caso de los planteles 3, 4 y 5, y desde 5,1 a 14 ‰ en el caso del purín de los planteles 6 y 7.

El comportamiento antes mencionado está de acuerdo con los datos isotópicos presentados en la **Figura N°5.7**, la que muestra como cambia la composición isotópica del nitrógeno en los purines en función de la estación del año (Karr, 2001). En esta Figura se ve un enriquecimiento isotópico en  $^{15}\text{N}$  desde 10 ‰ en el invierno a un valor de 17 ‰ en el verano (estaciones del año en el hemisferio norte).

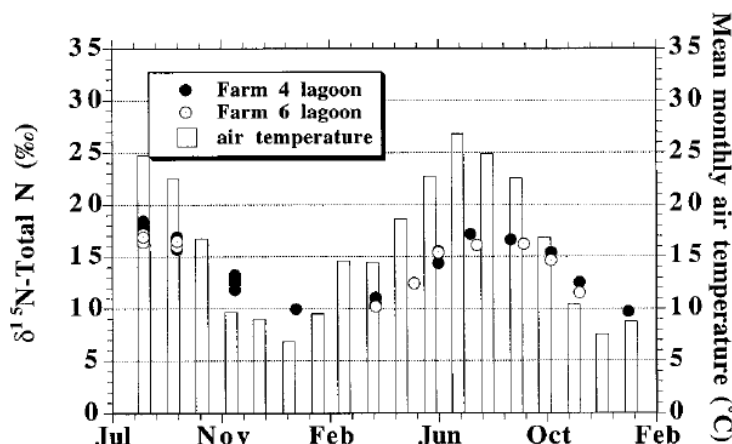


Figura N°5.7: Composición isotópica del nitrógeno en purines almacenados en lagunas, en función de la estación del año (Karr, 2001).

Finalmente, cabe hacer notar que, dados los valores enriquecidos en  $^{15}\text{N}$  (a la salida de los tranques, correspondiente a los purines finalmente aplicados), los cuales son diferentes a los valores de fertilizantes como se verá más adelante, por lo que existe la posibilidad de utilizar el  $^{15}\text{N}$  como trazador para evaluar la influencia de los purines en la concentración de nitratos en el agua subterránea en el área del proyecto. Un requisito importante, es que el purín tiene que haber estado almacenado por un tiempo en lagunas antes de usarlo en riego o como mejoradores de suelo.

## b) Fertilizantes

Otras posibles fuentes potenciales de nitrógeno identificadas, corresponden al uso de Fertilizantes inorgánicos nitrogenados (urea, nitrato de potasio, nitrato de amonio) de las marcas Soquimich, Vitra, y Anagra (ver **Tabla N°5.6**). Estos fertilizantes representan los principales abonos utilizados en el sector San Pedro. El rango de  $\delta^{15}\text{N}$  de los fertilizantes no es muy amplio (-1 a 3‰), y está dentro de los valores reportados en la literatura para nitrógeno en fertilizantes inorgánicos (Aravena y Mayer, 2009). La composición isotópica del nitrógeno de los fertilizantes difiere de la marca de los purines, lo cual sugiere que esta fuente potencial de nitrógeno debería ser fácil de identificarla en aguas subterráneas. Es importante resaltar que fertilizantes como la urea también pueden ser afectados por volatilización en el área de riego, por ejemplo en un estudio en Cataluña, España, en que la fuente de nitratos eran fertilizantes inorgánicos, se observaron valores  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  entre +6,8‰ y +9,4‰ en el agua subterránea en comparación a los fertilizantes que mostraron valores entre 1,1‰ y +3,9‰ (Vitoria et al 2005).

Tabla N°5.6: Resultados de análisis de  $^{15}\text{N}$  de varios fertilizantes nitrogenados.

Tipo de Muestra	Marca/Fuente	$\delta^{15}\text{N}$
urea	Soquimich	-0,92
urea	Anagra	-0,24
urea	Vitra	0,24
mezcla N-P-K	Anagra	0,51
mezcla N-P-K	Vitra	0,25
nitrato de potasio	Vitra	2,98

### c) Otras Fuentes Potenciales:

La mineralización de suelo orgánico junto a aguas servidas domésticas son también fuentes potenciales de nitrógeno a las aguas subterráneas. Para la marca isotópica de estas fuentes, se consideran los valores reportados en la literatura especializada.

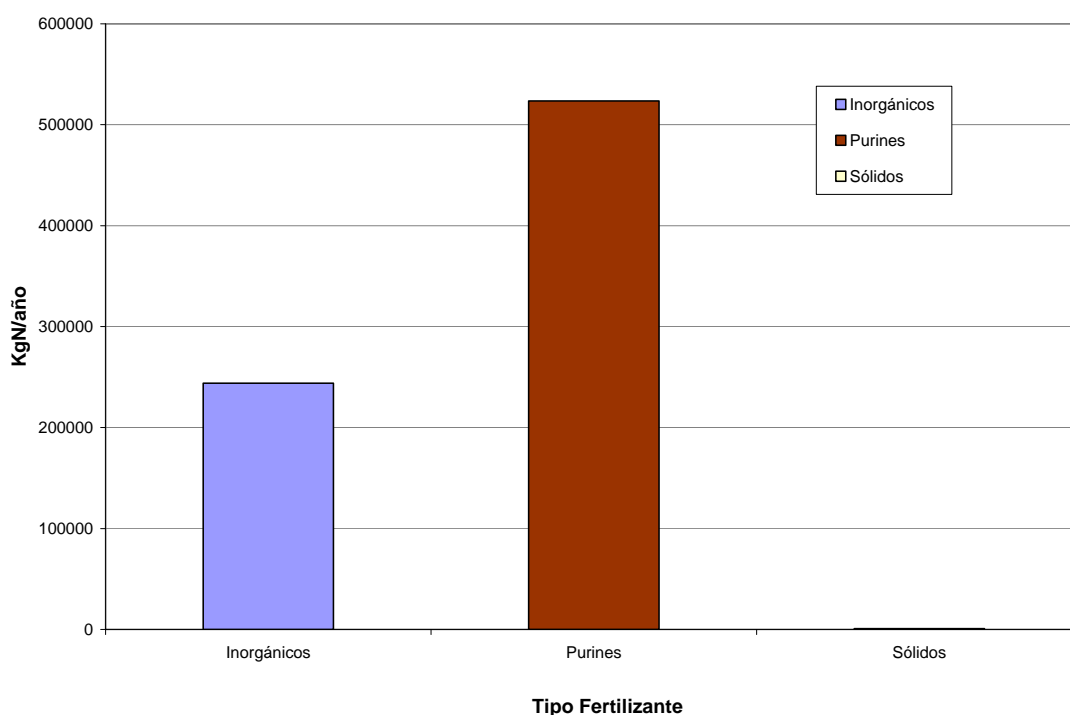
Asimismo, para el guano, si bien existe aplicación en esta área, ésta es de carácter menor, por lo cual no se tomó muestra de aplicaciones de guano en esta área.

#### 5.1.3 Evaluación de las Cargas de Nitrógeno en Sector San Pedro

En esta sección se presenta un resumen de la determinación de las cargas de nitrógeno existente en el sector de San Pedro, asociadas a los distintos tipos de fertilizantes existentes en el área (**Figura N°5.8** y **Tabla N°5.7**).

La metodología utilizada para calcular el aporte de las distintas fuentes es presentada en detalle en el **Anexo B**. Esta evaluación es efectuada considerando la magnitud de las aplicaciones de fertilizantes, su caracterización química (principalmente referida a la concentración de nitrógeno) y la extensión areal que abarcan las distintas aplicaciones.

Los resultados indican que son los purines los que representan el mayor aporte de nitrógeno en este sector, seguido por los fertilizantes inorgánicos. El aporte de Nitrógeno asociado a sólidos es muy inferior respecto de las otras fuentes existentes en la zona del proyecto.



**Figura N°5.8:** Aporte de nitrógeno de varias fuentes aplicadas en sector San Pedro – temporada 2008/09.



**Tabla N°5.7:** Aporte de nitrógeno de varias fuentes aplicadas en sector San Pedro – temporada 2008/09.

Tipo de Fertilizante	Superficie [ha]	Kg N/año
Inorgánicos	1039,8	244062
Purines	680,5	523600
Guanos	649,1	884
Zonas Sin Aplicación	1096,2	-
Zonas Sin Información (*)	801,4	Sin Información
<b>Total</b>	<b>4267,0</b>	<b>768546</b>

(\*) No se contó con la colaboración y entrega de la información por parte de los dueños de los predios.

#### 5.1.4 Balances de Nitrógeno en Sector San Pedro

Con el objetivo de cuantificar la masa potencial de nitrógeno que podría sobrepasar la zona de raíces de las plantas, se efectúa un balance de nitrógeno, donde se evalúan las entradas y salidas de nitrógeno en una unidad agrícola. Cabe hacer notar que, bajo el nivel de raíces, el nitrógeno experimenta una serie de procesos físicos, químicos y biológicos, los cuales afectan la cantidad de nitrógeno que potencialmente puede llegar hasta la zona saturada de las aguas subterráneas (napa).

La expresión (fórmula) básica utilizada para calcular el balance de nitrógeno (N) es la siguiente:

$$\text{Balance Nitrógeno} = \sum \text{Entradas N al suelo} - \sum \text{Salidas N desde el suelo}^1$$

Donde,

##### **Entradas:**

- Contenido de N inicial en el suelo (CN).
- Aporte de N por Fertilización Nitrogenada (FN).
- Aporte de N por aplicación de la fracción líquida de purín de cerdo (FL).
- Aportes de N por aplicación de la fracción sólida de purín de cerdo o guano (FS)
- Aporte de N contenido en rastrojos (RA).
- Aportes de N por depositación atmosférica (DA).
- Mineralización de N orgánico (M).

##### **Salidas:**

- Extracción de N por las plantas (EP).
- Desnitrificación (D).
- Volatilización de N (V).

Luego, **Balance N = (CN + FN + FL + FS + RA + DA + M) – (EP + D + V)** (5.1)

<sup>1</sup> Suelo: Corresponde aproximadamente a los 1,5 primeros metros más superficiales del relleno sedimentario, donde se desarrollan los cultivos. Está conformado por cuatro grandes componentes: constituyentes inorgánicos (grava, arena, limo y arcilla), materia orgánica (acumulación de las plantas destruidas y resintetizadas parcialmente y de los residuos animales), agua (junto con sus sales disueltas) y aire (por lo general, el contenido de anhídrido carbónico es más alto y el del oxígeno más bajo que los hallados en la atmósfera)

Por lo general los valores se expresan en carga de N por unidad de superficie (Kg-N/ha/año). A su vez, los factores se calculan usando las siguientes fuentes de información:

### **Entradas:**

- ◆ **CN** (Contenido de N inicial en el suelo):

Una forma de estimar este parámetro es mediante la utilización de la siguiente fórmula (Fuente: Ortega y Acevedo, 1999):

$$\text{CN} = \text{Concentración de N (ppm)} \cdot \text{Densidad aparente} \cdot 10 \cdot \text{profundidad suelo (m)}$$

La información requerida para la aplicación de la expresión antes señalada, ha sido recopilada de: los Planes de Aplicación de Purines (PAPs); los mapas de suelos de CIREN.

- ◆ **FN** (Aporte de N por Fertilización Nitrogenada):

La información base que permitió caracterizar este aporte correspondió a los datos obtenidos directamente de los planteles de cerdos (2009), o de los fundos particulares, esta última obtenida de la encuesta realizada por GP (2009), las que entregaban directamente el aporte de Nitrógeno por esta fuente (Kg-N/ha/año). Además, los Planes de Aplicación de Purines también presentan información utilizada en la evaluación de este aporte (ASPROCER 2006 y 2007).

- ◆ **FL** (Aporte de N por aplicación de la fracción líquida de purín de cerdo):

La información base que permitió caracterizar este aporte correspondió a los datos obtenidos directamente de los planteles de cerdos (2009), o de los fundos particulares, esta última obtenida de la encuesta realizada por GP (2009), las que entregan los volúmenes de aplicación de purines. En tanto que la caracterización química de los purines, en términos de su contenido de Nitrógeno, fue obtenida de los Planes de Aplicación de Purines (ASPROCER 2006 y 2007), así como también de los muestreos de purines efectuados por GP.

- ◆ **FS** (Aportes de N por aplicación de la fracción sólida de purín de cerdo o guano):

La evaluación se efectuó considerando la información entregada por los planteles de cerdos (2009), de los fundos particulares (Encuesta GP, 2009), y de los PAPs (ASPROCER 2006 y 2007).

- ◆ **RA** (Aporte de N contenido en rastrojos):

Se puede estimar este valor a través de la siguiente fórmula (ASPROCER, 2009):

$$\text{RA} = \text{Producción anual de rastrojos (Ton/ha/año)} \cdot 12$$

- ◆ **DA** (Aportes de N por depositación atmosférica).

Para Chile Central, se estima un valor de 2,9 kg-N/ha/año de depositación de N atmosférico (ASPROCER, 2009).



- ♦ **M**, Mineralización de N orgánico (M).

Se estima un valor de 125 kg-N/ha/año (ASPROCER, 2009).

### **Salidas:**

- ♦ **EP** (Extracción de N por las plantas):

La base de la estimación de esta salida de N, fue considerando la información obtenida de los PAP (2006 y 2007), y las Recomendaciones Técnicas para la Gestión Ambiental en el Manejo de Purines de la Explotación Porcina (INIA – SAG, 2005).

- ♦ **D** (Desnitrificación) y **V** (Volatilización de N):

Valores estándar, obtenidos de bibliografía (Metcalf & Eddie, 1998).

### **a) Balances de Nitrógeno en Zonas con Aplicación de Purines**

Los balances anuales en zonas donde se aplica purines se presentan en la **Figura N°5.9**. La metodología y los valores utilizados en la determinación del balance de nitrógeno se presentan en el **Anexo B**.

Por unidad de área, es el Fundo 13, para el cultivo del maíz (1543 Kg N/ha/año), el que presenta el mayor balance (más positivo), seguido por los cultivos del Fundo 12 (888 – 1000 Kg N/ha/año). Los Fundos 14 (801 Kg N/ha/año), Fundo 1 (775 Kg N/ha/año), y los olivos de Fundo 13 (600 Kg N/ha/año), son los que presentan los menores valores de los balances de los predios evaluados.

### **b) Balance de Nitrógeno en Zonas con Aplicación de Fertilizantes Inorgánicos**

Los resultados del balance de nitrógeno, en las zonas de aplicación de fertilizantes inorgánicos (sin purines), se presenta en la **Figura N°5.10**, en tanto que el detalle de los valores utilizados se presenta en **Anexo B**.

Los resultados indican que, por unidad de área cultivada, las almendras del Fundo 11 presentan un mayor balance (más positivo), correspondiendo a 888 Kg N/ha/año. Además, los cultivos de maíz (648 Kg N/ha/año) del fundo 9, presentan también balances con valores altos.

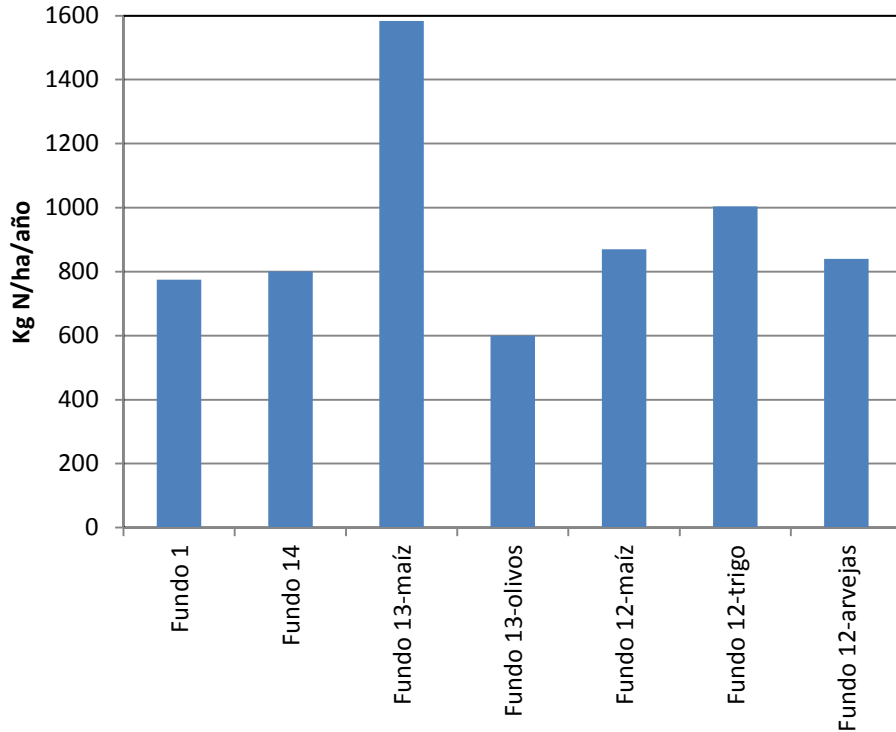


Figura N°5.9: Balance de nitrógeno para predios con aplicación de purines. Sector San Pedro – temporada 2008/09.

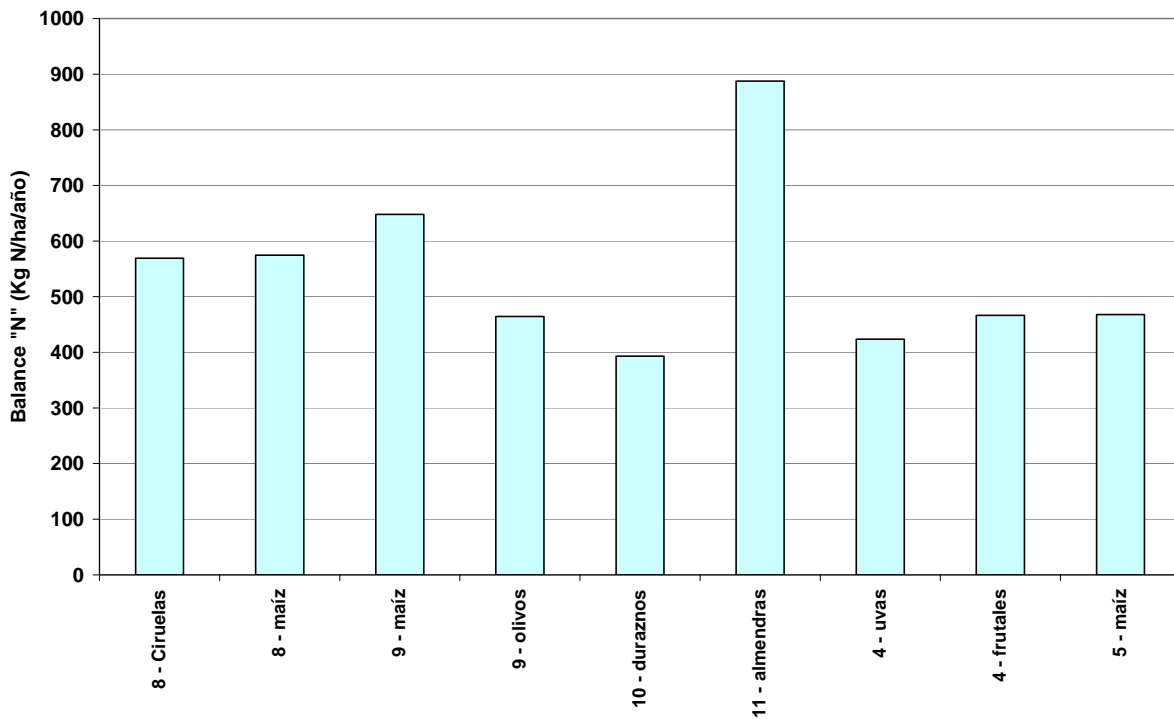
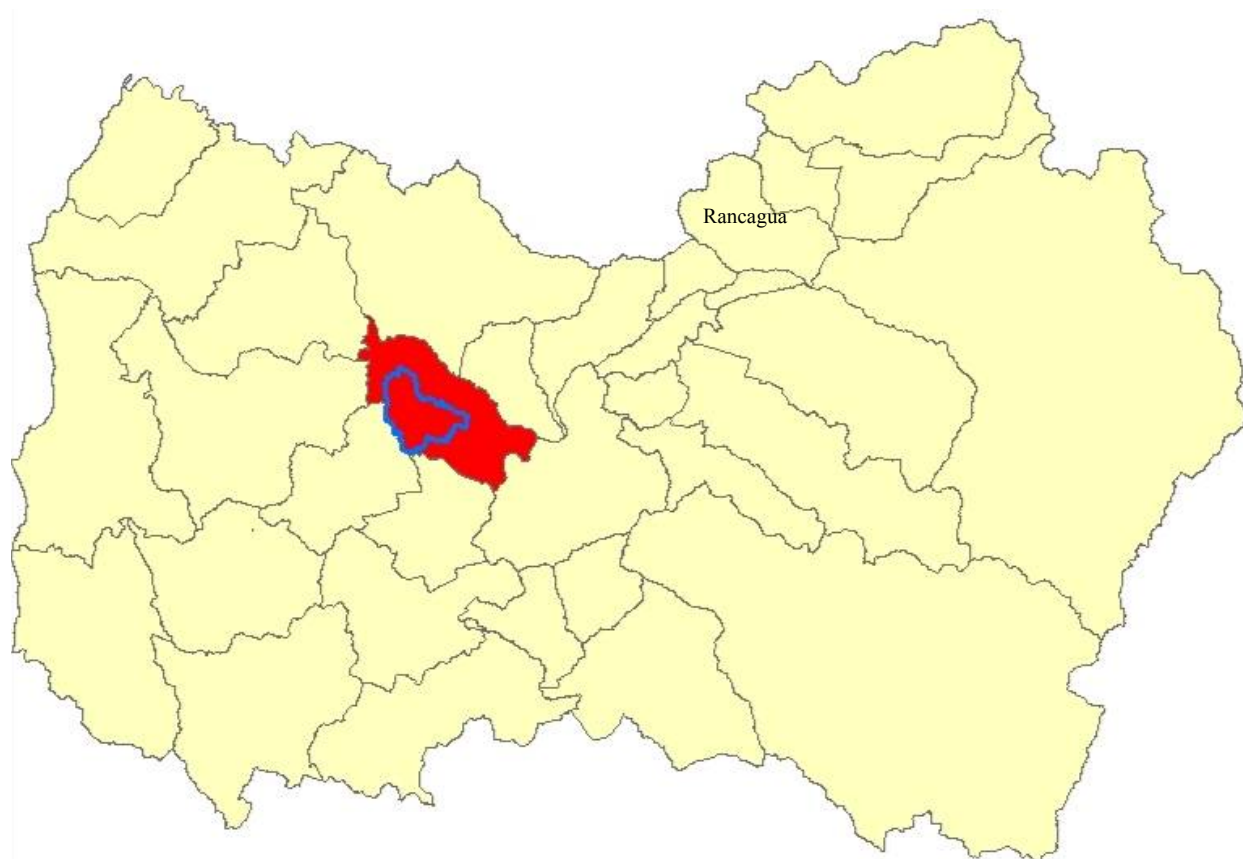


Figura N°5.10: Balance de nitrógeno en predios con aplicación de fertilizantes inorgánicos. Sector San Pedro - temporada 2008/09.

## 5.2 SECTOR PICHIDEGUA

El Sector Pichidegua se ubica en la Zona Central de Chile, comuna de Pichidegua, Región del General Libertador Bernardo O'Higgins, provincia del Cachapoal. Se sitúa al suroeste de Rancagua, en la el sector de la ribera este del río Tinguiririca en el sector previo a su desembocadura en el río Cachapoal en la zona del embalse Rapel (ver **Figura N°5.11**).



**Figura N°5.11:** Región del General Libertador Bernardo O'Higgins. Ubicación de comuna de Pichidegua (área color rojo) y sector de estudio (delimitado por línea color azul).

### 5.2.1 Identificación y Caracterización Química de las Fuentes Potenciales

El sector de Pichidegua se caracteriza por ser un área eminentemente agrícola, con presencia de la industria porcina. Los planteles de cerdos existentes producen purines, los cuales son aplicados en zonas de cultivos como mejoradores de suelo. La actividad agrícola de esta zona es de larga data, con aplicación de purines abarcando un período de por lo menos 15 años, alcanzando en los sectores más antiguos un período de aproximadamente 30 años. Luego, en este sector, las principales fuentes potenciales de nitratos corresponden a los fertilizantes nitrogenados y/o purines que se aplican en las zonas de cultivo. Se destaca que, en este sector, las aguas servidas domésticas corresponden a una fuente potencial de nitratos de carácter puntual, acotada a los sectores de asentamientos humanos. Asimismo, también existen áreas de cultivos con aplicación de guanos, pero estas aplicaciones son de menor magnitud que las asociadas a purines o fertilizantes sintéticos.

**a) Planteles de Cerdos**

En el sector Pichidegua existen 6 planteles los cuales se presentan en **Figura N°5.12**.

Los purines producidos en los 6 planteles del sector son aplicados directamente al suelo en las temporadas sin precipitaciones. En el período de lluvias (invierno), los purines son conducidos a tranques de almacenamiento. La capacidad de almacenamiento de estos tranques es limitada, por ello se baja el nivel de agua en los tranques durante los días sin lluvia, descargando purines al terreno. Los tranques han sido construidos sobre suelo compactado, con conductividad hidráulica menor a  $10^{-7}$  cm/s.

Las principales características físico-químicas de los purines de los planteles medidos en 2009 se presentan en **Tabla N°5.8**. Cabe destacar que, los datos obtenidos del muestreo del año 2009 son los utilizados en la evaluación del aporte de nitrógeno, del balance de nitrógeno, y en la definición del marco hidroquímico, realizadas en los siguientes capítulos del presente informe.

De la **Tabla N°5.8** se observa que la conductividad eléctrica de los purines es alta (entre 4.610 y 12.950  $\mu$ S/cm). Por otro lado, las concentraciones de oxígeno disuelto son muy bajas: 0,21 a 0,34 mg/L; lo cual es el resultado del consumo de oxígeno por bacterias en la descomposición aeróbica de la materia orgánica. Llama la atención el valor medido de oxígeno disuelto del agua de “Riego del Plantel 2”, el cual presenta 4,06 mg/L, el cual podría responder a un problema de muestreo.

El contenido de nitrógeno varía entre 935 y 2314 mg/L, en que el 40 a 60 % del nitrógeno es nitrógeno orgánico y el resto es nitrógeno amoniacal.

**Tabla N°5.8:** Principales características físico-químicas de los purines sector Pichidegua (2009).

Sector	MEDICIONES IN-SITU				PARÁMETROS QUÍMICOS			
	T° (°C)	CE ( $\mu$ S/cm)	pH	OD (mg/L)	Nitrógeno Amoniacal (mg/L)	Nitrógeno total (mg/L)	Nitrógeno de nitrato (mg N/L)	Fósforo (mg/L)
<b>Plantel 1</b>	21,3	9030	6,19	0,28	214	721	1,32	18
<b>Plantel 2</b>	20,5	4610	7,03	4,06	170	400	0,19	6,6
<b>Plantel 3</b>	22	11560	7,2	0,22	246	980	0,14	39
<b>Plantel 4</b>	23,9	9610	7,67	0,21	236	980	0,38	43
<b>Plantel 5</b>	21,6	12950	6,6	0,24	954	1360	0,23	60
<b>Plantel 6</b>	22,6	7270	7,28	0,34	398	570	0,16	10

Fuente: Mediciones in-situ realizados por GP Consultores y análisis químicos realizados por los laboratorios de ALS.



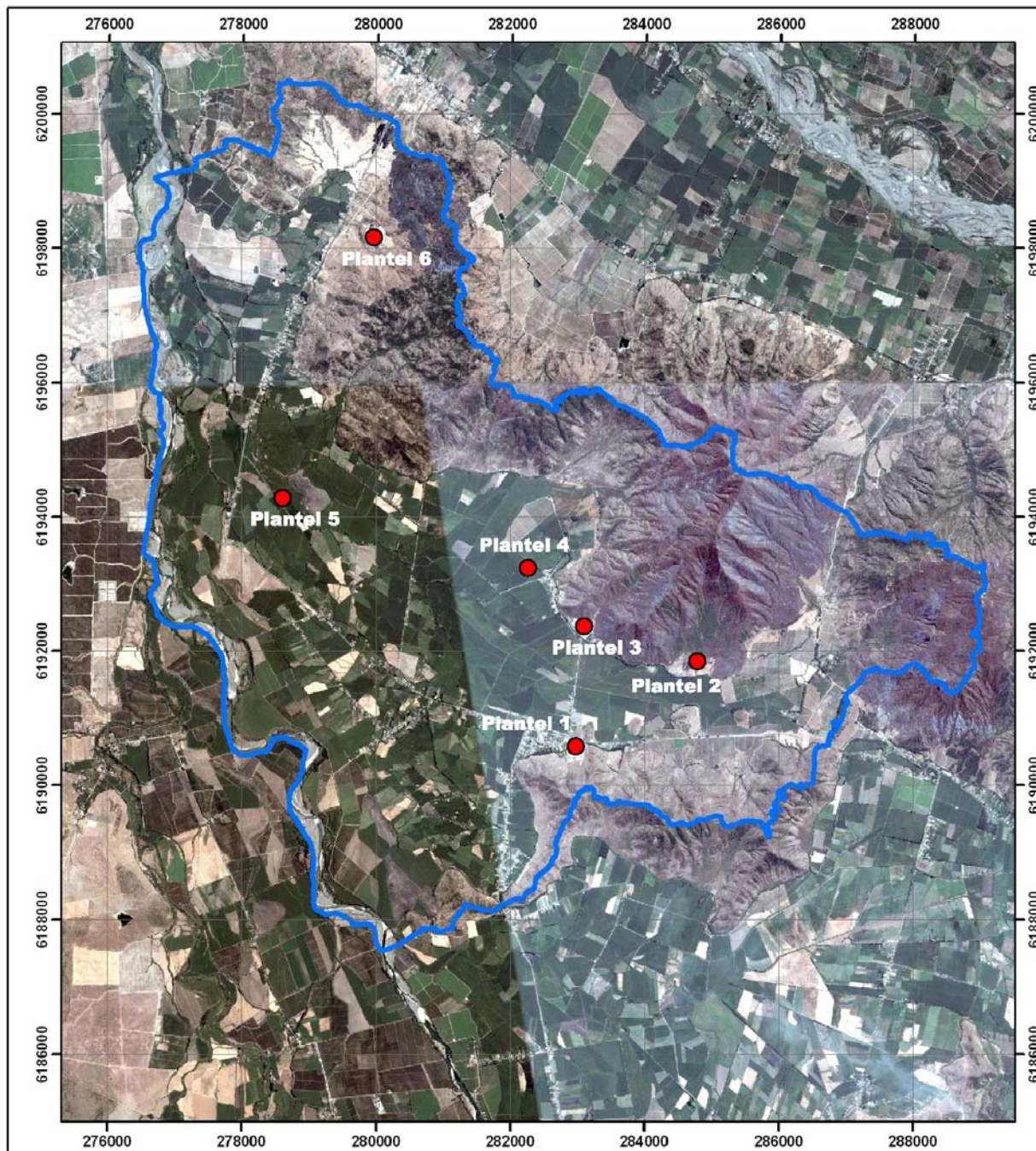


Figura N°5.12: Ubicación de Planteles de cerdos en sector Pichidegua (Región VI).

Respecto a los residuos sólidos generados por los planteles 1, 2 y 3, cabe destacar que, después de su separación de la fase líquida, los sólidos (o guanos) se transportan a un sector de acopio, el cual corresponde a una plataforma de cemento. Los guanos en terreno, se transportan por tractor y remolque, el cual es cubierto para evitar malos olores y pérdida de material. En cada viaje al acopio se registra la fecha y cantidad del material transportado.

Los guanos de los planteles 1 y 2 son almacenados por un período de tres días antes de ser distribuidos a cultivos. Por otra parte, en el mismo acopio se almacenan los guanos del plantel 3 por un período de 6 meses a 1 año. Durante ese tiempo, la materia orgánica de los guanos se ve afectada por procesos aeróbicos que la descomponen, transformándola a composiciones químicas más simples, disminuyendo olores y la proliferación de moscas.

Los guanos del plantel 1 son distribuidos en 113 há donde también se aplican purines (líquidos). Los guanos del plantel 2 son distribuidos en 23,7 há de kiwis, en un área que queda a fuera del sector del proyecto, correspondiente a 1.500 m<sup>3</sup>/mes y en 59,8 há de maíz a una tasa de 150,3 Kg N/há/año. Los guanos del plantel 3 son distribuidos en 100,9 há, área donde también se aplican purines.

Los planteles 4, 5 y 6 también incorporan sus guanos al suelo.

## **b) Cultivos**

Los cultivos y la consecuente aplicación de fertilizantes/purines corresponden a la principal fuente potencial de nitrógeno en el sector. Se caracteriza la zona de acuerdo a los siguientes puntos:

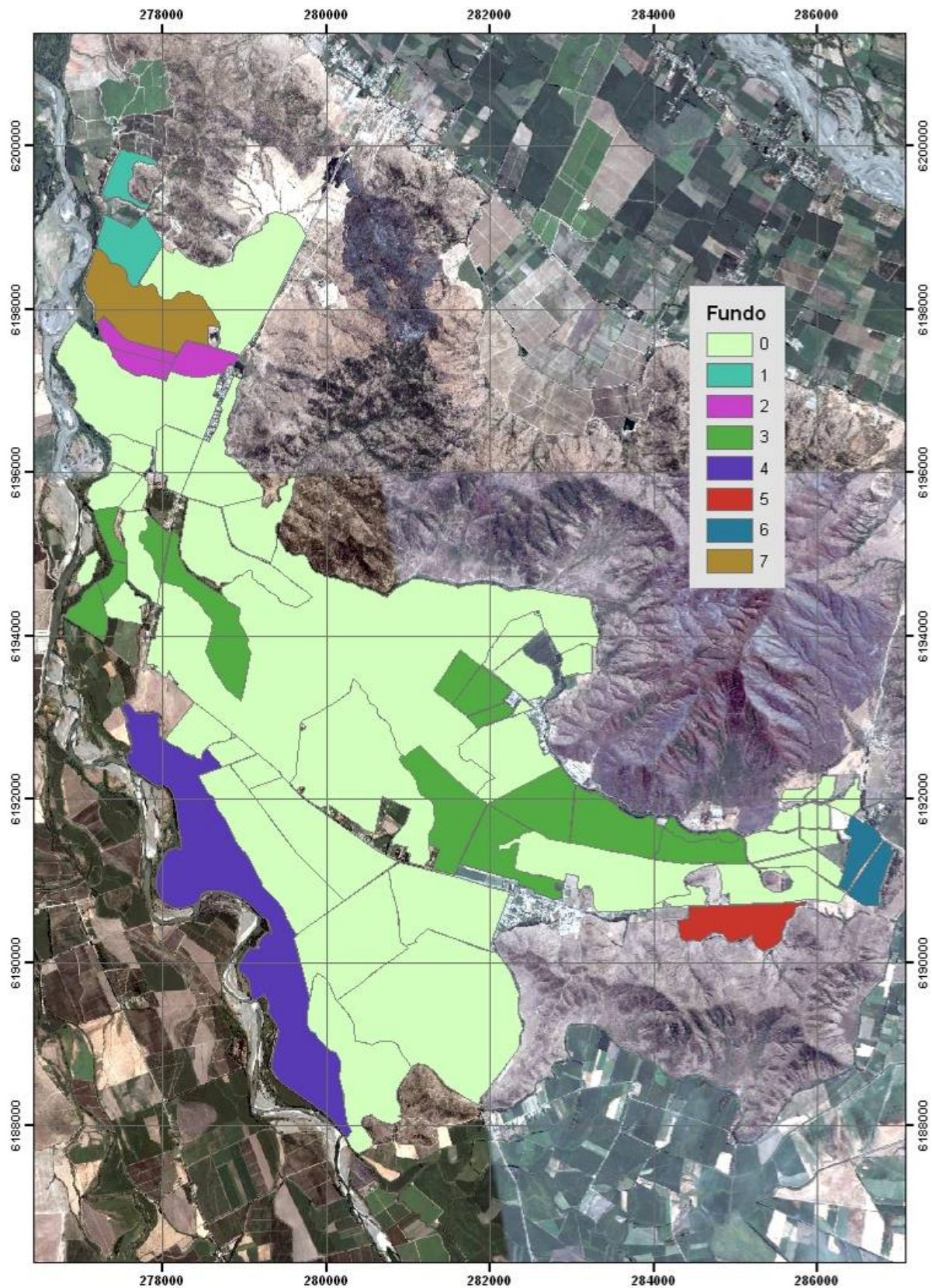
- ◆ Identificación de los tipos de fertilizantes aplicados.
- ◆ Caracterización química de los purines.
- ◆ Identificación y delimitación de las áreas de cultivos donde se aplican fertilizantes/purines.

A continuación, se presenta una caracterización del área del proyecto en términos de los cultivos y los sistemas de riego existentes. Las principales características identificadas en esta zona corresponden a las siguientes:

- ◆ Fundos/Predios (ver **Figura N°5.13**);
- ◆ Tipo de Fertilizantes Aplicados (ver **Figura N°5.14**).
- ◆ Sistema de Riego (ver **Figura N°5.15**).
- ◆ Áreas de Aplicación de Purines (ver **Figura N°5.16a** y **5.16b**);

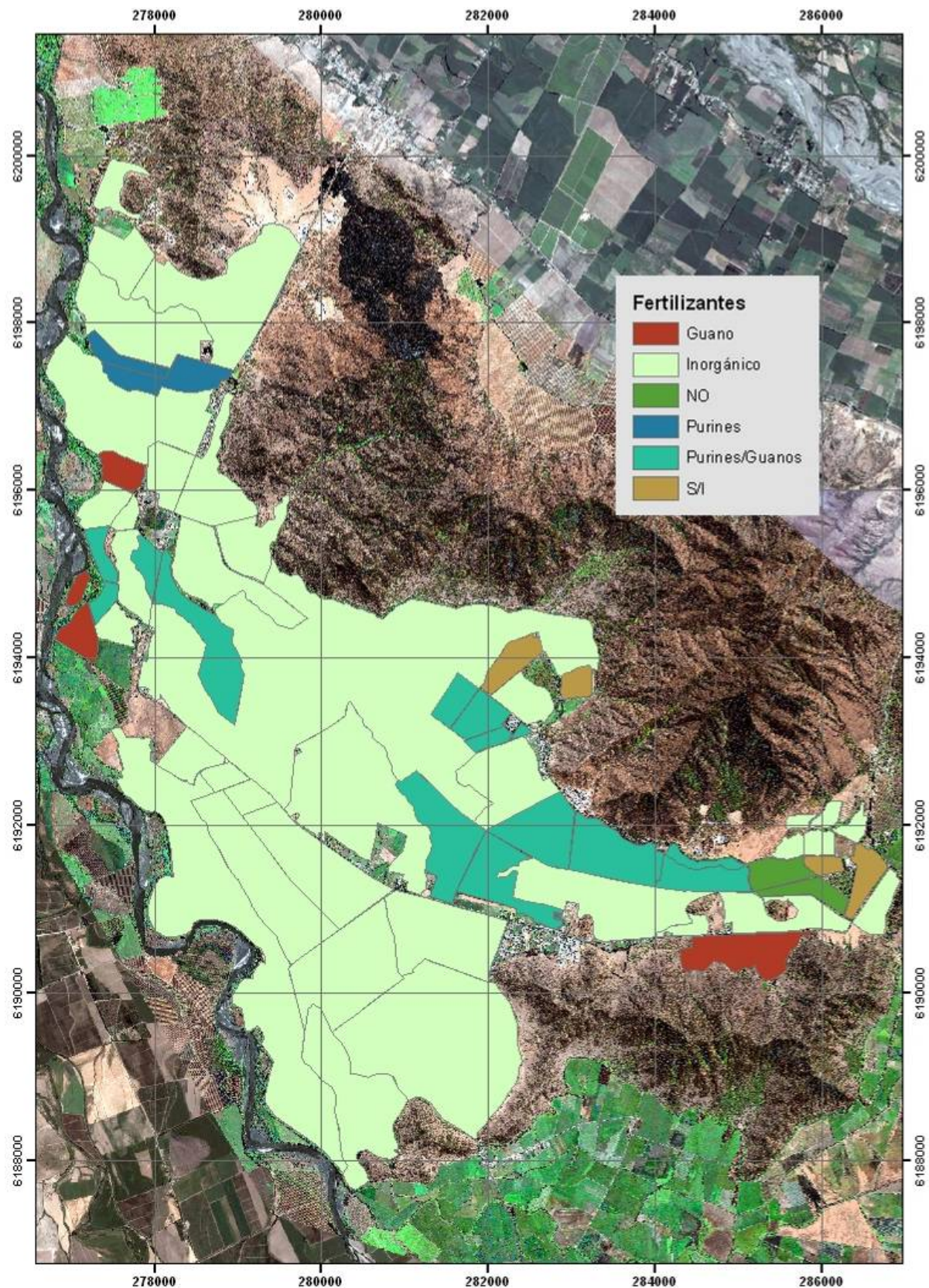
La totalidad de las mediciones de parámetros químicos efectuados en purines (parámetros: Boro Total, Calcio Total, Hierro Total, Potasio Total, Magnesio Total, Sodio Total, Estroncio Total, Zinc Total, Bicarbonatos, Carbonatos, Cloruros, Nitrógeno Amoniacal, Nitrógeno Total, Nitrógeno de Nitrato, Fósforo, Sulfatos y Carbono Orgánico Disuelto), se incluyen en **Anexo E**.





**Figura N°5.13:** Fundos/Predios existentes en sector Pichidegua y códigos internos de identificación (números correlativos) designados por GP.





**Figura N°5.14:** Tipos de fertilizantes utilizados en sector Pichidegua. “S/I” significa fundos que no proporcionaron información sobre la aplicación de fertilizantes. “NO” se refiere a los sectores sin aplicación de fertilizantes.



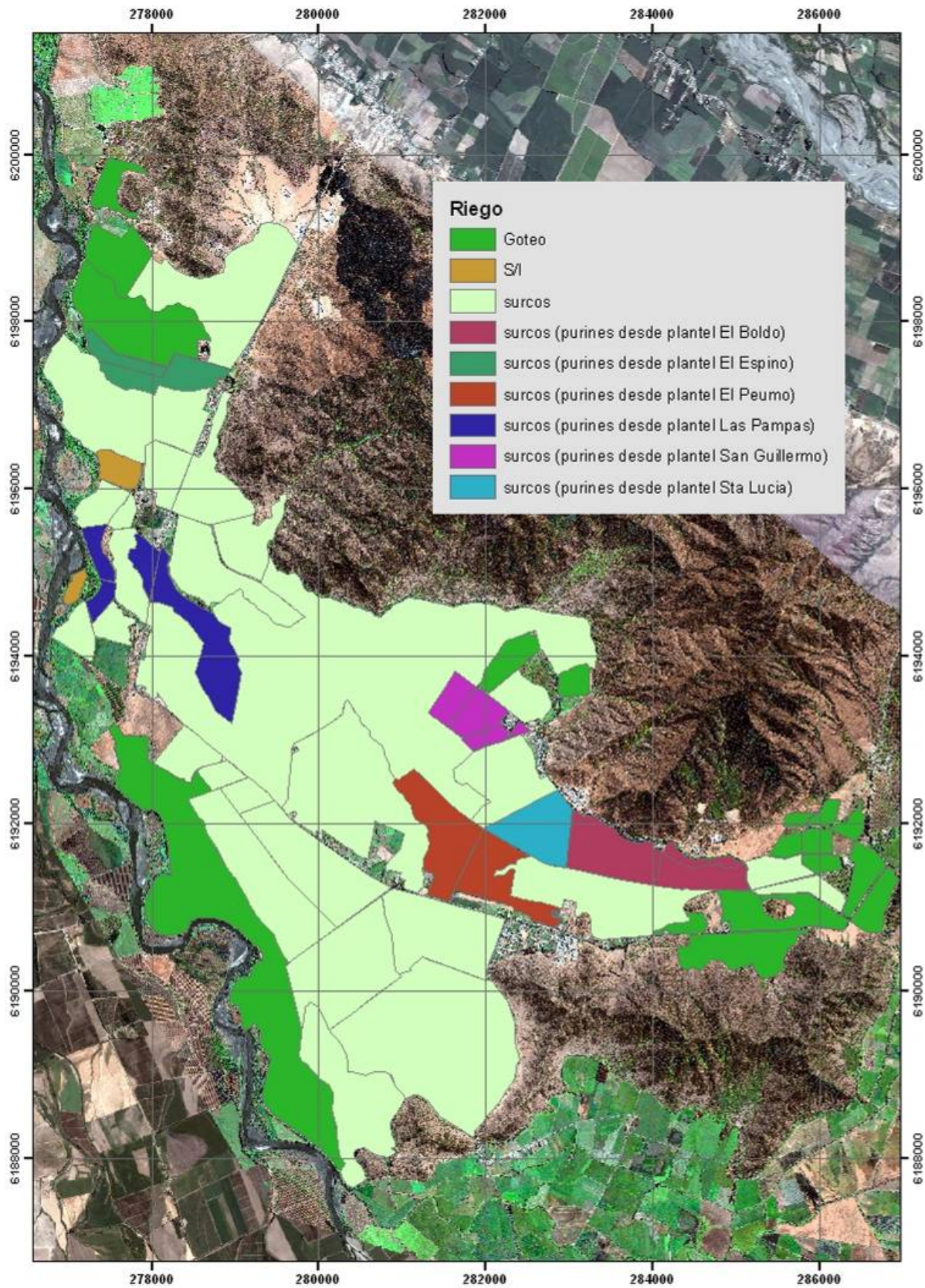
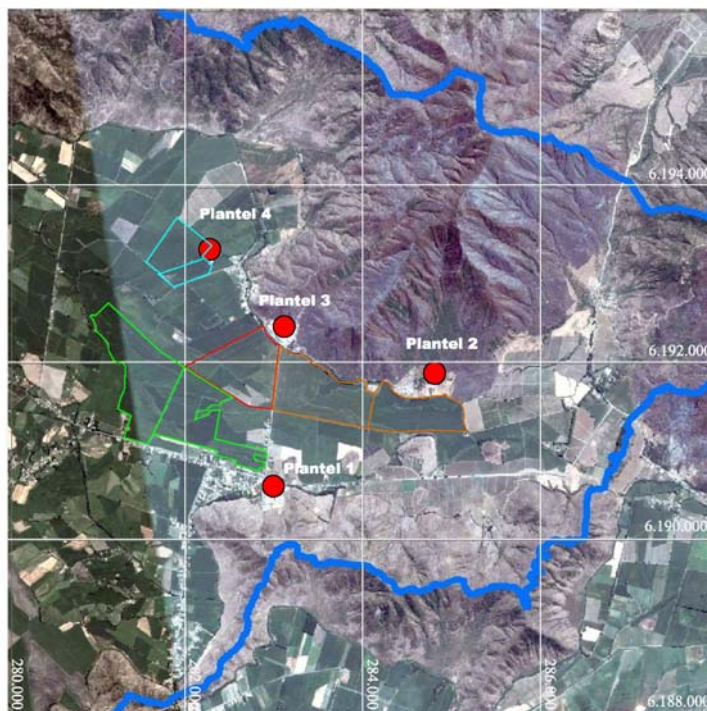
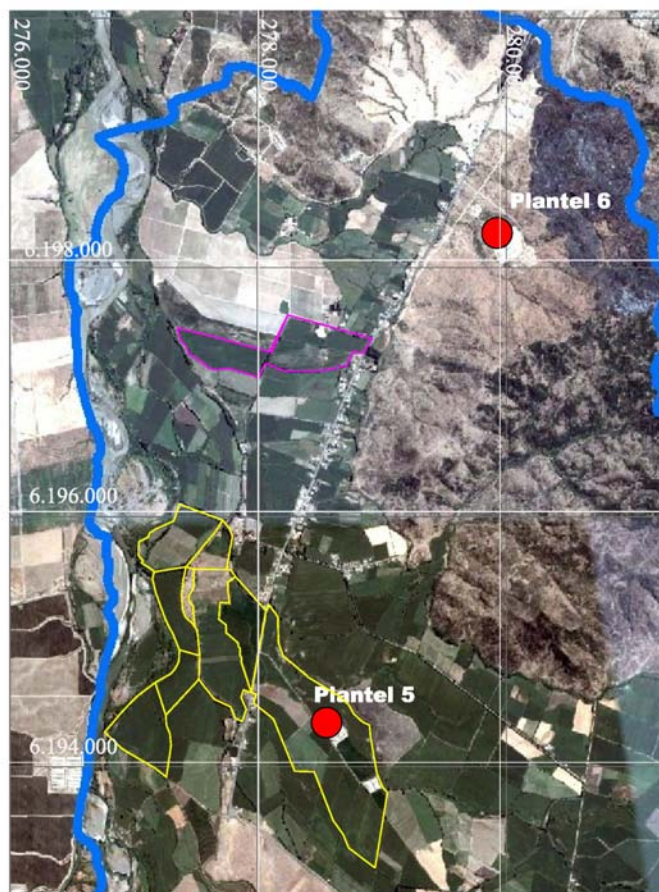


Figura N°5.15: Sistemas de riego en el sector Pichidegua. "S/I" significa fondos sin información.





**Figura N°5.16a:** Áreas de aplicación de purines desde Planteles 1 (verde), 2 (café), 3 (rojo) y 4 (celeste), Pichidegua.



**Figura N°5.16b:** Áreas de aplicación de purines desde Planteles 5 (amarillo) y 6 (magenta), Pichidegua.

## 5.2.2 Caracterización Isotópica de las Fuentes Potenciales

### a) Purines en Sector Pichidegua

Se analizan muestras de purines para  $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$ , con el objetivo de identificar su marca isotópica.

Los purines de los planteles del sector Pichidegua son aplicados desde tranques específicos a distintos terrenos superficiales. Por lo anterior, se colectaron muestras de cada tranque en un punto próximo desde donde los purines son bombeados para aplicarse al terreno, de manera de identificar la marca isotópica de amonio en cada uno. Se estima que el tiempo de residencia de los purines en los tranques en temporadas sin lluvia es corto, por lo que no se espera variaciones químicas e isotópicas relacionada al tiempo de residencia.

Las muestras específicas fueron obtenidas en las siguientes ubicaciones:

- Muestra 1 – Purín Plantel 1
- Muestra 2 – Purín Plantel 2
- Muestra 3 – Purín Plantel 3
- Muestra 4 – Purín Plantel 4
- Muestra 5 – Purín Plantel 5
- Muestra 6 – Purín Plantel 6

El análisis físico-químico de las muestras ha sido presentado en puntos anteriores. Los análisis isotópicos para los análisis de  $^{15}\text{N-NH}_4^+$  se presentan en la **Tabla N°5.9**.

**Tabla N°5.9:** Resultados análisis  $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$  en muestras de purines, sector Pichidegua.

Muestra	NH <sub>4</sub> (mg/L)	<sup>15</sup> N-NH <sub>4</sub>
Plantel 1	214	6,5
Plantel 2	170	4,4
Plantel 3	246	4,4
Plantel 4	236	5,4
Plantel 5	954	5,8
Plantel 6	398	4,1

Cabe destacar que, previo al envío de las muestras al laboratorio (Universidad de Waterloo, Canadá), se adecuó su pH en torno a 5 (con ácido clorhídrico), de manera de evitar la volatilización que pudiese cambiar la marca isotópica de la muestra. También se diluyó cada muestra (100 veces), de manera de evitar contaminación de los laboratorios isotópicos de la Universidad de Waterloo.

De acuerdo a lo presentado en la **Tabla N°5.9**, los valores de  $\delta^{15}\text{N-NH}_4^+$  en purines están en un rango entre 4,1 a 6,5 ‰. Estos valores se encuentran muy cerca de los valores que se espera en purines frescos, lo cual indica que el amoníaco (NH<sub>3</sub>) en las aguas de los purines no está siendo afectado por volatilización durante su almacenamiento antes de ser usados en riego.

## b) Fertilizantes

Otras posibles fuentes potenciales de nitrógeno identificadas, corresponden al uso de Fertilizantes inorgánicos nitrogenados (urea, nitrato de potasio, nitrato de amonio) de las marcas Soquimich, Vitra, y Anagra (ver **Tabla N°5.10**, la cual corresponde a una adaptación de la **Tabla N°5.6** presentada anteriormente). Estos fertilizantes representan los principales abonos utilizados en el sector.

La composición isotópica del nitrógeno de los fertilizantes difiere de la marca de los purines, aunque no considerablemente, lo cual sugiere una cierta limitación en la identificación de las fuentes de nitrógeno en las aguas subterráneas basado en la composición isotópica del nitrato

**Tabla N°5.10:** Los resultados de análisis de nitrógeno-15 de varios fertilizantes nitrogenados.

Tipo de Muestra	Marca/Fuente	$\delta^{15}\text{N}$
urea	Soquimich	-0,92
urea	Anagra	-0,24
urea	Vitra	0,24
mezcla N-P-K	Anagra	0,51
mezcla N-P-K	Vitra	0,25
nitrato de potasio	Vitra	2,98

## c) Otras Fuentes Potenciales:

Dado que los guanos de cerdo también son aplicados en terreno, se tomó una muestra del plantel 1, analizando  $^{15}\text{N}$ -N total, obteniéndose un valor de +6.14 ‰. Este valor ( $\delta^{15}\text{N}$ -N) es muy cercano a los purines y más enriquecido en  $^{15}\text{N}$  respecto a los fertilizantes.

Finalmente, la mineralización de suelo orgánico junto a aguas servidas domésticas son también fuentes potenciales de nitrógeno a las aguas subterráneas, aunque se espera que de menor importancia en estas zonas. Para la marca isotópica de estas fuentes, se consideran los valores reportados en la literatura especializada.

### 5.2.3 Evaluación de las Cargas de Nitrógeno en Sector Pichidegua

En esta sección se presenta un resumen de la determinación de las cargas de nitrógeno existente en el sector de Pichidegua, asociadas a los distintos tipos de fertilizantes existentes en el área (**Tabla N°5.11** y **Figura N°5.17**).

La metodología utilizada para calcular el aporte de las distintas fuentes es presentada en detalle en el **Anexo B**. Esta evaluación es efectuada considerando la magnitud de las aplicaciones de fertilizantes, su caracterización química (principalmente referida a la concentración de nitrógeno) y la extensión areal que abarcan las distintas aplicaciones.

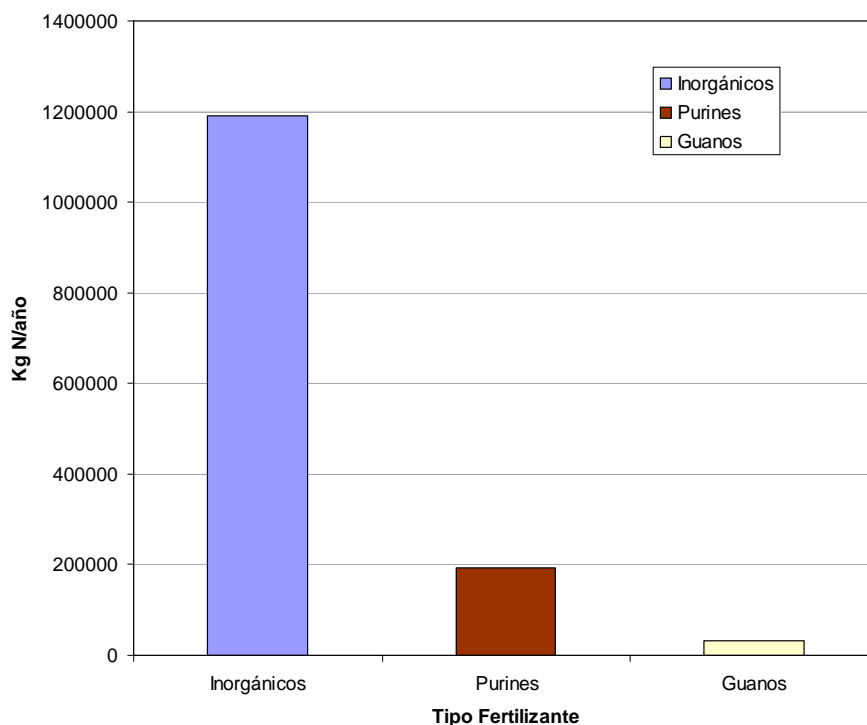
Los resultados indican que son los fertilizantes inorgánicos los que representan el mayor aporte de nitrógeno en este sector, seguido por la aplicación de purines. El aporte de Nitrógeno

asociado a los sólidos es muy inferior respecto de las otras fuentes existentes en la zona del proyecto.

**Tabla N°5.11:** Aporte de nitrógeno de varias fuentes aplicadas en sector Pichidegua – temporada 2008/09.

Tipo de Abono	Superficie [ha]	Kg N/año
Inorgánicos	2923.0	1191645
Purines	463.7	192377
Guanos	51.5	32767
Zonas Sin Aplicación	40.0	-
Zonas Sin Información (*)	119.0	Sin Información
<b>Total</b>	<b>3597.2</b>	<b>1416789</b>

(\*) No se contó con la colaboración y entrega de la información por parte de los dueños de los predios.



**Figura N°5.17:** Aporte de nitrógeno de variadas fuentes aplicadas en sector Pichidegua– temporada 2008/09.



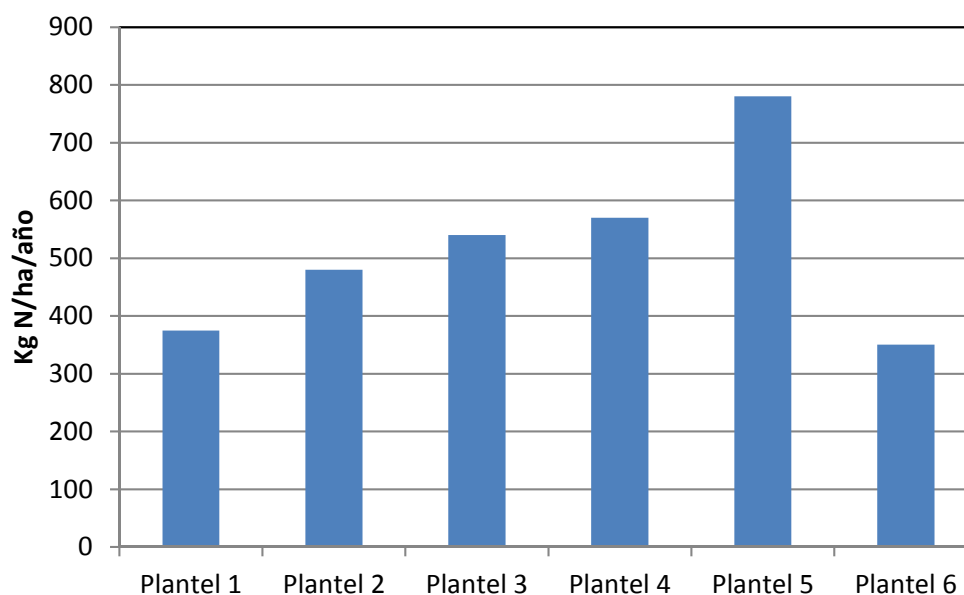
#### 5.2.4 Balances de Nitrógeno en Sector Pichidegua

La expresión (fórmula) básica utilizada para calcular el balance de nitrógeno (N) es la indicada en la ecuación (5.1).

##### a) Balances de Nitrógeno en Zonas con Aplicación de Purines

Los purines, producidos por los 6 planteles de la zona, son distribuidos en predios dedicados al cultivo de maíz, ubicados cerca de las plantas de tratamiento de cada plantel. A su vez, en estos mismos predios son aplicados tanto fertilizantes inorgánicos, como guanos. El balance de Nitrógeno considera los ingresos desde estas distintas fuentes de nitrógeno.

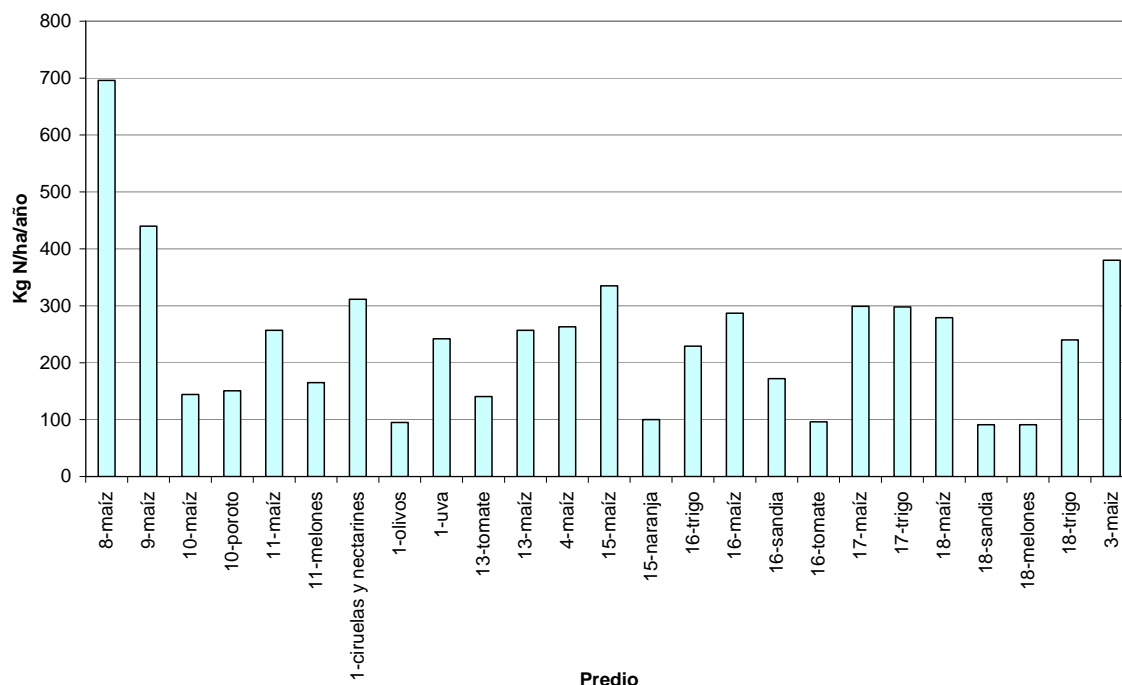
Los resultados de los balances de nitrógeno de los planteles entregan resultados bastante similares entre sí (300,0 – 600 Kg N/ha/año), a excepción del balance realizado en el plantel 5, con un valor de aproximadamente 800 Kg N/ha/año (**Figura N°5.18**). El detalle de la metodología del balance de nitrógeno y de los antecedentes empleados se presenta en el **Anexo B**.



**Figura N°5.18:** Balance de nitrógeno en predios con aplicación de purines, Sector Pichidegua – temporada 2008/09.

**b) Balance en Zonas con Aplicación de Fertilizantes Inorgánicos**

Los resultados del balance de nitrógeno, en las zonas de aplicación de fertilizantes inorgánicos (sin purines), se presenta en la **Figura N°5.19**, en tanto que, el detalle de los valores utilizados, se presenta en el **Anexo B**. Cabe destacar, que estas zonas no presentan aporte de nitrógeno por aplicación de purines.



**Figura N°5.19:** Balance de nitrógeno en los predios con aplicación de fertilizantes inorgánicos en Sector Pichidegua – temporada 2008/09.

**c) Balance en Zonas con Aplicación de Guanos**

En el sector de Pichidegua, se aplica guanos en los Fundos 5 y 20. Los resultados del balance se presenta en la **Tabla N°5.12**.

**Tabla N°5.12:** Balance de nitrógeno en predios con aplicación de guanos, Sector Pichidegua – temporada 2008/09.

Fundo	Balace (Kg N/há/año)	Área Aplicación (ha)	Balace Predio (Kg N/año)
5	230,7	32,5	7497,1
20	203,70	19,0	3870,3

## 6. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO, SECTOR SAN PEDRO

---

### 6.1 INTRODUCCIÓN

Se presenta la caracterización de la geología de superficie, la geología de subsuperficie y la hidrogeología del sector San Pedro. El detalle de esta caracterización, junto con la metodología empleada, se presenta en **Anexo D**.

La caracterización de la geología de superficie se realiza considerando el origen y los tipos tanto de las rocas como del relleno. Para ello se identifican unidades geológicas-geomorfológicas según la litología, estratigrafía y permeabilidad.

También se caracterizan los primeros metros de relleno (“suelo”) según la clasificación de CIREN CORFO, y se compara el origen de ellos (según las Series definidas por CIREN) con los ambientes de depositación geológica observados en el presente proyecto.

Asimismo, y considerando la estratigrafía de 23 sondajes perforados en San Pedro, se definen las diferentes unidades hidrogeológicas en subsuperficie, identificando cuáles de ellas son capaces de conformar acuíferos.

Además, dada la importancia de la dinámica de las aguas subterráneas en el comportamiento de los solutos en el medio poroso, se identifican las direcciones de flujo de las aguas subterráneas, los niveles freáticos y sus variaciones tanto espacial como temporalmente.

### 6.2 GEOMORFOLOGÍA DEL ÁREA

El sector San Pedro se ubica a unos 35 km. al sur de Melipilla, justo al norte del lago Rapel y se caracteriza por un relieve principalmente montañoso, conformado en medio de la Cordillera de la Costa. El sector piloto San Pedro se emplaza en la cabecera de la cuenca asociada al Estero Yali, donde numerosos afluentes le dan nacimiento. Corresponde a una cuenca exorreica que nace en la Cordillera de la Costa Oriental y desemboca al mar. Limita por el norte con la cuenca del Río Maipo y por el sur, con las cuencas del río Rapel y del estero Alhué.

La cuenca se encuentra delimitada por el norte por un cordón montañoso (**Figura N°6.1**), con alturas que varían entre los 400 y 950 m s.n.m., destacando el cerro Peñasquería (958 m s.n.m.). Hacia el Sur, el límite corresponde a una cadena montañoso con alturas superiores a los 400 m s.n.m. y hasta los 700 m s.n.m., entre ellos los cerros Tres Linderos (700 m s.n.m.) y Loma Alta

(500 m s.n.m.). Los bordes oriental y occidental del área del proyecto están limitados por cordones montañosos de distinta magnitud. La cadena del borde oriental alcanza hasta los 1.050 m s.n.m., destacando el cerro Roblerla (1.026 m s.n.m.) mientras que en su borde occidental, la cadena de cerros alcanza alturas de hasta los 450 m s.n.m. Esto indica, que la diferencia de altitud observada en ambos límites podría generar diferencias en la erosión fluvial, siendo el oriental más pronunciado y activo, mientras que la erosión del límite occidental ocurre de forma poco penetrante y más pasiva.

El estero Yali se origina por la junta de los esteros Lo Chacón (afluente por el este) y San Vicente (por el sur). El estero Lo Chacón recibe el aporte del estero Las Palmas, que proviene desde el NE, en donde pequeñas quebradas convergen y dan origen a éste. Entre éstas, destacan las quebradas, El Cobre, Honda y Los Maquis, todas con escurrimiento en sentido SE-NW.

El relleno del valle está conformado principalmente por arrastre de material aluvial-aluvional proveniente de la erosión de los cerros asociada a grandes precipitaciones en la zona. El tipo de material corresponde al “maicillo” producto de la alteración y meteorización de los granitos que conforman el basamento rocoso de San Pedro. En general, la energía y capacidad de transporte de la red de drenaje es baja, por lo cual la granulometría es del tipo arena grava fina, la cual se desarrolla principalmente en las cercanías de los faldeos de los cerros, disminuyendo su tamaño aguas abajo, hasta alcanzar el tamaño arcilla, distribuida principalmente, en el sector bajo del valle (junta de los esteros Lo Chacón y San Vicente) y en las juntas de esteros menores (**Figura N°6.1**).

Por lo anterior, es importante observar las redes de drenajes y los sentidos de aportes del material aluvial-aluvional, ya que en la junta de los esteros, se origina la interdigitación de sedimentos asociados a ambos aportes, en donde se tendrá la presencia de material grueso recibiendo aportes finos provenientes del estero que confluye. De acuerdo a esto, se pueden identificar los siguientes aportes asociados a las redes de drenaje más importantes:

- Estero Yali: Se origina a partir de la confluencia de los esteros Lo Chacón, por el este, y San Vicente, por el sur. Esta junta se presenta aguas arriba del cierre de la cuenca asociada al área del proyecto, presentando un sentido SSE-NNW. Se espera que en esta junta se concentre una mayor cantidad de material fino proveniente de los esteros que confluyen y que dan origen al estero Yali.
- Estero Lo Chacón: Este estero se origina por el drenaje asociado a pequeñas quebradas distribuidas en las laderas de los cerros Roberla (ladera sur) y Tres Linderos (ladera norte); El valle, conformado por estas laderas de cerros es principalmente encajonado y presenta un sentido de aporte E-W. Al salir de este valle, cambia su dirección hacia el NW hasta la junta con el estero Las Palmas, el cual proviene desde el NE. En la junta, en donde el valle es más amplio, cambia de dirección hacia el SW, en donde el flujo principal se concentra hacia el sector norte del valle. Continúa aguas abajo hasta que se une con el estero San Vicente que proviene desde el SE, conformando el estero Yali que presenta dirección hacia el NW.
- Estero Las Palmas: Este estero nace del aporte de dos cuencas pequeñas, que en el sector del valle se encuentran separadas por una puntilla. En la primera destaca la quebrada Yegua

Overa con sentido NE-SW y en la segunda, se presentan las quebradas El Cobre y Honda, ambas con dirección SE-NW. Aguas abajo de la puntilla se produce la junta de estas quebradas, en donde además, se suma la quebrada Los Maquis, conformando el estero Las Palmas.

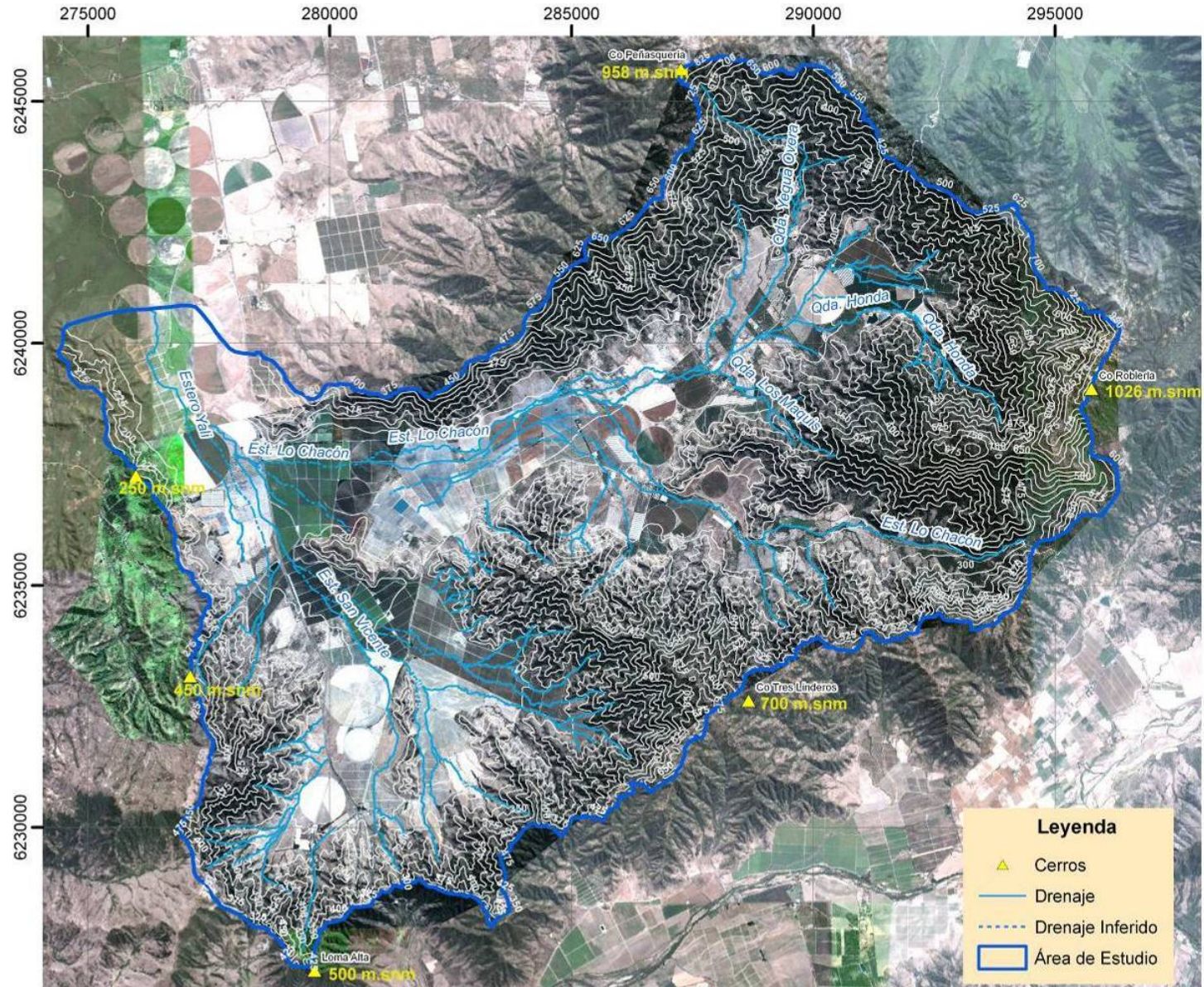
- Esteros San Vicente: Este estero está asociado al drenaje de pequeñas quebradas, todas con sentido de aporte hacia el NW.

Hacia el faldeo de los cerros se observa material más grueso y mal seleccionado correspondiente a material de origen coluvial transportado por gravedad.

Cabe señalar que, en el área del proyecto, no se observan terrazas asociadas a los drenajes principales, esteros San Vicente y Lo Chacón. En general, el valle corresponde a una extensa planicie aluvial-aluvional.

Actualmente, en estas planicies se concentra la actividad agrícola en donde se emplazan grandes zonas de cultivos. Se observa que éstas son cortadas por una serie de drenajes intermitentes originados por una lluvia intensa; asimismo, algunos de estos drenajes son canalizados conformando redes de regadío. En estos drenajes se desarrollan arenas y gravas finas con escasa presencia de material fino.





**Figura N°6.1:** Imagen satelital del sector piloto San Pedro, con la indicación de drenaje y cotas más importantes el sector (Google Earth, 2007 y QuickBird).

## **6.3 GEOLOGÍA DE SUPERFICIE**

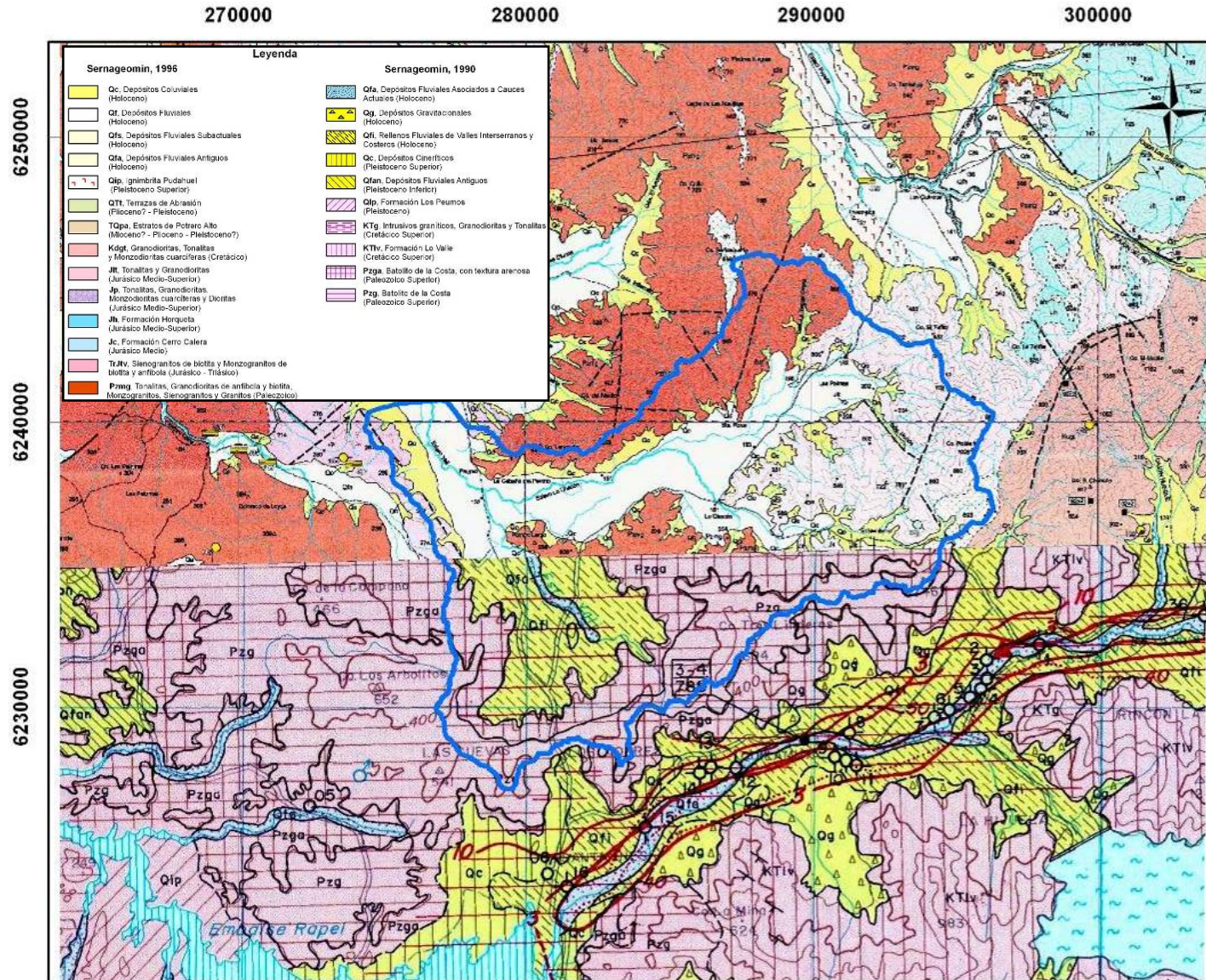
### **6.3.1 Marco Geológico**

El sector piloto de San Pedro se encuentra en la Zona Central de Chile, lugar caracterizado por tres unidades morfoestructurales mayores de rumbo ~ N-S. De Oeste a Este, éstas son: (1) la Cordillera de la Costa, que consiste en una cadena montañosa con altitudes que varían entre los 1.000 y 2.000 m; (2) la Depresión Central, que corresponde a un nivel tectónico deprimido que actúa como una cuenca de sedimentación y (3) la Cordillera de los Andes que corresponde al arco volcánico actual, con alturas desde los 2.000 a casi 7.000 m. Cada uno refleja episodios geológicos propios de un margen continental activo, en un contexto de subducción.

El área del proyecto se encuentra inmediatamente al sur de la zona de subducción de la dorsal oceánica Juan Fernández, la que se localiza frente a las costas de Valparaíso (33° S aprox.) y que constituye el límite sur de una zona de subducción plana. Este límite implica un cambio geotectónico importante en donde al sur de éste, el margen continental se caracteriza por la presencia de volcanes activos, expuestos en la Cordillera de los Andes y de una depresión central, a diferencia de lo que ocurre al norte de este límite.

La región de Chile Central registra una evolución que va desde el Paleozoico Superior al Presente (**Figura N°6.2**). El desarrollo de un arco volcánico durante el carbonífero-pérmico permitió la intrusión del batolito y constituye las rocas más antiguas de la Cordillera de la Costa (Pzmg, Sernageomin, 1996; Pzga, Pzg, Sernageomin, 1990). Durante el Triásico y Jurásico Inferior hubo un régimen extensional asociado a un estado pasivo del margen continental. Esto permitió el desarrollo de cuencas de intraarco con aporte sedimentario marino y continental (Jc, Sernageomin, 1996), acompañado por una actividad volcánica predominantemente ácida (Jh, Sernageomin, 1996) y plutonismo bimodal (Tr, Jtv, Jp, Jlt, Sernageomin, 1996). El comienzo del ciclo andino fue producto de la activación del sistema de subducción y ocurrió durante el Jurásico Inferior, manteniéndose activo durante el Cretácico (Kdgt, Sernageomin, 1996; Ktlv, KTg, Sernageomin, 1990) y Cenozoico. Esto trae consigo la presencia de arcos magmáticos que migran hacia el oriente, asociados a diferentes estreses tectónicos a lo largo del margen continental, junto con el desarrollo de cuencas de trasarco y de antepaís. En este contexto, la Cordillera de la Costa representa el arco magmático desarrollado durante el Paleozoico y el Jurásico-Cretácico Inferior en donde se emplaza el sector piloto, mientras que el arco Cenozoico corresponde a la Cordillera de los Andes (**Figura N°6.2**).





**Figura N°6.2:** Mapa Geológico del área de San Antonio – Melipilla (Sernageomin, 1996), escala 1:100.000 y Carta Hidrogeológica de Chile N°1, Hoja Rancagua (Sernageomin, 1990), escala 1:250.000. El Sector San Pedro es delimitado con una línea azul continua.

A lo largo del margen occidental, en la Cordillera de la Costa (fuera del área del proyecto) se disponen discordantemente, sobre los complejos intrusivos del Paleozoico, secuencias sedimentarias de ambiente marino (e.g. Formación Navidad). Las formaciones marinas se constituyeron debido a un evento tectónico extensional durante el Mioceno – Plioceno Inferior, para posteriormente volver al régimen de comprensión durante el Plioceno Superior o Pleistoceno Inferior (Qlp, Sernageomin, 1990). Hacia el este de la línea de costa, depósitos continentales de tipo fluvial, aluvial y lacustre (TQpa, Sernageomin 1996) engranan con las formaciones marinas del oeste. Finalmente los depósitos cuaternarios, incluyen sedimentos fluviales (Qfa, Qfs, Qf, Sernageomin, 1996; Qfan, Qfi, Qfa, Sernageomin, 1990), coluviales (Qc, Sernageomin, 1996; Qg, Sernageomin, 1990) y de remoción en masa, abanicos aluviales, sedimentos lagunares o lacustres, playas, terrazas de abrasión marina (QTt, Sernageomin, 1996) y depósitos piroclásticos (Ignimbrita Pudahuel, Qip, Sernageomin 1996; Qc, Sernageomin, 1990) que rellenan gran parte del sector.

### **Geología Local**

En el sector piloto de San Pedro, el Basamento (**Pzj**) está constituido principalmente por rocas intrusivas indiferenciadas cuyas edades abarcan desde el Paleozoico Superior hasta el Jurásico. Las rocas corresponden principalmente a tonalitas, granodioritas y granitos definidas como *Pzmg*, *Jp*, *Jl* (Sernageomin, 1996) y *Pzg*, *Pzga* (Sernageomin, 1990). Constituyen las cadenas montañosas del área, cuyas alturas alcanzan, en ocasiones, más de 1.000 m s.n.m.

El Basamento, corresponde a unidades de rocas bien compactas e impermeables, con bajo a nulo potencial hidrogeológico.

### **Depósitos Cuaternarios No Consolidados**

En el sector San Pedro, estos depósitos se distribuyen en los sectores topográficamente menos elevados. Son sedimentos que se han depositado desde el Pleistoceno hasta la actualidad, cuya composición es fundamentalmente la del basamento, en donde por procesos exógenos, éste se denuda para que luego sus fragmentos sean transportados ya sea por el agua o bien por gravedad, conformando el relleno principal del valle. Estos depósitos corresponden a los fluvio-aluviales-aluviales, fluviales actuales y coluviales (ver **Figura N°6.3**).

**Depósitos Fluvio-Aluviales-Aluviales (Qal)**: Corresponden a material arenoso principalmente asociado a derrames aluviales producto del degradado del ambiente granítico, determinando la naturaleza, en términos granulométricos y composicionales. El tipo de material corresponde al “maicillo” producto de la alteración y meteorización de los granitos que conforman el basamento rocoso de San Pedro. En general, sus cabeceras están constituidos por depósitos de muy mala selección, incluyendo bloques y rodados, de extensión y espesor irregular. Hacia la parte distal de estos derrames gradan a granulometrías más finas, y en la parte baja del valle, se producen interdigitaciones entre los aportes aluviales asociados a los esteros principales. En el área del proyecto destacan los derrames aluviales asociados a los esteros Lo Chacón y San Vicente, en cuya junta se tendría la acumulación de material más fino. Dada la presencia de material fino estos depósitos se consideran con una permeabilidad media a baja.



**Depósitos Coluviales (Qc):** Sedimentos no consolidados, ubicados en las cabeceras de las quebradas y/o faldeos de los cerros. Comprenden principalmente depósitos gravitacionales correspondientes a flujos en masa, que pueden incluir desde bloques hasta arcillas, interdigitados con lentes de arenas y gravas generados por pequeños cursos de agua, permanentes o esporádicos. Estos depósitos presentan una alta permeabilidad, si bien no constituyen acuíferos conforman zonas de recarga al sistema subterráneo.

**Depósitos Fluviales Actuales (Qf):** Corresponde a una secuencia de arenas, gravillas, gravas arenosas, gravas, limos y arcillas, que se disponen en capas y lentes de espesores que varían lateralmente engranando con capas de diferente granulometría asociados a los esteros principales del valle. Los cursos de agua en el valle experimentan grandes crecidas de invierno asociados a la temporada pluvial. En general, los esteros en el valle son en su mayoría, estrechos, provistos de llanuras aluvionales regulares, donde los cursos actuales tienen muy poca profundización. En el área del proyecto, destacan los cursos asociados a los esteros Lo Chacón, Las Palmas y San Vicente. Estos cauces se consideran que presentan una alta permeabilidad.

Cabe señalar que estos cauces son generalmente canalizados para ser utilizados en riego, sin embargo y mediante fotointerpretación, es posible inferir los cauces naturales, lo cual se ha incluido en el mapa hidrogeológico (**Figura N°6.3**).

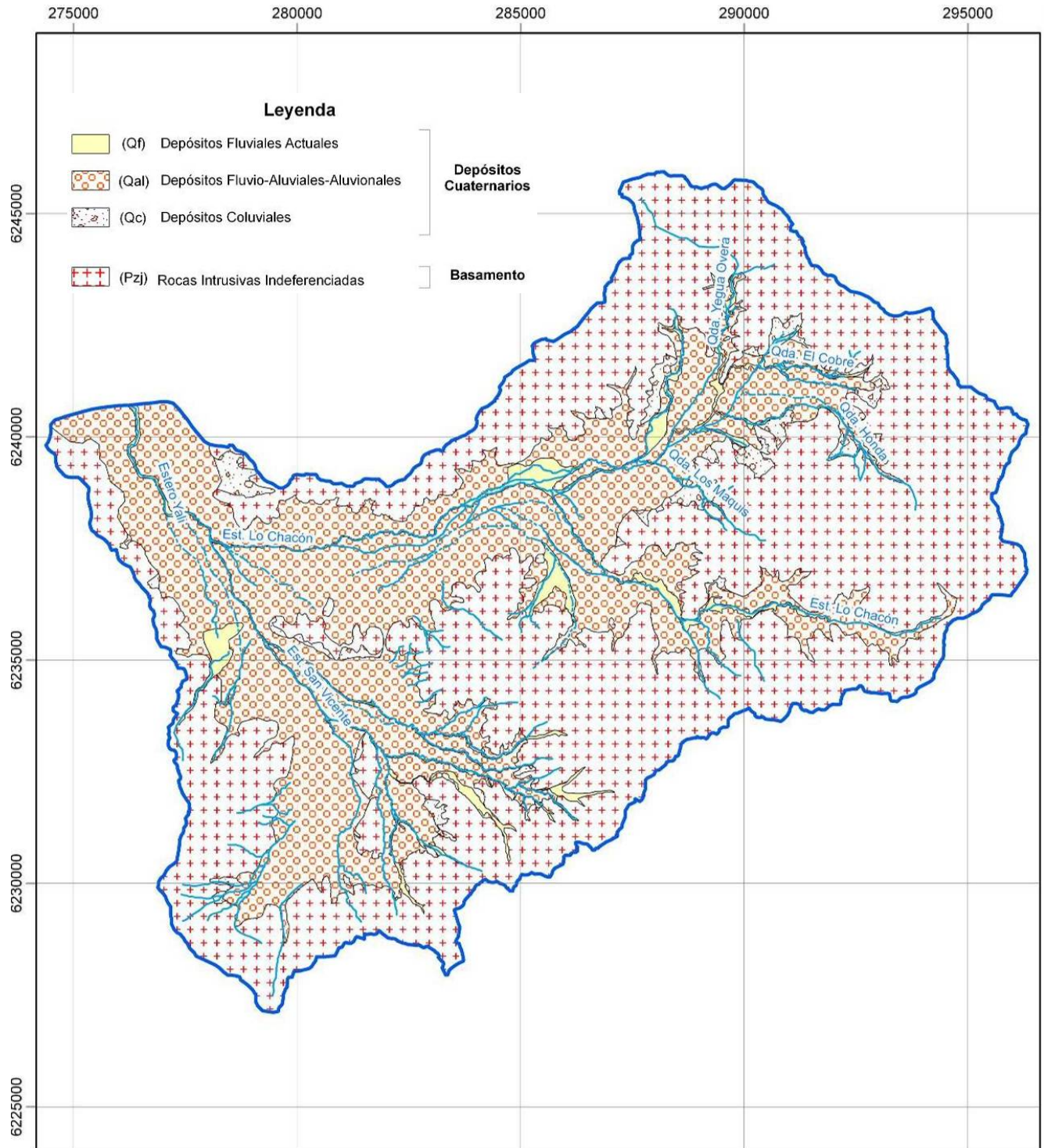
### **Geología Estructural**

El sector del proyecto se encuentra al sur de la Anomalía Melipilla, una transición geológica en el valle del río Maipo. Esta anomalía responde a la presencia de un cuerpo tabular no magnético, dispuesto en forma subhorizontal en niveles intermedios de la corteza superior (~4-6 km), e inmerso en un batolito presumiblemente jurásico y fuertemente magnético (Yáñez et al., 1998). Este pilar en compresión, o bloque rígido, habría constituido una barrera natural para la deformación tectónica observada en los granitoides jurásicos al norte del río Maipo. En este contexto, el cuerpo tabular no magnetizado que genera a la Anomalía Melipilla, se ha interpretado como la zona de despegue que permite acomodar la deformación contra el bloque rígido dispuesto en dirección sur.

El patrón estructural al sur de la Anomalía Melipilla, es diferente al norte, predominando estructuras NNW, NNE. Es así como al sur del río Maipo aflora la secuencia estratificada jurásico-mesozoica dispuesta en contacto depositacional sobre granito paleozoico; mientras que inmediatamente al norte, se exponen bloques de granitos paleozoicos incluidos en intrusivos jurásicos y cretácicos

La tectónica del sector, pertenece al dominio estructural oriental, definido por Sernageomin, 1996. Está formado por rocas intrusivas del batolito paleozoico, cretácico y en parte jurásico, y por secuencias volcano-sedimentarias del Jurásico al Cretácico Inferior, que constituyen un bloque monoclinial de rumbo NNE - NNW, cuyos estratos alcanzan una inclinación promedio de 40°E y localmente 70°E debido a flexuras y pliegues asociados a fallas o bordes de intrusivos. Las estructuras principales consisten en fallas NNE – NW y NS con pequeños desplazamientos de rumbo. Movimientos tectónicos, posiblemente post-pliocénicos, se manifiestan en inversiones hacia el este de la red de drenaje.





**Figura N°6.3:** Mapa Hidrogeológico del Sector San Pedro.

### **6.3.2 Unidades Geológicas, Suelos y Sectores de Cultivos**

#### **a) Sectores de Cultivos y Unidades Geológicas**

En el valle se encuentran numerosos cultivos con técnicas de riego que utilizan diversos tipos de abonos, entre ellos: fertilizantes inorgánicos, purines de cerdo, mezcla de purines y guano de cerdos, los cuales pudiesen constituir una fuente importante de nitratos al subsuelo. Por lo anterior, se ha contrastado la información de los cultivos que usan este tipo de abono con las unidades geológicas de superficie.

En las **Figuras N°6.4(a) y 6.4(b)**, se muestra la ubicación de los cultivos que utilizan técnicas de abono de fertilizantes inorgánicos (áreas identificadas con la letra I) y purines (áreas identificadas con la letra P) sobre el mapa hidrogeológico.

Entonces, considerando la geología local y geomorfología del área del proyecto, se observa que:

- Hacia el sector de cabeceras del estero Las Palmas, en la subcuenca asociada a las quebradas El Cobre y Honda se desarrolla una llanura aluvial-aluvional en donde se disponen los cultivos P12, P13, P14, P16, P17 y P18 que utilizan como fertilizantes los purines y un sistema de riego por goteo. Se espera que estos terrenos presenten una permeabilidad media a alta, ya que se disponen en las cercanías de los faldeos de los cerros, en donde, la granulometría es gruesa (tipo arena y grava fina con escasa presencia de finos). Además, estos cultivos son disectados por los cauces superficiales de dichas quebradas, en donde la permeabilidad pudiese ser mayor.
- Hacia el sector de cabecera del estero Las Palmas, entre las quebradas Honda y Yegua Overa, se ubica el cultivo P15 que utiliza como fertilizante los purines y un sistema por pivote para el regadío. Se dispone sobre una llanura aluvial-aluvional, en una zona de interfluvios asociada a estas dos quebradas. Este sector se caracteriza por la acumulación de sedimentos finos como arenas, limos y arcillas, con bajo contenido de sedimentos gruesos, por lo cual se espera una permeabilidad media-baja para esta zona.
- Aguas abajo, en la llanura aluvial-aluvional desarrollada entre los esteros Las Palmas y Lo Chacón, se disponen los cultivos P6, P7, P8, P9 y P10 que utilizan como fertilizantes los purines y un sistema de riego por goteo. En este terreno se espera una permeabilidad media a baja, ya que se ubica en un sector de interfluvios, es decir en una zona de inundación asociada a dos esteros (Las Palmas y Lo Chacón), en donde el estero Las Palmas aportaría material más fino al confluir a Lo Chacón. Por esta razón, se espera una acumulación de sedimentos más finos (arenas, limos y arcillas) que predominan por sobre los fragmentos más gruesos, éstos últimos aportados por el estero Lo Chacón. Por otra parte, los cultivos P6 y P10 son disectados por los cauces principales asociados a Lo Chacón y Las Palmas, respectivamente, por lo cual se espera que la permeabilidad sea mayor en esos sectores.



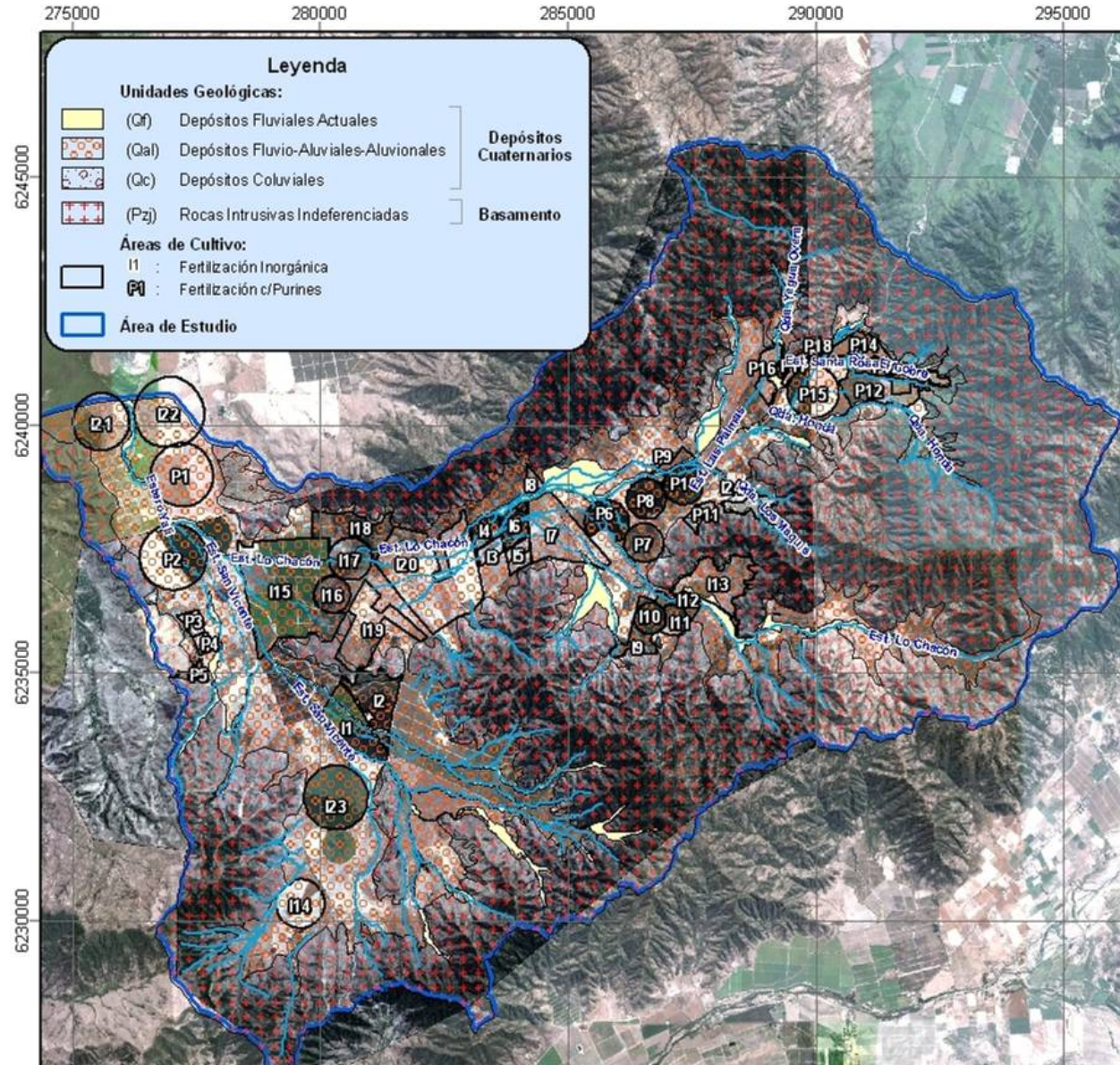


Figura N°6.4(a): Unidades Geológicas de Superficie y Fertilizantes.



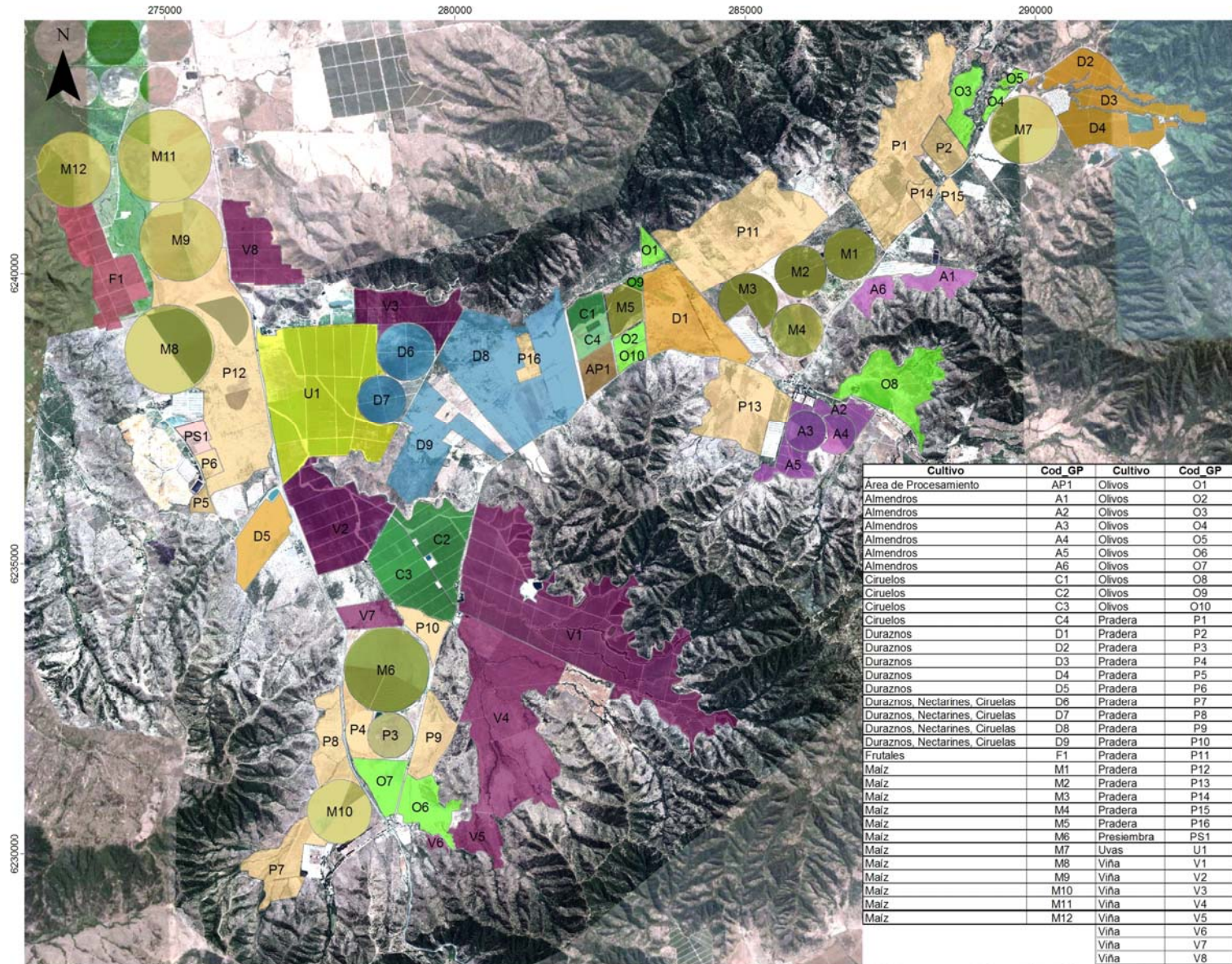


Figura N°6.4(b): Tipos de Cultivos.

- ◆ Hacia el sector de la quebrada Los Maquis, en donde se desarrollan los depósitos coluviales, se dispone el cultivo P11, que utiliza como fertilizante los purines y un sistema de riego por goteo. Estos depósitos se caracterizan por su alta permeabilidad y constituyen sectores de recarga al sistema acuífero.
- ◆ Hacia el sector del estero Lo Chacón, donde cambia de dirección desde EW a NW, se ubican los cultivos I9, I10, I11, I12 e I13 que utilizan fertilizantes inorgánicos y un sistema de regadío por goteo (I9, I12, I13) y pivote (I10, I11), respectivamente. Estos cultivos se disponen sobre una llanura aluvial-aluvional asociada a los aportes provenientes del estero Lo Chacón, cuya permeabilidad es media a baja.
- ◆ Aguas abajo de la confluencia del Estero Las Palmas con el estero Lo Chacón, se ubican los cultivos I3, I4, I5, I6, I7, I8, I15, I16, I17, I18, I19 e I20 que utilizan fertilizantes inorgánicos y un sistema de regadío por goteo. Se disponen sobre depósitos aluvial-aluvionales, los cuales se encuentran disectados por los cauces principales asociados a los esteros Lo Chacón y Las Palmas. En este sector, se desarrollarían sedimentos de granulometrías finas provenientes del estero Las Palmas, que se interdigitan con lentes de arenas y gravas producto del acarreo del estero Lo Chacón. Debido a esto, la permeabilidad de estos terrenos sería media a baja.
- ◆ Hacia el sector de cabeceras del estero San Vicente se desarrolla una llanura aluvial-aluvional en donde se disponen los cultivos I14 e I23 que utilizan como fertilizantes inorgánicos y un sistema de riego por pivote. Se espera que estos terrenos presenten una permeabilidad media a alta, ya que se disponen en las cercanías de los faldeos de los cerros, en donde, la granulometría es gruesa.
- ◆ Siguiendo por el estero San Vicente (zona media) se ubican los cultivos I1 e I2 que utilizan fertilizantes inorgánicos y un sistema de regadío por goteo. Estos cultivos se disponen principalmente sobre una llanura aluvial-aluvional, disectado por drenajes que alimentan al estero en cuestión. Esta zona presentaría una permeabilidad media a baja. Cabe señalar, que parte del cultivo I2 (sección norte) se ubica sobre los depósitos coluviales, caracterizado por presentar una alta permeabilidad y constituir sectores de recarga al sistema acuífero.
- ◆ Finalmente, en el estero Yali se ubican los cultivos P1, P2, P3, P4 y P5 que utilizan fertilizantes de purines y un sistema de regadío por pivote (P1, P2) y surcos (P3, P4 y P5). Asimismo, en esta misma zona se ubican los cultivos I21 e I22 (zona salida del área de estudio), los cuales utilizan fertilizantes inorgánicos y un sistema de regadío por pivote. En este sector se interdigitan tanto los aportes provenientes del estero Lo Chacón como los del San Vicente. Éstos corresponden a intercalaciones de material fino (Estero San Vicente) con más grueso (Lo Chacón), cuya permeabilidad sería principalmente baja, exceptuando aquellos sectores asociados a cauces naturales que cortan el cultivo P2, en donde la permeabilidad sería alta.

En **Tabla N°6.1** se presenta un resumen de lo anterior, donde se indica el cultivo, la unidad hidrogeológica y su permeabilidad.



**Tabla N°6.1:** Resumen de los cultivos, la unidad hidrogeológica y su permeabilidad relativa.

Cultivos	Unidad Hidrogeológica	Permeabilidad
P12, P13, P14, P16, P17, P18	Llanura aluvial-aluvional, cercano a depósitos coluviales y disectados por cauces superficiales	Media – alta. Alta en sectores aledaños a cauces superficiales
P15	Llanura aluvial-aluvional, en zona de interfluvios de Qdas. Honda y Yegua Overa.	Media-baja
P6, P7, P8, P9, P10	Llanura aluvial-aluvional, en zona de interfluvios de E. Las Palmas y Lo Chacón.	Media-baja. Alta en los cauces que disectan P6 y P10.
P11	Depósitos coluviales	Alta
I9, I10, I11, I12, I13	Llanura aluvial-aluvional.	Media-baja
I3, I4, I5, I6, I7, I8, I15, I16, I17, I18, I19, I20	Llanura aluvial-aluvional, con intercalaciones de sedimentos finos (E. Las Palmas) y grueso (E. Lo Chacón)	Media a baja.
I14, I23	Llanura aluvial-aluvional, cercano a depósitos coluviales	Media – alta. Alta
I1, I2	Llanura aluvial-aluvional, disectados por drenajes superficiales. Sección norte de I2 se ubica sobre depósitos coluviales.	Media-baja. Alta en sector de coluvios
P1, P2, P3, P4, P5 I21, I22	Llanura aluvial-aluvional. Interdigitación de sedimentos finos (E. San Vicente) y gruesos (E. Lo Chacón)	Baja, pero en sectores de cauces que disectan P2, es alta

## b) Series de Suelos y Unidades Geológicas

En general, el “suelo” (aproximadamente los 1,5 primeros metros del relleno, donde se desarrollan los cultivos) está conformado por cuatro grandes componentes:

- ◆ Constituyentes inorgánicos correspondientes a pequeños fragmentos de roca y minerales de varias clases. Los cuatro tamaños más importantes de partículas inorgánicas son: grava, arena, limo y arcilla.
- ◆ Materia orgánica que representa la acumulación de las plantas destruidas y resintetizadas parcialmente y de los residuos animales. El producto final de la descomposición de la materia orgánica se denomina *humus*.
- ◆ El agua que es retenida dentro de los poros con grados variables de intensidad, según la cantidad de agua presente. Junto con sus sales disueltas el agua del suelo forma la llamada solución del suelo; ésta es esencial para abastecer de nutrientes a las plantas que en él se desarrollan.
- ◆ El aire del suelo no es continuo y está localizado en los poros separados por los sólidos. Este aire tiene generalmente una humedad más alta que la de la atmósfera. Cuando es óptima, su

humedad relativa está próxima a 100%. El contenido de anhídrido carbónico es por lo general más alto y el del oxígeno más bajo que los hallados en la atmósfera.

Las propiedades químicas y físicas de los suelos son controladas, en gran parte, por la arcilla y el *humus*, ocurriendo reacciones químicas y cambios nutritivos, dando origen a diferentes tipos de suelos.

Los suelos son clasificados de acuerdo con su estructura y composición en órdenes, subórdenes, grandes grupos, subgrupos, familias y series. Las características del suelo varían enormemente de un lugar a otro, por lo cual se han establecido distintos sistemas de clasificación.

Para el sector de San Pedro, se consideró la descripción de suelos hecha por CIREN (1996), la cual incluye varias Series (ver **Figura N°6.5**), denominadas y caracterizadas como:

- Serie *Lo Vásquez (LVZ)* corresponde a la meteorización de rocas graníticas (basamento), que deriva a suelos evolucionados, en superficie, y que está compuesto por abundante gravilla de cuarzo y arcilla. En el área del proyecto esta serie se desarrolla directamente sobre el basamento rocoso, en la parte alta de los cerros que conforman la cuenca.
- Serie *Hacienda Alhué (HDL)* corresponde a suelos de origen coluvial derivados de sedimentos graníticos y se presentan asociados a los suelos de la serie Lo Vásquez. Se caracterizan porque el tamaño de grano de los sedimentos es más grueso tipo gravilla. En el área del proyecto, éstos se disponen en los faldeos de los cerros ubicados al norte del estero El Cobre, en ambas laderas a la altura de la junta de los esteros Lo Chacón y Las Palmas y en las laderas de los cerros que conforman la subcuenca del estero San Vicente.
- Series *Quilamuta (QLM)*, *Viña Vieja (VIV)*, *Peumo de Lo Chacón (PLC)* corresponden a suelos de origen aluvial, presentan un mayor grado de evolución, es decir, los sedimentos presentan más transporte, y son más finos que las series anteriores, ubicándose en la parte central del valle, en sectores cercanos a los cauces de esteros mayores (Yali, Lo Chacón, Las Palmas y San Vicente). Corresponden a arenas finas, limos y arcillas, con muy bajo contenido de material más grueso (grava fina). Estas series se han ordenado de mayor a menor tamaño granulométrico, lo cual responde al sentido de aporte de los esteros principales, en donde los sedimentos disminuyen su tamaño según el sentido de escurrimiento de estos drenajes. De acuerdo a lo anterior, estas series se desarrollan en los sectores de inundación de los esteros:

Series de Suelo en Microcuenca del Estero Las Palmas: Esta microcuenca está conformada por la unión de las quebradas Yegua Overa, Honda y El Cobre. Desde la cabecera de la quebrada Yegua Overa se desarrolla la serie Quilamuta gradando a la serie Viña Vieja hasta la junta con las quebradas El Cobre y Honda. En estas últimas se desarrolla la Serie Quilamuta, la cual engrana con la serie Viña Vieja (aporte de Yegua Overa). Aguas abajo de la junta (estero Las Palmas) grada a la serie Peumo de Lo Chacón, la cual engrana con la serie Viña Vieja (aporte proveniente del estero Lo Chacón).

Cabe señalar, que en la cabecera de las quebradas El Cobre y Honda se clasifican los suelos según la serie de Peumo Chacón, lo cual induce una incertidumbre dado que esta serie presenta un tamaño de sedimento mucho menor (Franca) que las serie de Viña Vieja (Franca arenosa), por lo cual este suelo pudiese estar mal clasificado.

Series de Suelo en Microcuenca del Estero Lo Chacón: Antes de la junta con el estero Las Palmas, se desarrolla la serie Quilamuta, gradando a la serie Viña Vieja, la cual engrana con la serie Peumo de Lo Chacón (aporte del estero Las Palmas). Aguas abajo de la junta con el estero Las Palmas, se desarrolla la serie Peumo de Lo Chacón.

Series de Suelo en Microcuenca del Estero San Vicente: En el valle de este estero se desarrolla principalmente la serie Peumo Lo Chacón.

Asimismo, se definen las series Peumo Chico y Estancilla ubicados en los faldeos de los cerros en el valle central del estero San Vicente y en el estero Las Palmas, aguas abajo de la confluencia de la quebrada Los Maquis, respectivamente, como suelos de origen aluvial, lo cual difiere desde el punto de vista geológico, ya que estos sectores se ubican en los faldeos de los cerros, cuyo origen es principalmente coluvial, razón por la cual, estos suelos pudiesen estar mal clasificado.

- Serie *Tronador (TRO)*. Corresponde a suelos de origen aluvional y se caracterizan por estar conformados por sedimentos muy finos (arcilla y limo) y en ocasiones fragmentos de maicillo y cuarzo. Esta serie se ubica en el sector bajo del valle, en la confluencia de los esteros mayores, principalmente en la junta de los esteros Lo Chacón y San Vicente.

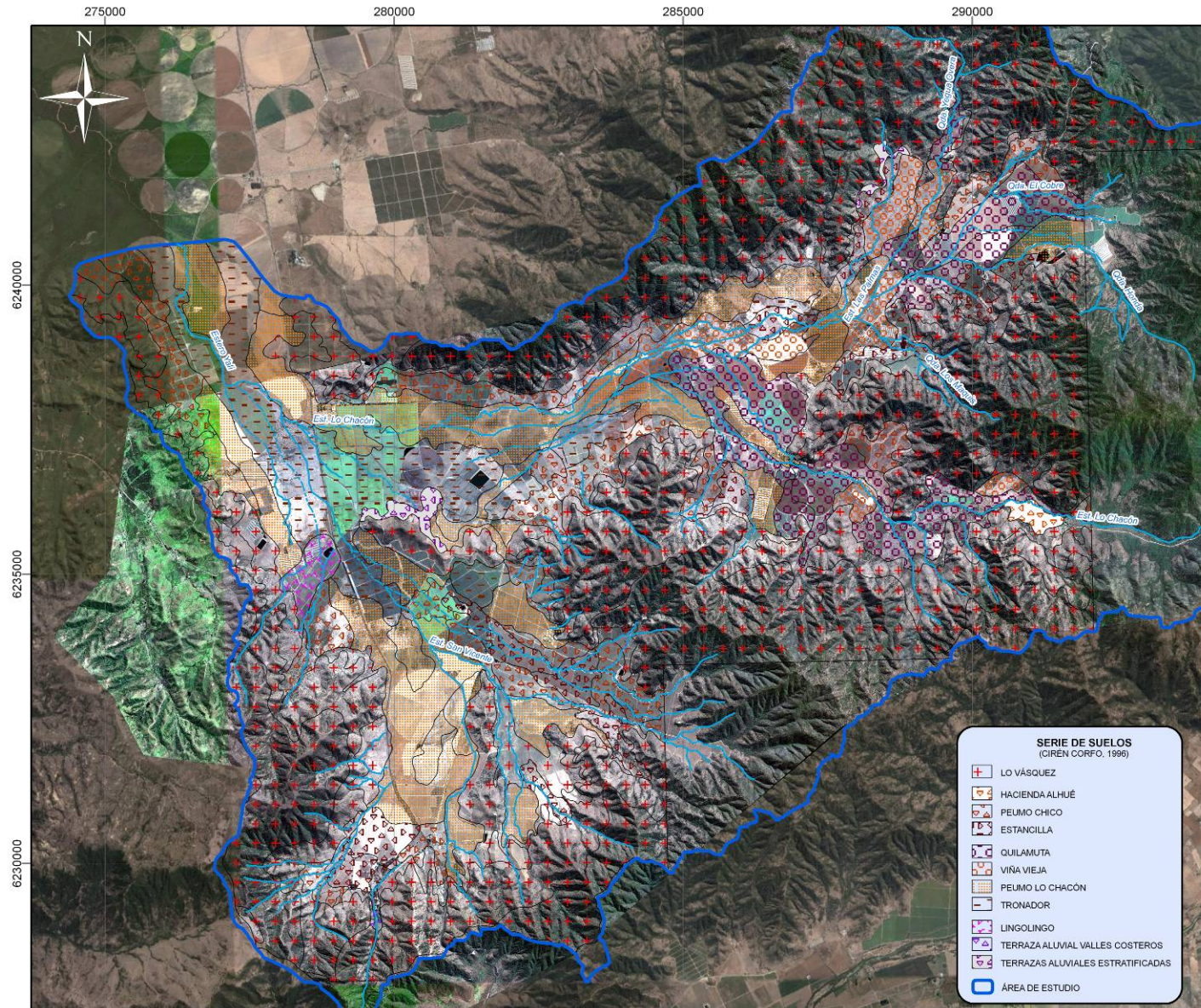
Cabe señalar, que en este sector se definen las series Lingolingo (LGG), Terrazas Aluviales Estratificadas (TE) y Terraza Aluvial Valles Costeros (TR) cuya descripción de suelos no corresponde a los ambientes geológicos de depositación definidos en el área del proyecto. Lo anterior, ya que la serie Lingolingo, corresponde a suelos evolucionados que ocupan una posición de terraza alta (marina). Este suelo se ubica al sur del estero San Vicente, por lo cual debería estar mal clasificado. Asimismo, el suelo clasificado como TE, el cual se ubica en los faldeos de los cerros, en la quebrada Yegua Overa. Finalmente, el sector ubicado en la cabecera del estero San Vicente se clasifica según la serie Terraza Aluvial Valles Costeros que corresponde a una terraza de origen aluvial del sector costero.

En la **Tabla N°6.2** se muestra un resumen de lo anteriormente señalado, para cada Serie de Suelo identificada por CIREN (1996), donde se identifica el origen, su ubicación dentro del sector del proyecto y donde se producen inconsistencias entre el origen de la serie de suelo (señalado por CIREN) y las unidades geológicas identificadas en superficie.

**Tabla N°6.2:** Resumen de las Series de Suelos cuyo Origen no coincide con los ambientes geológicos identificados en el sector del proyecto.

<b>Series de Suelos (según CIREN)</b>	<b>Origen de la Serie de Suelo (según CIREN)</b>	<b>Ubicación en el Sector</b>	<b>Inconsistencia Geológica Detectada</b>
Estancilla (STL), Peumo Chico (PCH)	aluvial	Faldas de cerros: al N del Est. El Cobre, en la junta de Est. Lo Chacón y Las Palmas y cerros que bordean Est. San Vicente	De acuerdo a su ubicación pudiesen corresponder a depósitos coluviales
Lingolingo (LGG)	Terraza alta (marina)	Sur Estero San Vicente	Este ambiente geológico no se identifica en el área del proyecto
Terrazas Aluviales Estratificadas (TE)	Terrazas aluviales	Faldas de cerros en Qda Yegua Overa	Este ambiente geológico no se identifica en el área del proyecto
Terraza Aluvial Valles Costeros (TR)	Terraza aluvial	Cabecera estero San Vicente	Este ambiente geológico no se identifica en el área del proyecto





**Figura N°6.5:** Series de Suelos identificados y descritos por CIREN (1996) (Base fotográfica: Google Earth, 2007 y Quick Bird).



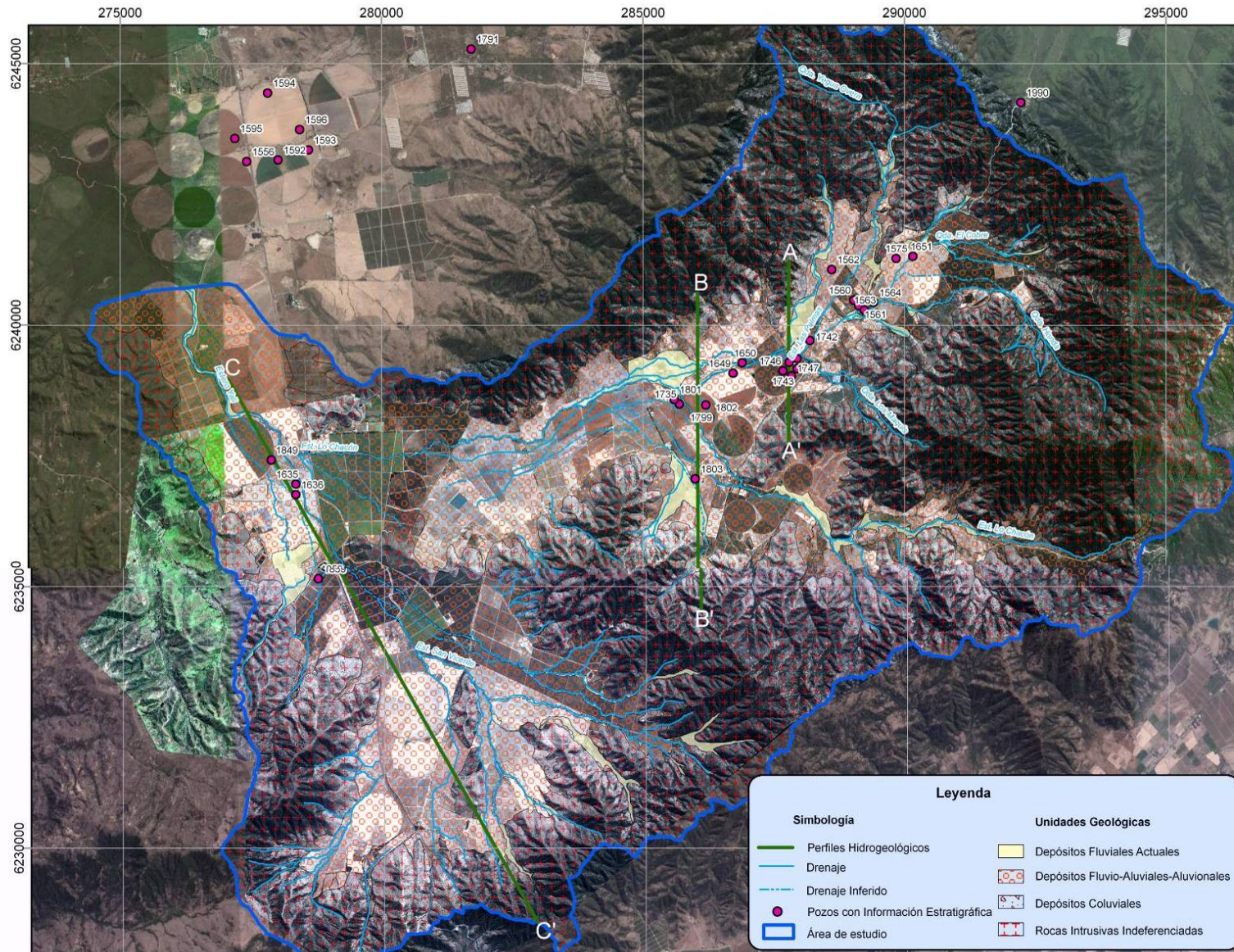
## 6.4 GEOLOGÍA DE SUBSUPERFICIE

De acuerdo con la geología del sector, la cuenca está delimitada por un cordón montañoso constituido principalmente por rocas intrusivas indiferenciadas cuyas edades abarcan desde el Paleozoico Superior hasta el Jurásico. El relleno del valle está conformado por sedimentos que se han depositado desde el Pleistoceno hasta la actualidad, cuya composición es fundamentalmente la del basamento, en donde por procesos exógenos, éste se denuda para que luego sus fragmentos sean transportados ya sea por el agua o bien por gravedad.

El valle corresponde a una llanura aluvial-aluvional, en donde la energía y capacidad de transporte de la red de drenaje es baja, por lo cual la granulometría es del tipo arena grava fina, la cual se desarrolla principalmente en las cercanías de los faldeos de los cerros, disminuyendo su tamaño aguas abajo, hasta alcanzar el tamaño arcilla, distribuida principalmente, en el sector bajo del valle (junta de los esteros Lo Chacón y San Vicente) y en la junta de esteros menores. Además, en dicha junta los sedimentos asociados a ambos aportes interdigitarán, en donde se tendrá la presencia de material grueso recibiendo aportes finos provenientes del estero que confluye. De esta forma, el valle adquiere la forma de una extensa planicie aluvial-aluvional.

En la **Figura N°6.6**, se muestra la ubicación tanto de los pozos con información estratigráfica como de los 3 perfiles hidrogeológicos. Se distinguen 4 unidades hidrogeológicas, identificadas con orientación de techo a base en los puntos siguientes.

- ◆ **Unidad Hidrogeológica 1:** Está conformada por un estrato arcilloso, limo-arcilloso, el cual se presenta continuo en todo el valle. Su espesor varía según el valle asociado a cada estero principal. De acuerdo a esto, se tiene que en el estero Las Palmas varía entre 12 y 22 m (ver **Perfil A-A'**) en su parte media (pozos 1.742, 1.745, 1.743, 1.746, 1.747, 1.562, 1.560, 1.561, 1.563) mientras que hacia su cabecera disminuye alcanzando entre los 7 y 10 m (pozos 1.650 y 1.649); en el estero Lo Chacón, entorno de la junta con Las Palmas, su espesor disminuye (ver **Perfil B-B'**) y varía entre los 4 y 13 m (pozos 1.650, 1.649, 1.803, 1.802, 1.735, 1.801); en el estero San Vicente (ver Perfil C-C') presenta una potencia de 45 m (pozo 1.859) disminuyendo gradualmente hacia la junta con Lo Chacón hasta alcanzar los 7 a 12 m (pozos 1.636, 1.635 y 1.849). De acuerdo con sus características granulométricas esta unidad presentaría una baja permeabilidad.



**Figura N° 6.6:** Ubicación de perfiles hidrogeológicos y pozos con información estratigráfica.



- ◆ **Unidad Hidrogeológica 2:** Infrayaciendo a la *Unidad Hidrogeológica 1*, se reconoce un estrato de granulometría más gruesa conformado por arena gruesa y grava fina con escasa presencia de arcilla, el cual se encuentra interdigitando con estratos arcillo-limosos y arcillo-arenoso. Si bien en el sector de la junta de las quebradas Yegua Overa, El Cobre y Honda, se observa que existe continuidad del estrato grueso a lo ancho del valle, alcanzando un espesor entorno de 8 m (pozos 1562, 1560, 1561, 1563), hacia aguas abajo no es posible definir su continuidad, ya que se encuentra alternando principalmente con estratos arcillosos. Esta unidad se reconoce hasta los 82 m de profundidad (pozo 1.801). Se espera que los estratos arenosos presenten una alta permeabilidad mientras que los arcillo-limosos sean de baja permeabilidad.

De acuerdo con la información estratigráfica, dentro de esta unidad se encuentran habilitados los sondajes construidos en el sector. Dado que las fechas de construcción son diferentes entre sí, no se pueden comparar los registros de los niveles estáticos. Sin embargo, en la campaña de terreno efectuada por GP Consultores, se midió el nivel en las norias del sector, por lo cual el nivel de las aguas subterráneas se encontraría entorno de los 10 m de profundidad (mayo, 2009).

- ◆ **Unidad Hidrogeológica 3:** Corresponde a material coluvial ubicado en los faldeos de los cerros. Está conformado por grava fina, arena arcillosa, el cual interdigita en profundidad con la *Unidad Hidrogeológica 2*. Considerando la granulometría de esta unidad se espera que presente una alta permeabilidad, si bien no constituyen acuíferos conforman zonas de recarga al sistema acuífero.
- ◆ **Unidad Hidrogeológica 4:** Corresponde al basamento rocoso, el cual se reconoce a los 80 m y descrito como roca alterada en el pozo 1.859, ubicado en el sector del estero San Vicente. Hacia el sector del estero Lo Chacón, se estima que la roca se encontraría entorno de los 50 a 54 m de profundidad, en donde se ha descrito arcilla rojiza (característico del granito meteorizado y alterado), en los pozos 1.649 y 1.650.

Bajo esta perspectiva, en el sector de San Pedro se desarrollaría un acuífero del tipo confinado, en donde la Unidad Hidrogeológica 1 sería la unidad confinante, mientras que la Unidad Hidrogeológica 2 correspondería a la unidad acuífera.

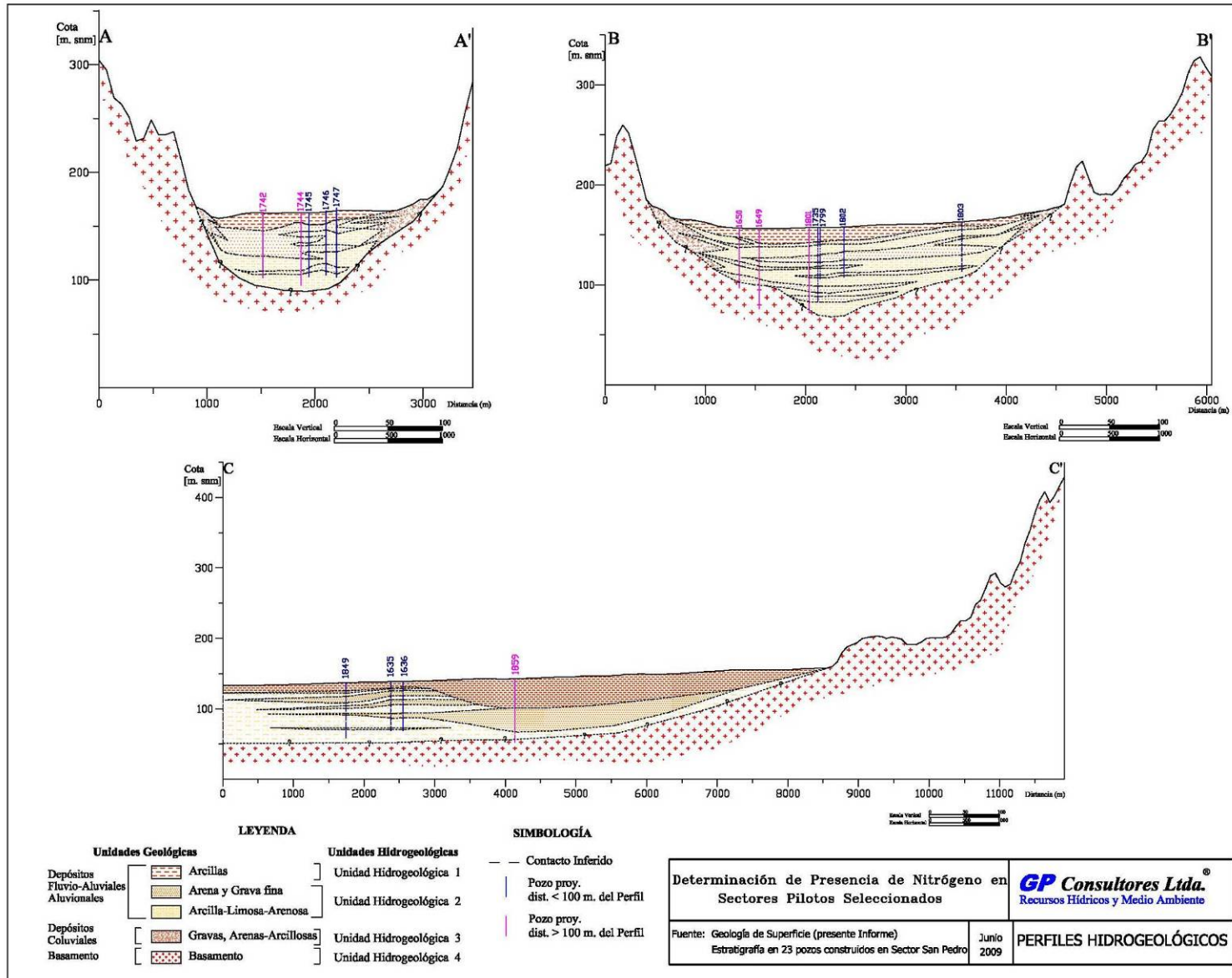


Figura N° 6.7: Interpretación de Perfiles Hidrogeológicos.



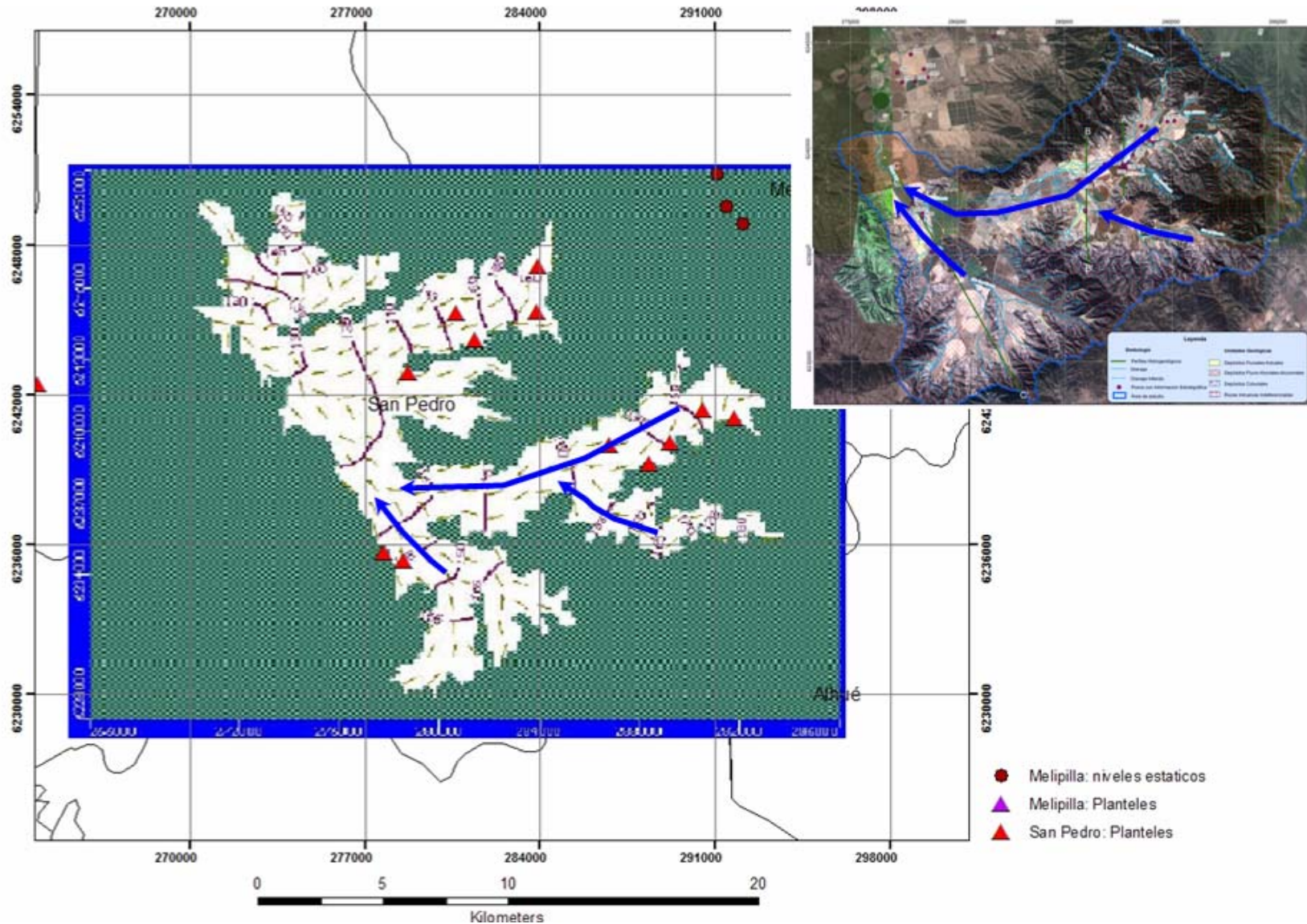
## **6.5 DINÁMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

### **6.5.1 Antecedentes**

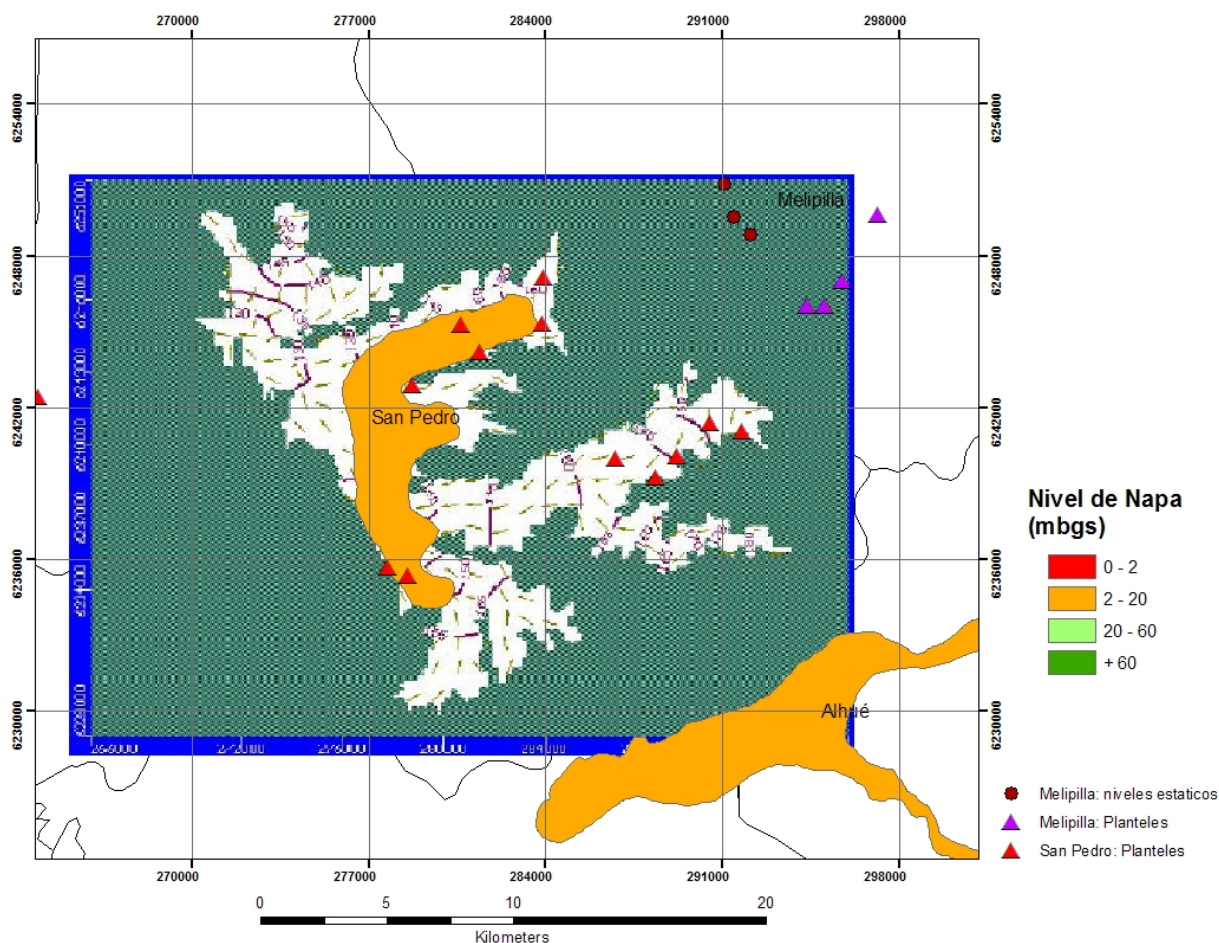
En la zona del proyecto existen algunos antecedentes sobre los flujos subterráneos, básicamente en estudios previos desarrollados en el área. A continuación se presenta la información recopilada, la que incluye una breve descripción del sistema de flujo en el sector San Pedro, así como también, de una interpretación del nivel del agua subterránea en los pozos, incluyéndose datos de la profundidad a la cual se encuentra el nivel saturado.

El flujo nace en las zonas de cabecera, en dirección del valle principal. Las principales direcciones de flujo se representan en la **Figura N°6.8**, las cuales han sido obtenidas del informe SDT 189 de la Dirección General de Aguas.

Respecto de la profundidad del nivel saturado en la zona del proyecto, en el estudio de la DGA se señala que éste se ubica entre 2 a 20 m (**Figura N°6.9**). No hay datos disponibles en el sector poniente del área San Pedro.



**Figura N°6.8:** Sistema de Flujo Subterráneo del Sector San Pedro, obtenidos del informe SDT 189 de la DGA - Datos de nivel de la superficie de la zona saturada, obtenida de la red de monitoreo de la DGA. Las flechas en color azul representan las direcciones del flujo subterráneo.



**Figura N°6.9:** Nivel Freático del Sector San Pedro – Datos del sistema de flujo subterráneo del SDT 189 de la DGA - Datos de nivel hidrostático de la red de monitoreo de la DGA - Nivel de napa de la DGA. Nota: Mbgs, metros bajo la superficie del terreno

### **6.5.2 Niveles de las Aguas Subterráneas y Direcciones de Flujo**

Durante el desarrollo del proyecto fueron efectuadas nuevas mediciones del nivel de las aguas subterráneas en el sector de San Pedro, las cuales están orientadas a la caracterización de su dinámica. Se efectuaron las siguientes mediciones:

- Levantamiento Topográfico de Norias y Pozos seleccionados.
- Medición del Nivel Freático (realizado previo al inicio del riego).

A continuación se describen las actividades realizadas.

#### **Levantamiento Topográfico:**

Durante el año 2010 se llevó a cabo un levantamiento topográfico en norias y pozos seleccionados del sector, para que -en conjunto con las mediciones del nivel freático- permitiese identificar las direcciones del flujo de las aguas subterráneas del sector.

El levantamiento topográfico fue realizado con GPS geodésicos. La topografía fue efectuada en pozos y norias seleccionadas, donde pudo medirse el nivel freático en condiciones sin explotación, previo al período de riego.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del levantamiento topográfico efectuado en septiembre del 2010.

**Tabla N°6.3:** Levantamiento topográfico en pozos y norias seleccionados del sector San Pedro.

ID Pozo	Este (m)	Norte (m)	Altura brocal (m.snm)	Altura Terreno (m.snm)
1	286.606	6.237.188	187,589	186.839
41	287.188	6.239.333	184,355	184.015
40	286.343	6.238.818	179,529	179.039
20	289.534	6.241.020	197,693	197.238
56	288.123	6.239.682	188,534	188.324
35	284.824	6.238.835	175,597	175.362
55	280.216	6.234.468	170,67	170.150
46	276.944	6.238.823	159,333	158.968
44	277.670	6.238.257	160,64	160.275
27	278.622	6.237.053	162,187	161.767
51	280.747	6.230.421	193,76	193.615
17	288.636	6.239.822	189,627	189.362
23	288.626	6.239.770	189,49	189.045
31	288.770	6.239.662	190,777	190.293
5	286.697	6.237.259	187,686	187.586
18	289.343	6.240.481	194,933	194.568
38	283.265	6.238.150	-	-

**Nota:** Coordenadas referidas al datum WGS 84. Huso UTM Zona 19S.

### Medición de Niveles Freáticos:

Consiste en medir la profundidad a la cual se encuentra la superficie de las aguas subterráneas, referidas al brocal del pozo. Posteriormente, las mediciones de nivel son referidas a un sistema común, establecido mediante el levantamiento topográfico realizado en esos puntos. Esas mediciones permiten comparar el nivel energético de las aguas subterráneas espacialmente, visualizar diferencias entre el sistema subterráneo somero y profundo, y estudiar las direcciones de flujo de las aguas subterráneas.

La medición de niveles se realiza con pozómetro, el cual consiste en una huincha graduada, la que se introduce en el pozo y emite una señal, sonora o luminosa, al momento de hacer contacto con el agua, estableciéndose la profundidad del agua subterránea en función del largo introducido de la huincha.

Dentro de las restricciones del método de medición, se tiene que no es posible medir el nivel freático en pozos con bomba instalada, que no cuenten con una línea de aire que permita introducir el equipo en el pozo. Asimismo, las mediciones de nivel en pozos en que están siendo bombeados, recientemente bombeados o en pozos que muestran interferencias asociadas al bombeo en otros pozos de bombeo, no son representativas del nivel estático de las aguas



subterráneas, por cuanto han experimentado un abatimiento o descenso en sus niveles, asociado al bombeo, denominándose niveles dinámicos, mostrando efectos más bien locales.

En la **Tabla N°6.4** se presenta la medición de niveles de las aguas subterráneas en todos aquellos pozos y norias a los cuales se tuvo acceso durante la campaña de mediciones efectuada en septiembre de 2010 (período previo al inicio de la temporada de riego).

**Tabla N°6.4:** Mediciones de nivel freático en pozos y norias seleccionadas en el sector San Pedro (campaña septiembre 2010).

Pozo ID	Altura Brocal m.snm	Nivel Estático m.bnb	Cota Nivel Estático m.snm
1	187,589	25,180	162,409
41	184,355	22,260	162,095
40	179,529	24,810	154,719
20	197,693	15,845	181,848
56	188,534	21,390	167,144
35	175,597	26,438	149,159
55	170,67	11,163	159,507
46	159,333	13,805	145,528
44	160,64	15,210	145,430
27	162,187	20,155	142,032
51	193,76	10,845	182,915
17	189,627	17,825	171,802
23	189,49	17,853	171,637
31	190,777	17,515	173,262
5	187,686	12,070	175,616
18	194,933	15,205	179,728

De acuerdo a las mediciones antes presentadas, se observa que la profundidad de la napa freática en la zona del proyecto, se ubica entre 10,8 a 17,9 metros de profundidad en el sistema somero (6 mediciones concentradas en el área de cabecera – sector oriente), en tanto que, entre 11,2 a 26,4 metros de profundidad en el sistema profundo (10 mediciones distribuidas en el área del proyecto).

Por otro lado, comparando el nivel energético en los sistemas somero y profundo (ver **Figura N° 6.10**), se observa que las norias poseen niveles superiores a los que presentan los pozos profundos en áreas cercanas, lo que indica que existirían dos sistemas distintos, existiendo una posibilidad de infiltración desde el sistema superior/somero al profundo, flujo que estaría restringido por la presencia de la capa de arcilla como medio confinante.

**Direcciones de Flujo de las Aguas Subterráneas:**

Respecto al flujo de las aguas subterráneas, no existen suficientes mediciones en el sistema somero (acotado a un único sector), por cuanto, en la cuenca, las norias son escasas debido a la profundidad del agua subterránea y a que ellas presentan agua preferentemente en el periodo pluvial.

Por otro lado, en el sistema profundo se observa que el flujo nace en las zonas de cabecera, en dirección del valle principal.

Las principales direcciones de Flujo (sistema profundo) se representan en la **Figura N°6.11**, las cuales han sido obtenidas de las mediciones de niveles efectuadas durante la campaña de septiembre de 2010.

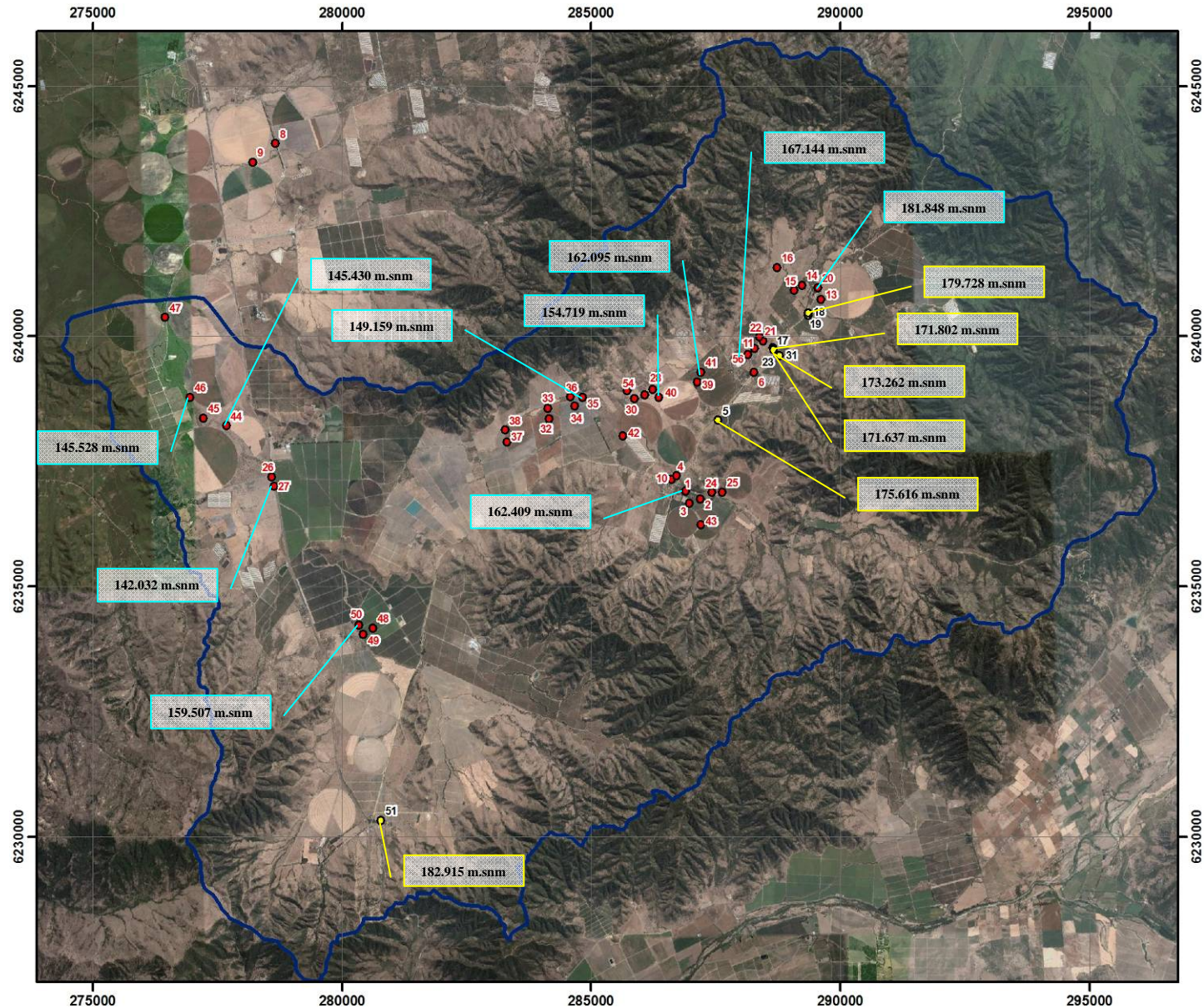
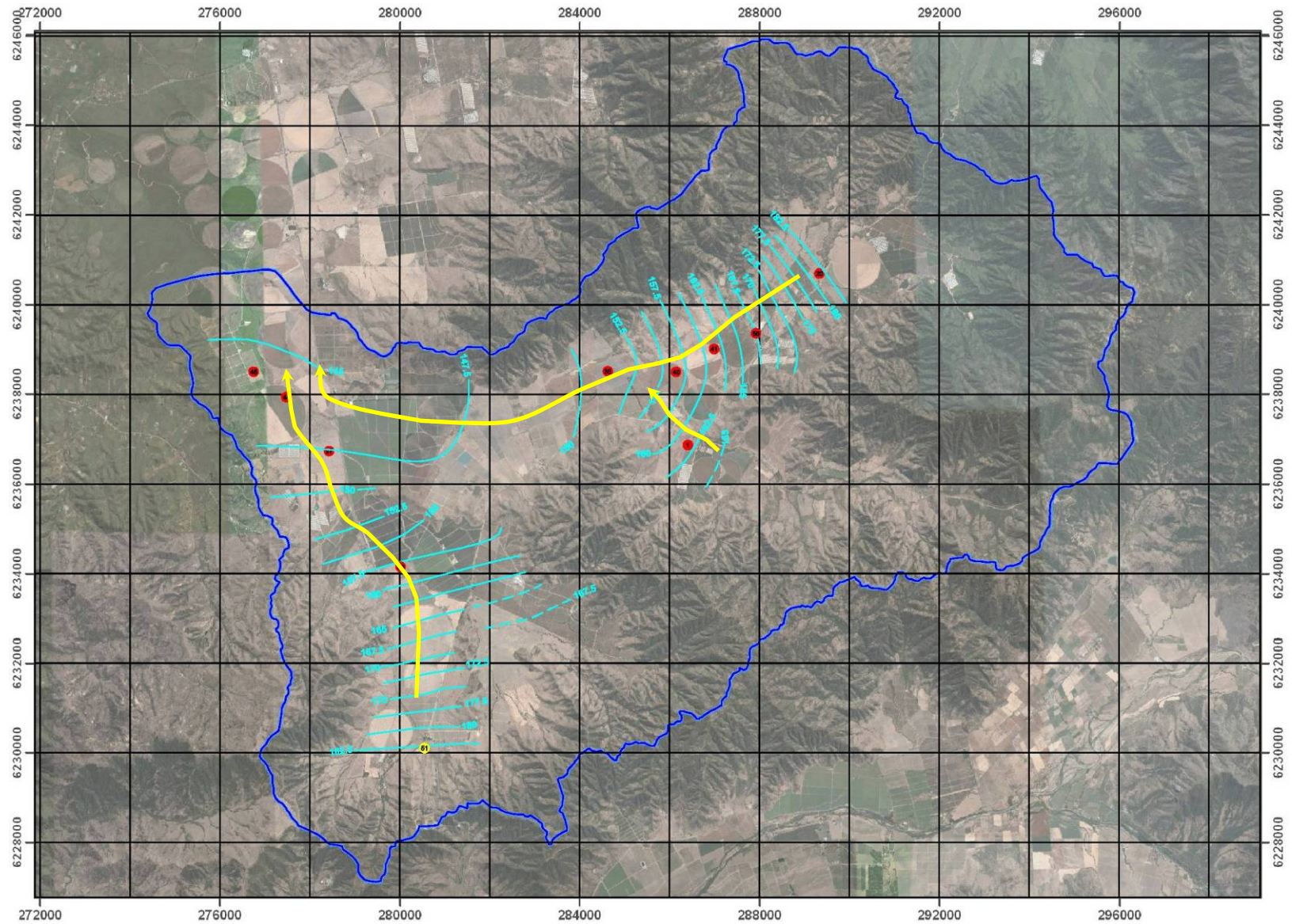


Figura N°6.10: Mediciones de Nivel Freático en Pozos (Rojo) y Norias (Amarillo), Septiembre 2010. Sector San Pedro.





**Figura N°6.11:** Curvas Equipotenciales (curvas celeste) y Direcciones de Flujo del Agua Subterránea (líneas amarillas) del acuífero profundo – sector San Pedro, Septiembre 2010.



## **7. MARCO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO, SECTOR PICHIDEGUA**

---

### **7.1 INTRODUCCIÓN**

Se presentan los principales aspectos de la caracterización de la geología de superficie, la geología de subsuperficie y la hidrogeología de la zona del proyecto. El detalle de esta caracterización, junto con la metodología empleada, se presenta en **Anexo D**.

La caracterización de la geología de superficie se realiza considerando el origen y los tipos tanto de las rocas como del relleno. Para ello, se identifican unidades geológicas-geomorfológicas según la litología, estratigrafía y permeabilidad.

Dado que sobre estas unidades se disponen los diferentes tipos de cultivos (identificados en los capítulos anteriores), se compararon los cultivos según el tipo de fertilizante que utilizan (purines, guano e inorgánico) con las permeabilidades relativas asociadas a cada unidad geológica, ya que éstas influyen directamente en la percolación de nitratos desde la zona no saturada al nivel de aguas subterráneas.

También se caracterizaron los primeros metros de relleno (“suelo”) según la clasificación de CIREN CORFO, y se compara el origen de ellos (según las Series definidas por CIREN) con los ambientes de depositación geológica observados en el presente proyecto.

Además, dada la importancia de la dinámica de las aguas subterráneas en el comportamiento de los solutos en el medio poroso, se identifican las direcciones de flujo de las aguas subterráneas, los niveles freáticos y sus variaciones tanto espacial como temporalmente.

### **7.2 GEOMORFOLOGÍA DEL AREA**

El sector piloto Pichidegua se ubica unos 62 km. al suroeste de Rancagua, justo al sur del lago Rapel. Pertenece al tramo inferior de la cuenca del río Tinguiririca, en donde numerosos afluentes lo alimentan, para luego, en la zona de confluencia con el río Cachapoal, desembocar en el lago Rapel y dar origen al río homónimo.

La zona del proyecto se ubica en un valle conformado por dos ambientes depositacionales: El ambiente de Rinconada hacia el este del área del proyecto y el ambiente Fluvial asociado al río Tinguiririca, el cual escurre al oeste del área del proyecto, de S a N. El sector de Rinconada se encuentra rodeado por cordones montañosos dispuestos hacia el Este, los cuales por una parte

conforman el basamento del sector y por otra, separan las cuencas asociadas a los ríos Cachapoal y Tinguiririca (**Figura N°7.1**). Hacia el norte las alturas son bajas, donde destaca el cerro Toco (278 m s.n.m) para luego alcanzar su punto más bajo en el portezuelo Toco. Desde allí las alturas empiezan a tomar importancia en una cadena montañosa de rumbo N-NW. Esta cadena representa el límite E del área del proyecto y destacan el cerro Valdovinos (775 m s.n.m) y el morro de Bari (776 m s.n.m.). Desde el Este hacia el sur-oeste esta cadena se encuentra bastante disectada permitiendo además, la formación de varios cerros islas. Destaca en esta cadena el cerro Mancuman (447 m s.n.m.) y el cerro San Lucas (197 m s.n.m).

El ambiente fluvial del Río Tinguiririca, conforma el límite occidental del área del proyecto. Se compone por depósitos fluviales y fluvio-aluvionales y engrana hacia el este con los depósitos aluviales cineríticos del sector Rinconada.

De forma general, y en dichos ambientes, se observan los siguientes drenajes superficiales principales:

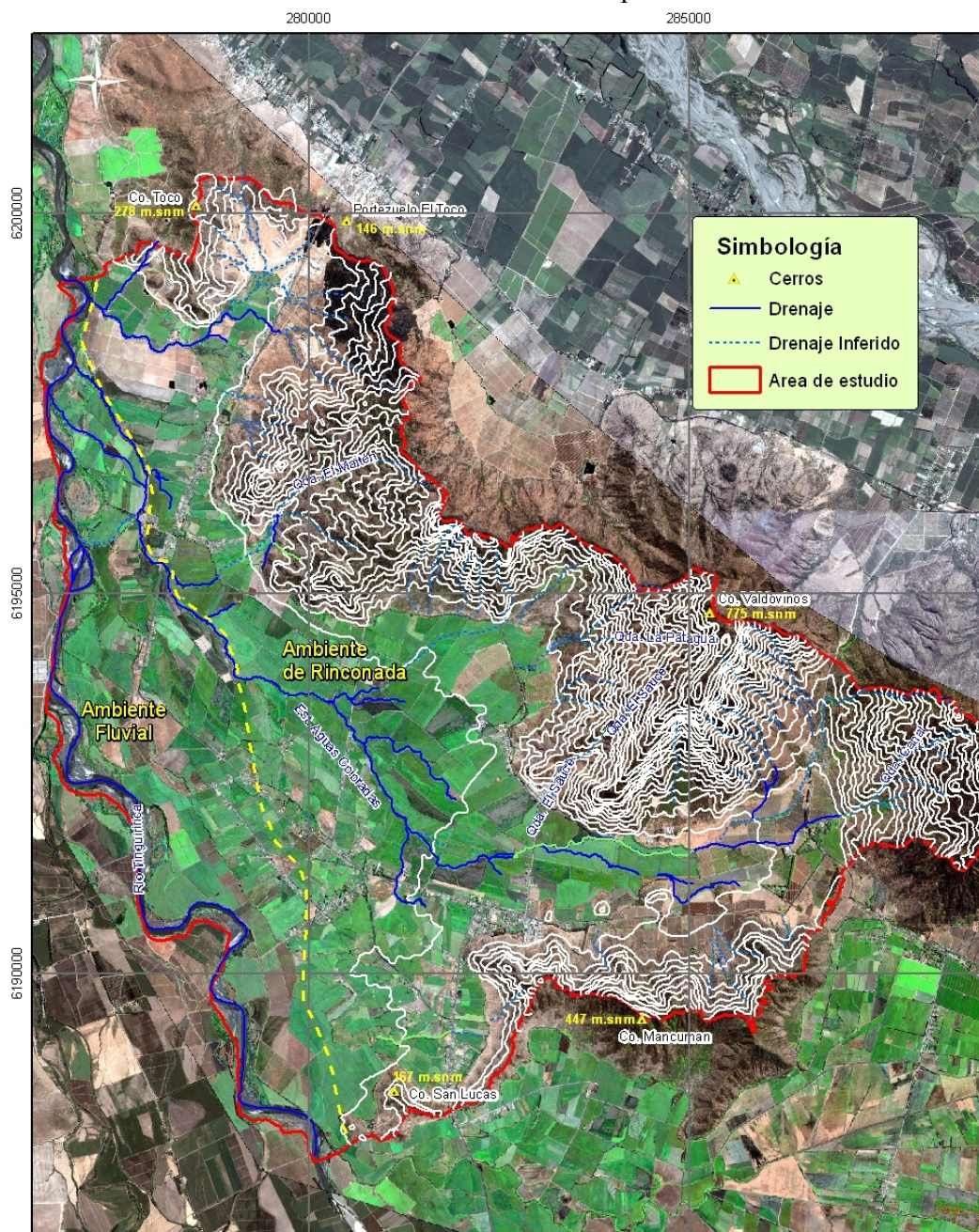
- Ambiente de Rinconada: Hacia el norte del área del proyecto, la unión de pequeñas quebradas dan origen a un curso de agua superficial (sin nombre), el cual presenta un escurrimiento hacia el SW cambiando de dirección al NW al encontrarse con una barrera hidráulica conformada por un depósito tobáceo, para finalmente desembocar al río Tinguiririca. En general, la composición de estos sedimentos son principalmente tobáceos (ceniza tamaño limo, arcilla y arena), acarreados desde el faldeo de los cerros, mezclados con sedimentos tamaño grava y arena de composición granítica provenientes de la erosión y meteorización del basamento.

Hacia el sureste del sector Rinconada, numerosas quebradas, entre otras El Maitén, La Patagua, El Sauce y Canal, dan origen al estero Aguas Coloradas, el cual escurre en la rinconada subparalelo al Tinguiririca, confluyendo finalmente a éste en el sector norte. Esta red de drenaje, de moderada energía, transporta la mayor parte de los sedimentos en períodos de alta pluviosidad. Hacia el sector de cabeceras y ubicados en los piedemontes de los cerros, es posible encontrar fragmentos de mayor tamaño disminuyendo gradualmente aguas a bajo a sedimentos más finos (limos y arcillas). Estos aportes forman parte del relleno de la rinconada, conformando actualmente una planicie aluvial cinerítica, principalmente de granulometría limo-arcilloso con suave pendiente hacia el norte, la cual es erosionada en parte, por el flujo actual del estero Aguas Coloradas.

Cabe señalar que en el sector suroeste de la rinconada, pudiese estar el basamento en o cerca de la superficie correspondiente a una prolongación del Cerro Mancuman, representado por el afloramiento de cerros islas. Esta supuesta puntilla pudiese estar cubierta por la toba y además, conformaría una barrera hidráulica desviando por una parte el curso del estero Aguas Coloradas hacia el NW de la rinconada y por otra, restringiría el aporte asociado al río Tinguiririca.

- Ambiente Fluvial: Está dado por los depósitos del río Tinguiririca. Su dirección dentro del área del proyecto es S-N, acarreado sedimentos de largo transporte provenientes desde la Cordillera de los Andes y la Depresión Central. Este ambiente es de alta energía, la cual

aumenta en períodos de alta pluviosidad y de deshielos en la alta cordillera. El curso del río presenta variaciones desde baja a alta sinuosidad, donde en estos últimos sectores se forman importantes meandros, con la consecuente acumulación de sedimentos. En cuanto a los fragmentos más gruesos (bolones y gravas) es posible encontrarlos, superficialmente, en el curso actual del río Tinguiririca. Se observa el desarrollo de al menos dos niveles aterrizados, las que constituyen plataformas ubicadas contiguas al cauce actual del río. En donde el nivel más cercano al río es erosionada en los períodos de crecidas de éste.



**Figura N°7.1:** Imagen satelital del sector piloto Pichidegua, con la indicación de drenaje y cotas más importantes del sector (Base fotográfica: Google Earth, 2007 y Quick Bird)



## 7.3 GEOLOGÍA DE SUPERFICIE

### 7.3.1 Marco Geológico

El sector piloto de Pichidegua se encuentra en la Zona Central de Chile, lugar caracterizado, actualmente, por tres unidades morfoestructurales mayores de rumbo ~ N-S. De oeste a este éstas son: 1) la Cordillera de la Costa, que consiste en una cadena montañosa con altitudes que varían entre los 1.000 y 2.000 m; 2) la Depresión Central, que corresponde a un nivel tectónico deprimido que actúa como una cuenca de sedimentación y 3) la Cordillera de los Andes que corresponde al arco volcánico actual, con alturas desde los 2.000 a casi 7.000 m. Cada uno refleja episodios geológicos propios de un margen continental activo, en un contexto de subducción.

El área del proyecto se encuentra inmediatamente al sur de la zona de subducción de la dorsal oceánica Juan Fernández, la que se localiza frente a las costas de Valparaíso (33° S aprox.) y que constituye el límite sur de una zona de subducción plana. Este límite implica un cambio geotectónico importante en donde al sur de éste, el margen continental se caracteriza por la presencia de volcanes activos, expuestos en la Cordillera de los Andes y de una depresión central, a diferencia de lo que ocurre al norte de este límite.

La región de Chile Central registra una evolución que va desde el Paleozoico Superior al Presente (**Figura N°7.2**). El desarrollo de un arco volcánico durante el carbonífero-pérmico permitió la intrusión del batolito y constituye las rocas más antiguas de la Cordillera de la Costa (Pzga, Pzg, Sernageomin, 1990). Durante el Triásico y Jurásico Inferior hubo un régimen extensional asociado a un estado pasivo del margen continental. Esto permitió el desarrollo de cuencas de intraarco con aporte sedimentario marino y continental, acompañado por una actividad volcánica predominantemente ácida y plutonismo bimodal. El comienzo del ciclo andino fue producto de la activación del sistema de subducción y ocurrió durante el Jurásico Inferior, manteniéndose activo durante el Cretácico (KTlv, KTg, Sernageomin, 1990) y Cenozoico. Esto trae consigo la presencia de arcos magmáticos que migran hacia el oriente, asociados a diferentes estreses tectónicos a lo largo del margen continental, junto con el desarrollo de cuencas de trasarco y de antepaís. En este contexto, la Cordillera de la Costa representa el arco magmático desarrollado durante el Paleozoico y el Jurásico-Cretácico Inferior en donde se emplazan los sectores pilotos en estudio, mientras que el arco Cenozoico corresponde a la Cordillera de los Andes.

A lo largo del margen occidental, en la Cordillera de la Costa se disponen discordantemente, sobre los complejos intrusivos del Paleozoico, secuencias sedimentarias de ambiente marino (e.g. Formación Navidad). Las formaciones marinas se constituyeron debido a un evento tectónico extensional durante el Mioceno – Plioceno Inferior, para posteriormente volver al régimen de compresión durante el Plioceno Superior o Pleistoceno Inferior (Qlp, Sernageomin, 1990). Hacia el este de la línea de costa, depósitos continentales de tipo fluvial, aluvional y lacustre (Qfal, Qfl, Sernageomin, 1990) engranan con las formaciones marinas del oeste. Finalmente, los depósitos cuaternarios, incluyen sedimentos fluviales (Qfi, Qfa, Sernageomin, 1990), coluviales (Qg, Sernageomin, 1990) y de remoción en masa, abanicos aluviales, sedimentos lagunares o lacustres (Ql, Sernageomin, 1990), playas, terrazas de abrasión marina y depósitos piroclásticos (Ignimbrita Pudahuel Qc, Sernageomin, 1990) los cuales rellenan gran parte del sector.



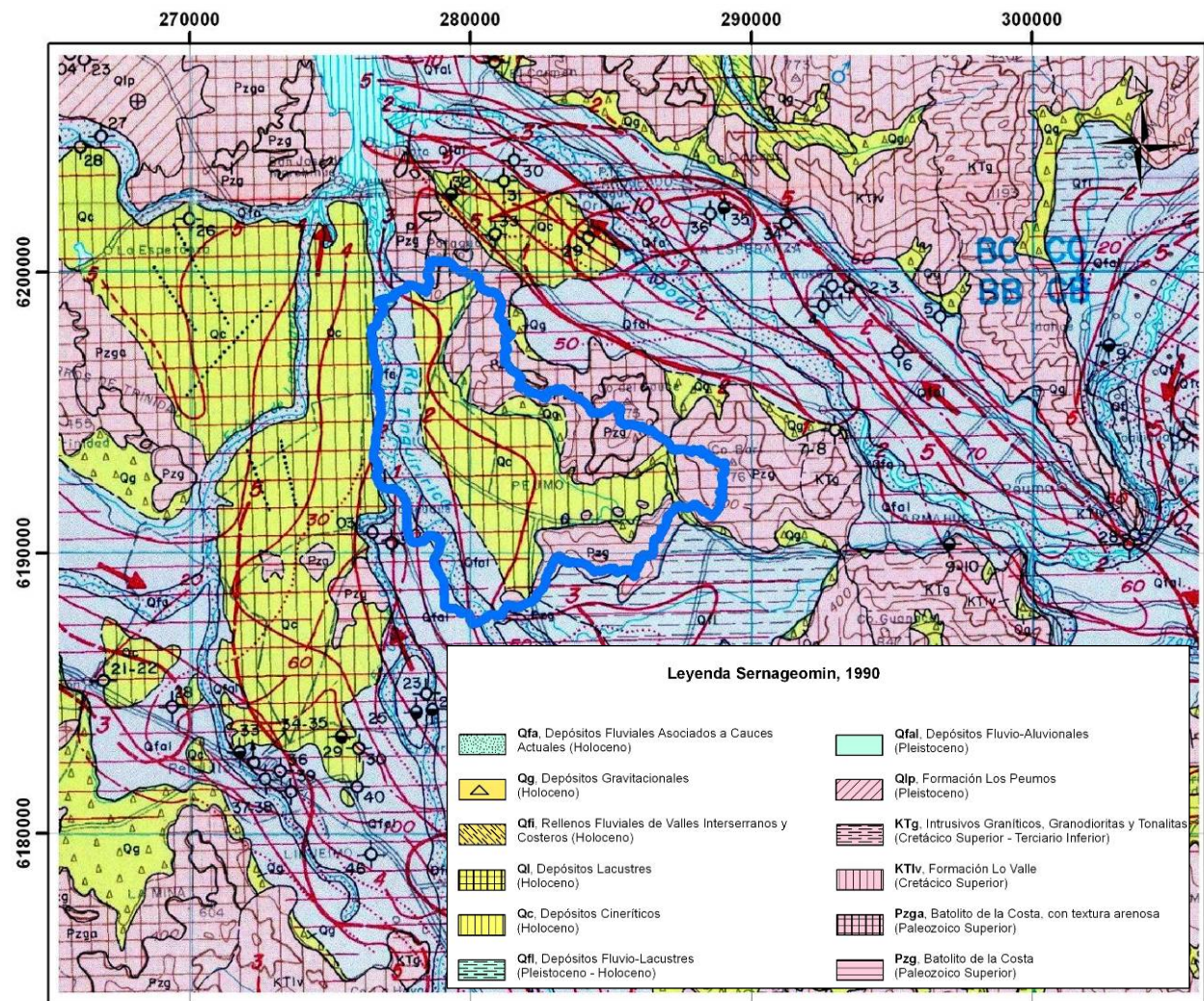


Figura N°7.2: Carta Hidrogeológica de Chile N°1, Hoja Rancagua (Sernageomin, 1990), escala 1:250.000. Sector Pichidegua delimitado con línea azul.

## **Geología Local**

De acuerdo a las unidades descritas en la Carta Hidrogeológica de Chile, Hoja Rancagua (Sernageomin, 1990) en el sector piloto Pichidegua, el basamento está constituido por rocas intrusivas paleozoicas (**Pz**), denominadas como Batolito de la Costa (Pzg, Sernageomin, 1990). Estas rocas presentan notoria alteración superficial, desarrollando un suelo residual disgregable con textura arenosa (Pzga, Sernageomin, 1990). El basamento se ubica en los cordones este y sureste del área del proyecto, con alturas que no sobrepasan los 800 m s.n.m. (**Figura N°7.3**)

El Basamento corresponde a unidades de rocas bien compactas e impermeables, con bajo a nulo potencial hidrogeológico.

## **Depósitos Cuaternarios No Consolidados**

El sector de Pichidegua se caracteriza por presentar dos ambientes de depositación: el primero, corresponde a un ambiente fluvial, de alta energía de transporte asociado al río Tinguiririca, el cual escurre en el sector oeste del área del proyecto en sentido S a N; y el segundo, corresponde a un ambiente de rinconada, de baja energía de transporte y con drenaje local restringido, ubicada al este del área del proyecto. De acuerdo a esto, los sedimentos que se han depositado desde el Pleistoceno hasta la actualidad, corresponden a: depósitos fluvio-aluvionales, tobáceos, aluviales-cinéricos, coluviales y fluviales actuales (**Figura N°7.3**).

**Depósitos Fluvio-Aluvionales (Qfa)**: Son depósitos correspondientes principalmente a gravas y gravas arenosas intercalados con niveles arcillosos de compacidad moderada a alta. Corresponden a sedimentos de origen fluvial-aluvional vinculados a cauces anteriores del río Tinguiririca y a las crecidas torrenciales que sobrepasan su cauce actual. En sectores se observan niveles aterrazados, formados a partir de la erosión del río sobre sus mismos depósitos, por cambios en su nivel base.

De esta forma, dentro del área del proyecto se ubican en la rivera E del actual cauce del río Tinguiririca, a lo largo de una franja N-S. Estos depósitos corresponden principalmente a fragmentos de gran tamaño provenientes de la región Andina, con un alto grado de transporte, que fueron acarreados por flujos de gran energía. Engran en su parte más superficial con depósitos aluviales cinéricos, provenientes desde el sector rinconada.

Esta unidad presenta una permeabilidad media a alta, debido a la presencia de material fino.

**Depósitos de Toba (Qt)**: Corresponden a sedimentos tamaño arena a arena-limo de composición cinerítica, con contenidos de pómez y escasos fragmentos líticos, semiconsolidados a consolidados. Esta unidad se correlaciona con la Ignimbrita Pudahuel, vinculada a un episodio eruptivo de tipo explosivo del complejo volcánico Maipo, cuyos sedimentos se habrían depositado en una primera fase por mecanismos de aerotransporte, y posteriormente, habrían sido redepositados por acción hídrica. Se disponen principalmente en forma de suaves lomajes, y en sectores topográficamente bajos protegidos por el basamento.

En el área del proyecto, se disponen principalmente hacia el noreste, en el sector del Portezuelo Toco (**Figura N°7.3**); hacia el sureste, en las nacientes del estero Aguas Coloradas y en pequeños afloramientos en el centro del área del proyecto, en forma de lomajes. Hacia el sector del río Tinguiririca, sus afloramientos son restringidos, ya que posiblemente este depósito fue removido y erosionado por dicho río.

Presenta baja a nula permeabilidad dado su alto contenido de material fino.

Depósitos Aluviales-Cineríticos (Qac): Corresponden a sedimentos de tamaño gravilla, arena y arcilla, de origen principalmente aluvial. Se asocian a barridos aluviales y aluvionales producto de precipitaciones de gran intensidad, que transportan los fragmentos desde los cerros, y además erosionan la cubierta cinerítica. De esta forma, se deposita en el sector de rinconada una mezcla de sedimentos de la composición del basamento, conocido como maicillo (grava fina y arena granítica) con depósitos de ceniza (limo y arcilla) que son removidos a medida que ocurre el transporte del flujo aluvional. Se depositan principalmente en el sector de rinconada, sobre los depósitos de toba y engranan hacia el oeste con los depósitos fluvio-aluvionales del Tinguiririca.

Estos depósitos presentan una permeabilidad media-baja, dado por su alto contenido de material fino cinerítico.

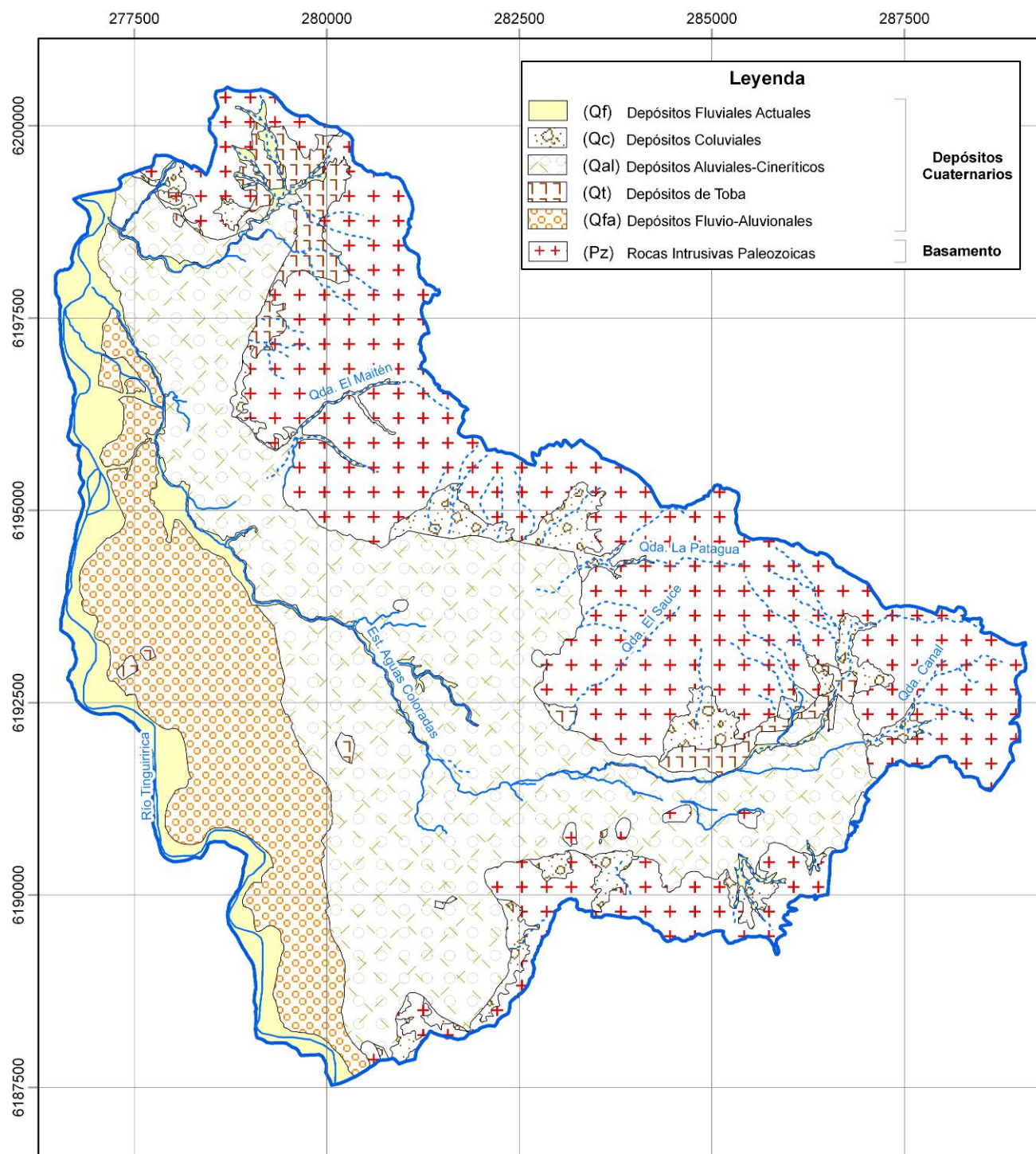
Depósitos Coluviales (Qc): Corresponden a sedimentos gruesos inmersos en una matriz fina limo-arcillosa de origen gravitacional. Se ubican en las faldas de cerros del basamento, en donde éste ha experimentado diversos procesos de fragmentación y meteorización. Los fragmentos derivados de estos procesos, posteriormente son removidos y depositados, siendo altamente caóticos. En la zona del proyecto, se ubican en los faldeos de los cerros que disponen al este de la rinconada.

Estos depósitos presentan una alta permeabilidad, si bien estos no constituyen acuíferos, conforman zonas de recarga al sistema acuífero.

Depósitos Fluviales Actuales (Qf): Estos depósitos corresponden a gravas y arenas de origen fluvial. Principalmente están asociados al río Tinguiririca y a esteros del sector de rinconada. La redondez y esfericidad de los clastos depende de su grado de transporte, esto es, un alto grado de transporte para el río Tinguiririca, el cual nace en la Cordillera Andina y un bajo grado de transporte para quebradas nacientes dentro del área del proyecto.

Se considera que estos cauces presentan una permeabilidad alta.





**Figura N°7.3:** Mapa Geológico de Sector Pichidegua basado en fotointerpretación y en la Carta Hidrogeológica de Chile N°1, Hoja Rancagua (Sernageomin, 1990).



## **Geología Estructural**

Los sectores de estudio, se encuentran al sur de la Anomalía Melipilla, una transición geológica en el valle del río Maipo. La anomalía Melipilla responde a la presencia de un cuerpo tabular no magnético, dispuesto en forma subhorizontal en niveles intermedios de la corteza superior (~4-6 km), e inmerso en un batolito presumiblemente jurásico y fuertemente magnético (Yáñez et al., 1998). Este pilar en compresión, o bloque rígido, habría constituido una barrera natural para la deformación tectónica observada en los granitoides jurásicos al norte del río Maipo. En este contexto, el cuerpo tabular no magnetizado que genera a la Anomalía Melipilla, se ha interpretado como la zona de despegue que permite acomodar la deformación contra el bloque rígido dispuesto en dirección sur.

El patrón estructural al sur de la Anomalía Melipilla es diferente al norte, predominando estructuras NNW, NNE. Es así como al sur del río Maipo aflora la secuencia estratificada jurásico-mesozoica dispuesta en contacto depositacional sobre granito paleozoico; mientras que inmediatamente al norte, se exponen bloques de granitos paleozoicos incluidos en intrusivos jurásicos y cretácicos.

La tectónica del sector, pertenece al dominio estructural oriental, definido por Sernageomin, 1996. Está formado por rocas intrusivas del batolito paleozoico, cretácico y en parte jurásico, y por secuencias volcano-sedimentarias del Jurásico al Cretácico Inferior, que constituyen un bloque monoclinial de rumbo NNE - NNW, cuyos estratos alcanzan una inclinación promedio de 40° E y localmente 70°E debido a flexuras y pliegues asociados a fallas o bordes de intrusivos. Las estructuras principales consisten en fallas NNE – NW y NS con pequeños desplazamientos de rumbo. Movimientos tectónicos, posiblemente post-pliocénicos, se manifiestan en inversiones hacia el este de la red de drenaje.

### **7.3.2 Unidades Geológicas, Suelos y Sectores de Cultivos**

#### **a) Sectores de Cultivos y Unidades Geológicas**

En la planicie de la Rinconada y en las terrazas asociadas al Río Tinguiririca, se desarrollan numerosos cultivos con técnicas de riego que utilizan diversos tipos de abonos: fertilizantes inorgánicos, purines de cerdo y mezcla de purines y guano de cerdos, los cuales pudieran constituir una fuente de nitratos al subsuelo. Por lo anterior, se ha contrastado la información de los cultivos que usan este tipo de abono con las unidades geológicas de superficie. La fuente de agua utilizada para el regadío de los cultivos corresponde al río Tinguiririca.

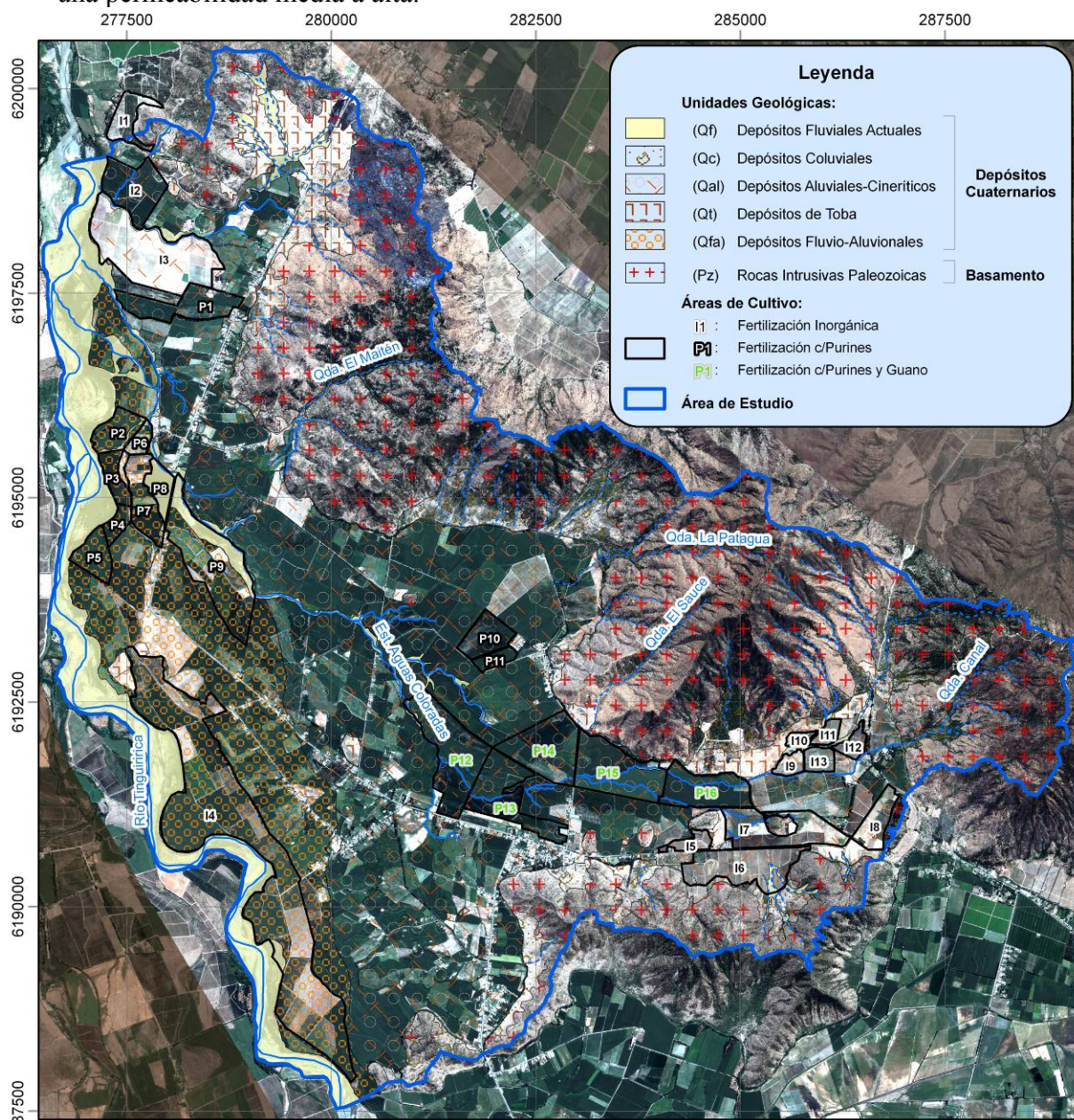
En la **Figura N°7.4**, se muestra la ubicación de los cultivos que utilizan técnicas de abono de fertilizantes inorgánicos, purines de cerdo y mezcla de purines y guano de cerdos, sobre el mapa hidrogeológico. Además, en la **Figura N°7.5** se presenta la geología de superficie, los cultivos, los fertilizantes aplicados, y el dirección de flujo de aguas subterráneas en el área del proyecto. La dinámica de aguas subterráneas se presenta con mayor detalle más adelante.

De acuerdo a esto y considerando la geología local y geomorfología del área del proyecto, se tiene que:

- ◆ Hacia el sureste de la Rinconada, se ubican los cultivos I9, I10, I11, I12 e I13 que utilizan fertilizantes inorgánicos y un sistema de riego por goteo. Se ubican en las cercanías de los faldeos de cerros (sobre todo los cultivos I10 e I11), sobre los depósitos aluviales cineríticos, con aportes de depósitos gravitacionales provenientes de los cerros. Si bien, en estos sectores los sedimentos presentan una granulometría más gruesa, los depósitos presentan una matriz cinerítica (tamaño limo y arcilla) que le otorga una baja permeabilidad. Por otra parte, el límite de estos cultivos está dado por la red de drenaje actual asociada a las quebradas del sector, lo cual contribuye con aportes de sedimentos más gruesos con escasa presencia de finos. Los sectores se caracterizan por presentar una permeabilidad media- alta.
- ◆ Hacia la ladera norte del Cerro Mancuman, se disponen los cultivos I5, I6, I7 e I8 que utilizan fertilizantes inorgánicos y un sistema de riego por goteo. Se ubican sobre depósitos aluviales cineríticos, y el cultivo I16 se ubica muy cercano a las faldas del cerro, por lo cual recibiría el aporte de depósitos coluviales provenientes de la meteorización del basamento. Los depósitos aluviales cineríticos presentan una permeabilidad baja a media, ya que presentan un alto contenido de sedimentos finos.
- ◆ Al sur del sector Rinconada, se ubican los cultivos P12, P13, P14, P15 y P16, los cuales utilizan fertilizantes de guano y purines, y un sistema de riego de surcos. Se disponen sobre depósitos aluviales cineríticos, y los cultivos se encuentran disectados por la red de drenaje asociada al estero Aguas Coloradas. Si bien los depósitos aluviales cineríticos presentan permeabilidad baja a media, los sectores del cauce presentarían una mayor permeabilidad.
- ◆ Hacia el centro del sector Rinconada y al Este del estero Aguas Coloradas se ubican los cultivos P10 y P11 los que utilizan fertilizantes de purines y un sistema de riego por surcos. Se disponen sobre depósitos aluviales cineríticos caracterizados por una permeabilidad baja a media.
- ◆ Hacia la confluencia del estero Aguas Coloradas al río Tinguiririca, se ubica el cultivo P1. Este cultivo utiliza fertilizantes de purines y un sistema de riego por surcos. Se dispone sobre depósitos aluviales cineríticos caracterizados por una permeabilidad baja a media.
- ◆ Al norte del sector de Rinconada (alrededor del estero sin nombre), se disponen los cultivos I2 e I3 que utilizan fertilizantes inorgánicos y un sistema de riego por goteo. El cultivo I2 se ubica cercano a las faldas de cerros y recibe el aporte de sedimentos más gruesos (gravilla y arena) y además, se encontraría disectado por un drenaje. Los depósitos aluviales cineríticos presentan una permeabilidad baja a media mientras que los sectores del cauce presentarían una mayor permeabilidad.
- ◆ En el límite norte del área del proyecto, se ubica el cultivo I1, que utiliza fertilizantes inorgánicos y un sistema de riego por goteo. Se ubica sobre depósitos coluviales, cuya permeabilidad es alta.



- En el sector sur del ambiente fluvial del río Tinguiririca, se ubica el cultivo I4, el cual utiliza fertilizantes inorgánicos y un sistema por goteo para el regadío. Este sector se ubica en los depósitos fluvio-aluvionales el cual está caracterizado por niveles gravosos y arenosos, intercalados con niveles arcillosos. La permeabilidad de este sector es media a alta.
- Hacia el sector de terraza del río Tinguiririca, sobre los depósitos fluvio-aluvionales, se disponen los cultivos P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 y P9 que utilizan como fertilizantes los purines y el sistema de riego por surco. Estos cultivos se ubican en el interfluvio desarrollado entre el río Tinguiririca y el estero Aguas Coloradas, por lo cual se esperaría una permeabilidad media a alta.



**Figura N°7.4a:** Unidades Geológicas de Superficie y cultivos según el tipo de fertilizantes.



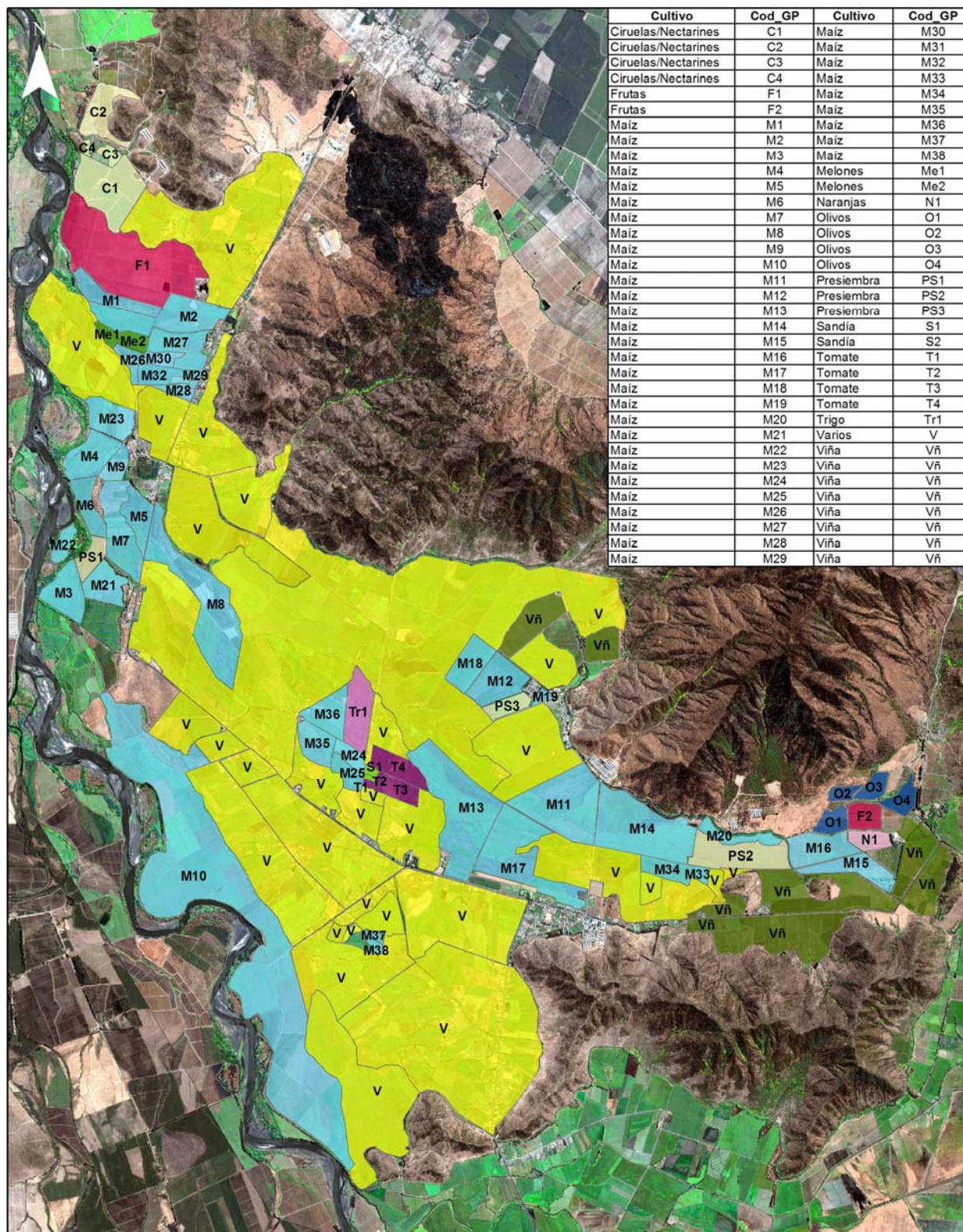
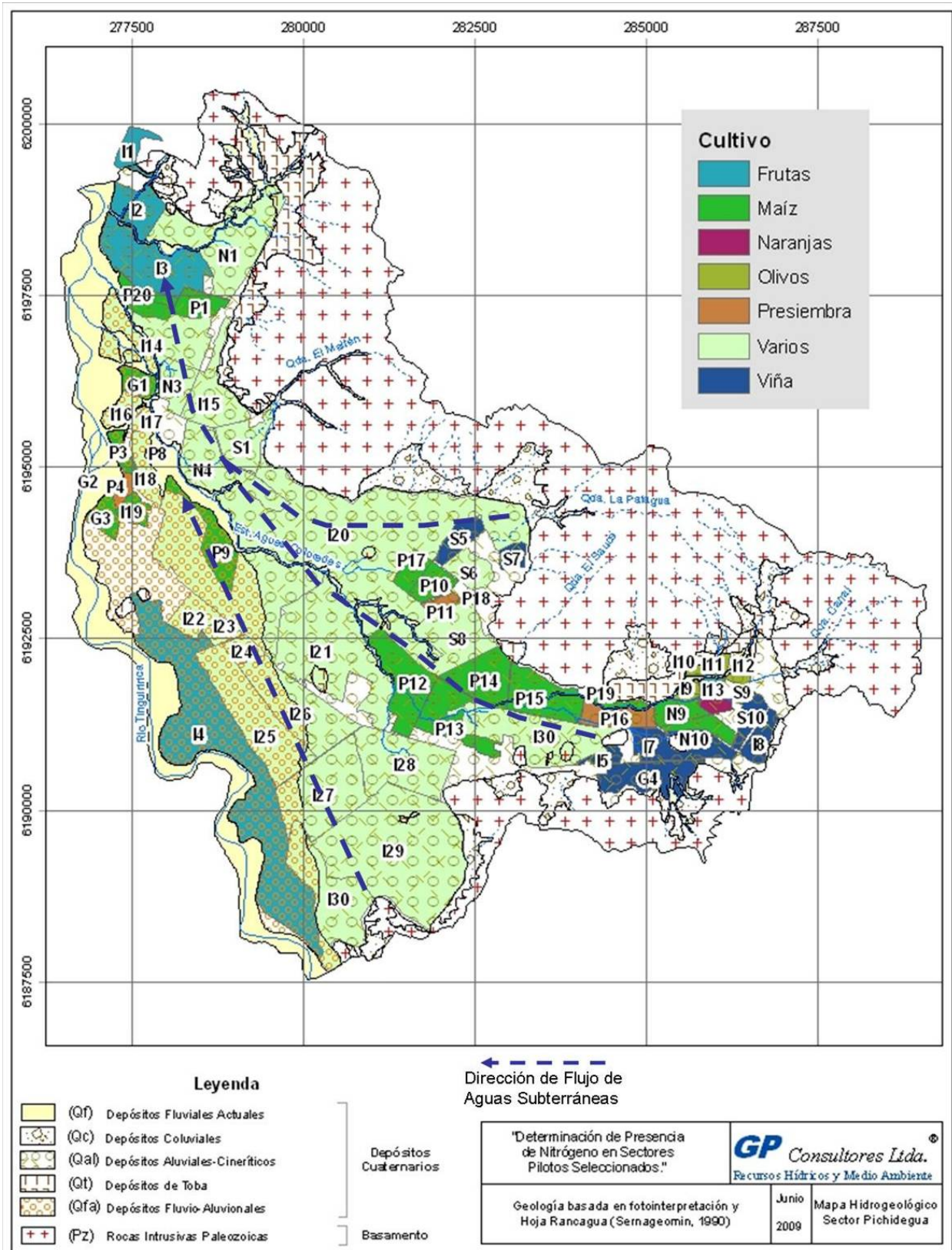


Figura N°7.4b: Tipos de Cultivos.





**Figura N°7.5:** La geología de superficie, los cultivos, los fertilizantes aplicados (donde, I = Inorgánico, P = Purines, G = Guanos), y el dirección de flujo de aguas subterráneas en el área del proyecto.

## **b) Series de Suelos y Unidades Geológicas**

Para el sector Pichidegua, se consideró la descripción de suelos hecha por CIREN (1996), la cual incluye varios tipos de series (ver **Figura N°7.6**), denominadas y caracterizadas como:

- ◆ La serie *Lo Vásquez (LVZ)* corresponde a la meteorización de rocas graníticas (basamento), que deriva a suelos evolucionados, en superficie, y que está compuesto por abundante gravilla de cuarzo y arcilla. En el área del proyecto esta serie se desarrolla directamente sobre el basamento rocoso, en la parte alta de los cerros que conforman la cuenca, constituidos por granitos paleozoicos.

También se han clasificado según esta serie, los suelos ubicados hacia el noreste, sureste y correspondientes a pequeños afloramientos de depósitos de toba (Qt), por lo cual pudiesen estar mal clasificados. Asimismo, pudiesen estar mal clasificados los suelos ubicados en la ladera norte del Cerro Mancuman que de acuerdo con la geología corresponde a depósitos de origen coluvial.

- ◆ Las series *Millahue (MLH)*, *Larmahue (LRM)* y *Pichidegua (PCG)* constituyen suelos de origen coluvial, y son derivados de sedimentos graníticos asociados a los suelos de la serie Lo Vásquez. Estas series corresponden a suelos de pendiente ligeramente inclinada, de composición granítica, con fragmentos más gruesos tipo gravilla con abundantes cristales de cuarzo y mica. En el área del proyecto, estos suelos se disponen en las faldas de cerros ubicados hacia el centro y sureste de la rinconada.

Hacia el sur del área de proyecto, los suelos clasificado según estas series coinciden con la unidad geológica depósitos aluviales cineríticos (Qal) y depósitos de toba (Qt), por lo cual pudiesen estar mal clasificados estos suelos.

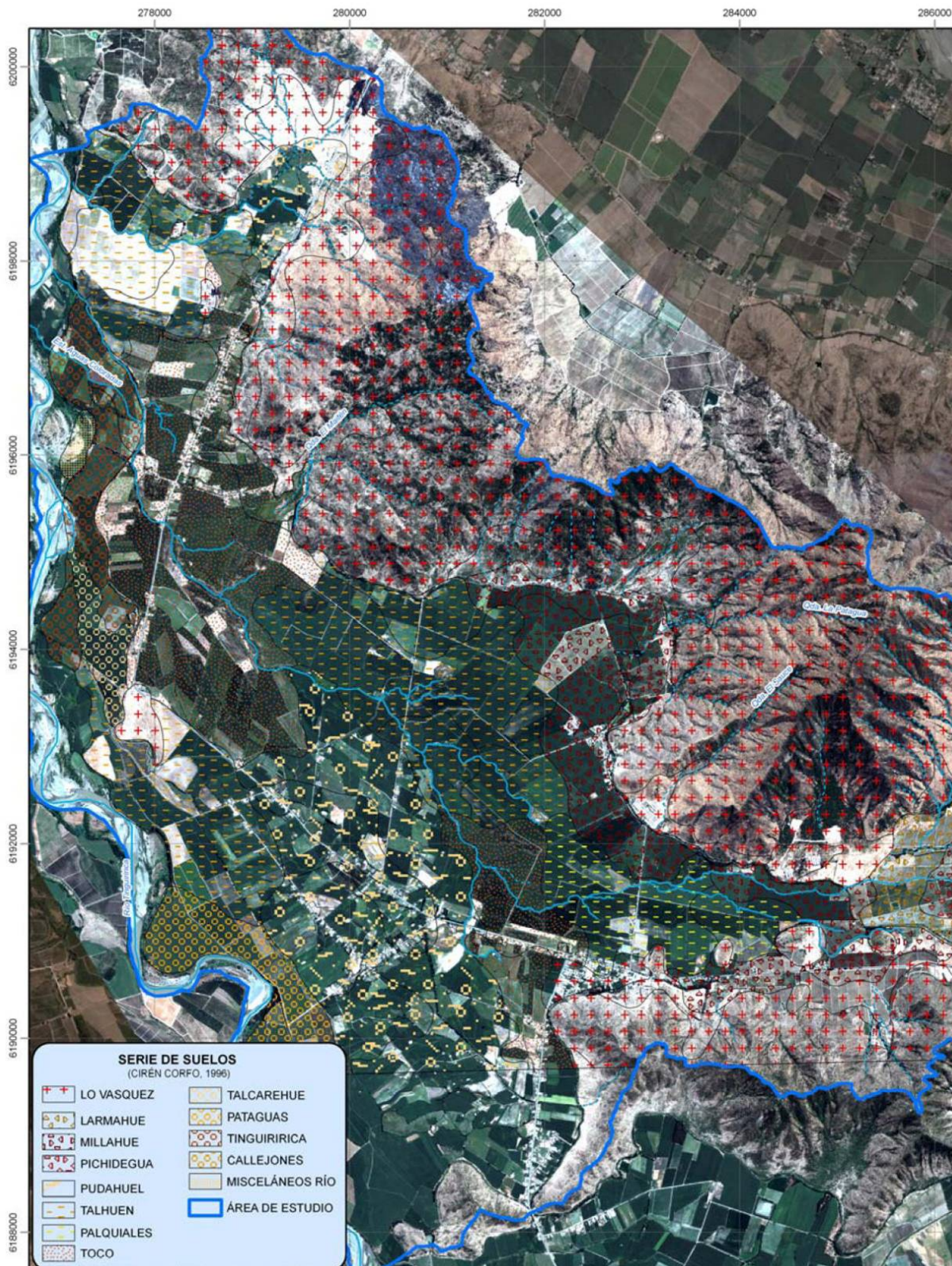
- ◆ La serie *Palquiales (PLQ)* constituye suelos que son característicos de una zona de sedimentación de aguas tranquilas, compuesta por arcillas y limos. Estos suelos corresponden a los ubicados en la planicie de la rinconada, hacia el sur y centro de ésta.
- ◆ La serie *Pudahuel (PUD)*, es un tipo de suelo caracterizado por la presencia de pómez y arenas pumílicas ubicándose en las partes bajas adosado al basamento, en lomas de topografía suave. En el área del proyecto, esta serie se dispone hacia el centro sur lo que es concordante con la descripción geológica de depósitos tobáceos y aluviales cineríticos (Qal) en el sector. Además, hacia el norte del área del proyecto, se describe la serie PUD, en parte, sobre depósitos tobáceos (Qt) y sobre depósitos aluviales cineríticos (Qal) lo que sería afín con la geología local.
- ◆ En el valle, también son descritas las series *Talhuén (TAH)* y *Toco (TOC)* los cuales se depositan en ambientes de cuenca de sedimentación (aluvial-aluvional) y se caracterizan por una disminución del tamaño de grano en profundidad y un abundante contenido de grava media a fina en todo el suelo.

Estas series se ubican a lo largo de todo el sector rinconada, lo cual concuerda con la unidad geológica depósitos aluviales cineríticos (Qal). Sin embargo, hacia el oeste, también se incluyen los suelos ubicados sobre los depósitos fluvio-aluvionales (Qfa) del río, lo cual es

contrario al ambiente de depositación de estas series y por ende, pudiesen estar mal clasificados.

- La serie *Talcarehue (TLH)*, es descrita como una terraza aluvial antigua, la serie *Pataguas (PTG)*, es descrita como la parte alta de terrazas aluviales, y por último las series *Tinguiririca (TIN)*, *Callejones (CJN)* y *Misceláneo Río (MR)* son descritas como depósitos de una terraza aluvial reciente. Estas series corresponden a depósitos del río Tinguiririca y se caracterizan por suelos estratificados de origen aluvial, constituido tanto por arenas, arcillas y limos como por gravas y bolones. Se ubican directamente sobre la unidad depósitos fluvio-aluvionales (Qfa) del río, por lo cual la ubicación de estas series, dentro del contexto geológico es coherente.





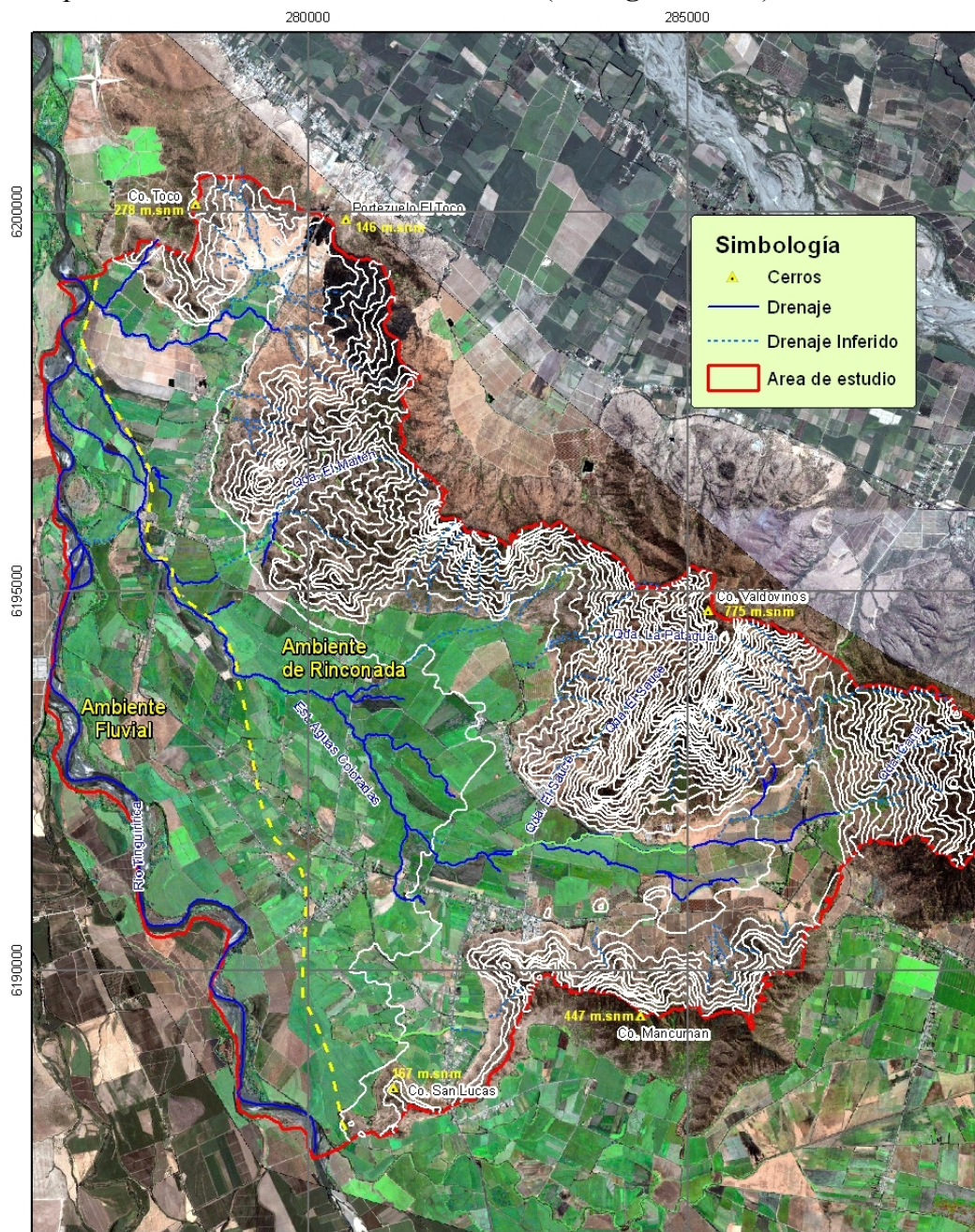
**Figura N°7.6:** Imagen satelital del sector piloto Pichidegua, con la indicación de las series descrita por CIREN (Base fotográfica: Google Earth, 2007 y Quick Bird)



## 7.4 GEOLOGÍA DE SUBSUPERFICIE

El sector piloto Pichidegua pertenece al tramo inferior de la cuenca del río Tinguiririca. Este río nace de los deshielos de la Cordillera de los Andes, se alimenta de un régimen pluvial en la Depresión Central y finalmente cruza hacia la Cordillera de la Costa desembocando en el lago Rapel.

En el área del proyecto, la cuenca se encuentra delimitada hacia el este por un cordón montañoso constituido por rocas intrusivas de edad Paleozoica (ver **Figura N°7.7**).



**Figura N°7.7:** Sector Pichidegua limita al Oeste con el Río Tinguiririca.

El relleno del valle se caracteriza por presentar dos ambientes de depositación:

- (a) El primero, corresponde a un ambiente fluvial, de alta energía de transporte asociado al río Tinguiririca, el cual escurre en el sector oeste del área del proyecto en sentido S a N;
- (b) El segundo, es un ambiente de rinconada, de baja energía de transporte y con drenaje local restringido, correspondiente al estero Aguas Coloradas, el cual se forma a partir de quebradas más pequeñas como El Maitén, La Patagua, El Sauce y Canal.

En ambos ambientes se han depositado diferentes sedimentos desde el Pleistoceno hasta la actualidad, cuya composición es variable.

En el sector de rinconada destacan los depósitos de toba distribuidos en forma de suaves lomajes y en sectores topográficamente bajos protegidos por el basamento; asimismo, y en los faldeos de los cerros se disponen los sedimentos coluviales; hacia el sector de la planicie se desarrollan los depósitos aluviales cineríticos, los cuales interdigitan con los depósitos fluvio-aluvionales asociados al río Tinguiririca; finalmente, y restringidos a los cauces actuales de río, quebradas y esteros se disponen los depósitos fluviales.

Para identificar y describir la geometría de las unidades hidrogeológicas se elaboran 2 perfiles transversales. En la **Figura N°7.8**, se muestra la ubicación tanto de los pozos con información estratigráfica como de los 2 perfiles hidrogeológicos con información. Asimismo, en la **Figura N°7.9** se presentan los perfiles hidrogeológicos.

A partir de la información antes mencionada se distinguen 6 unidades hidrogeológicas correspondientes a:

**Unidad Hidrogeológica 1:** Corresponde a un estrato conformado por arena fina y gravas con escasa presencia de arcilla. Está asociado a los cauces actuales de la red de drenaje actual, río Tinguiririca y estero Aguas Coloradas, por lo cual presenta continuidad lateral a lo largo y ancho de dichos cauces. Se estima que presente espesores que van desde los escasos metros hasta los 8 m. De acuerdo con sus características granulométricas, se espera que esta unidad presente una alta permeabilidad.

**Unidad Hidrogeológica 2:** Está conformada por los depósitos fluvio-aluvionales asociados a cauces antiguos del río Tinguiririca. Corresponde a lentes de grava-arena y arena fina inmersos en una matriz arcillosa y arcillo-limosa. Se observan variaciones granulométricas tanto laterales como en profundidad. Hacia los extremos de dichos depósitos aumenta la presencia de material fino así como también en profundidad (ver **Perfil B-B'**). Se reconoce un espesor de hasta 90 m (ver **Perfil A-A'**: Pozo Agrícola y Viñedos Marchigüe). Por sus características granulométricas, para los sectores constituidos por grava y arena se espera una permeabilidad media a alta mientras que en los conformados por arcillas y limos serían de permeabilidad baja.

De acuerdo con los datos de construcción de sondajes el nivel estático se encontraría entorno de los 5 a 10 m de profundidad.

**Unidad Hidrogeológica 3:** Esta unidad se desarrolla hacia el sector de rinconada, en donde se distingue un primer estrato conformado por arena fina limosa inmersa en matriz de ceniza. Su espesor reconocido es de hasta 23 m (ver Pozo APR El Caleuche; **Perfil B-B'**). El material cinerítico proviene principalmente de la erosión de los depósitos de toba (Unidad Hidrogeológica 5) distribuidas hacia los faldeos de los cerros y en los cerros islas. En general y dada la presencia de esta ceniza re trabajada se espera una permeabilidad media a baja. Infrayaciendo a esta unidad se presenta un estrato conformado por Arcilla arenosa con algunas intercalaciones o lentes de Arena. Estos lentes de arena estarían asociados a eventos fluviales antiguos del estero Aguas Coloradas. Su potencia reconocida alcanza los 53 m (ver Pozo APR El Caleuche). De acuerdo con sus características granulométricas se espera una permeabilidad media a baja.

De acuerdo con los datos de construcción de sondajes el nivel estático se encontraría entorno de los 3 m de profundidad.

**Unidad Hidrogeológica 4:** Corresponde a material coluvial ubicado en los faldeos de los cerros. Está conformado por grava fina, arena arcillosa, el cual interdigita en profundidad con la *Unidad Hidrogeológica 3*. Considerando la granulometría de esta unidad se espera que presente una alta permeabilidad, si bien no constituyen acuíferos conforman zonas de recarga al sistema acuífero.

**Unidad Hidrogeológica 5:** Corresponde a los depósitos de toba, los cuales se desarrollan hacia los faldeos de los cerros y cubriendo la parte alta de los cerros islas. Esta unidad estaría asociada a un evento volcánico cuyo material habría sido transportado por importantes torrentes de agua (Río Tinguiririca) o bien por el viento. Presenta un alto grado de consolidación, por lo cual se espera una permeabilidad baja a muy baja (casi impermeable).

**Unidad Hidrogeológica 6:** Corresponde al basamento rocoso, el cual corresponde a roca granítica. Se desconoce la profundidad que alcanza tanto en la Rinconada como hacia el valle principal del Tinguiririca. Sin embargo, se estima que estaría entorno de los 150 m. Esta unidad se considera impermeable.

Bajo esta perspectiva, en el sector de Pichidegua y en el valle principal del Tinguiririca se desarrollaría un acuífero del tipo libre, en la Unidad Hidrogeológica 2. Mientras que hacia el sector de la rinconada se tendría un acuífero confinado desarrollado en la Unidad Hidrogeológica 3, en donde el estrato de ceniza sería la unidad confinante, mientras que el estrato que la infrayace albergaría dicho acuífero.



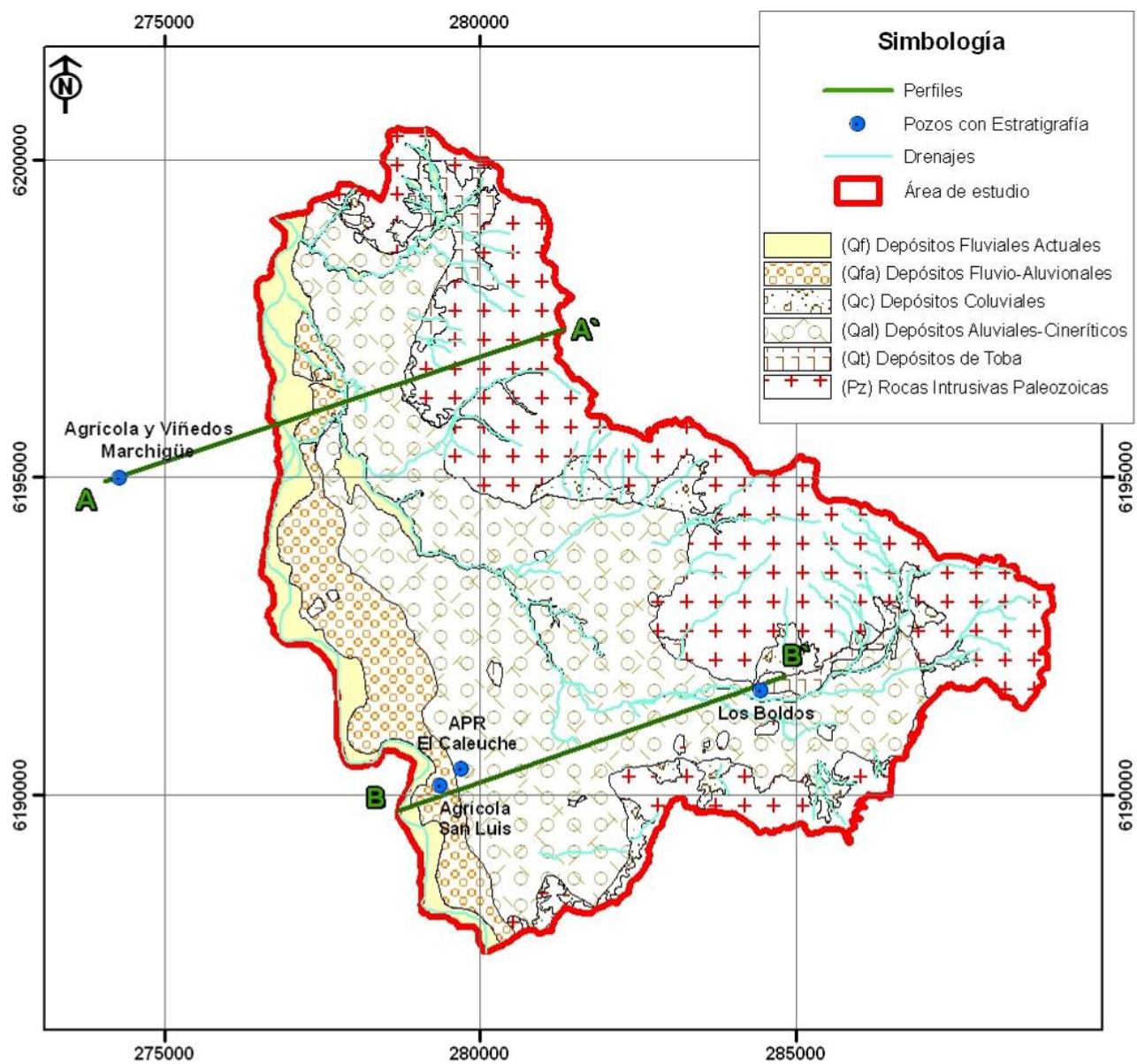
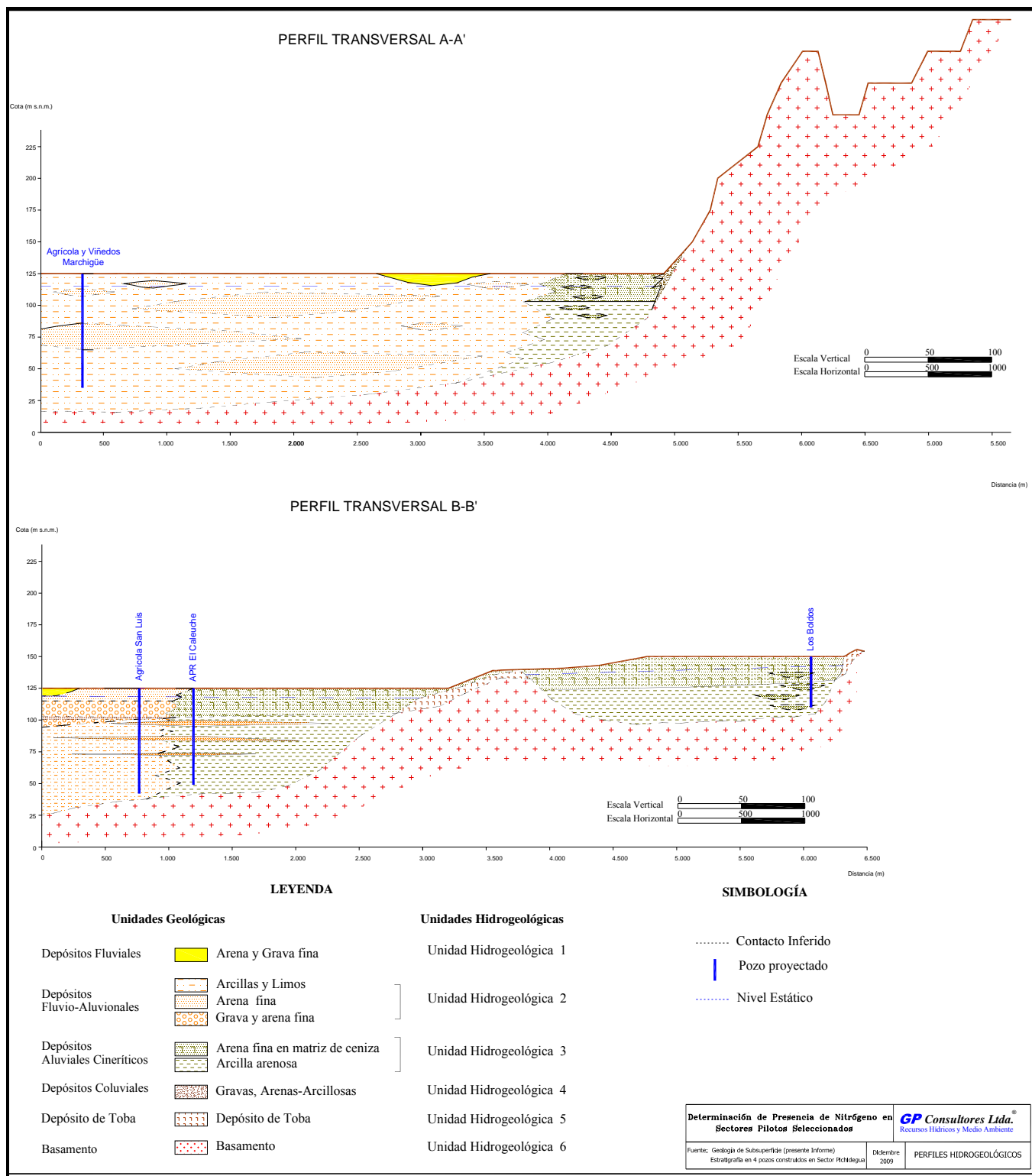


Figura N°7.8: Ubicación de Perfiles los Hidrogeológicos y de los Pozos con Información Estratigráfica





**Figura N°7.9:** Perfiles Transversales A-A' y B-B'.

## **7.5 DINÁMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

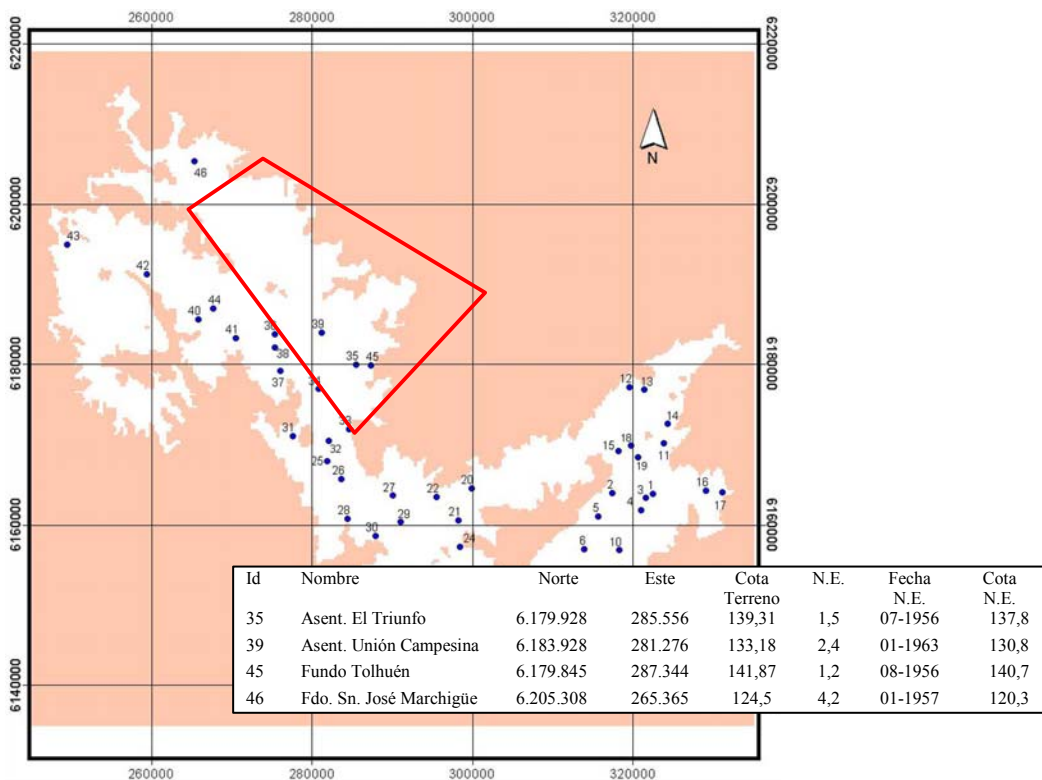
### **7.5.1 Antecedentes**

En la zona del proyecto existen algunos antecedentes asociados a los flujos subterráneos, básicamente presentes en estudios previos desarrollados en el área. A continuación se presenta la información recopilada, la que incluye una breve descripción del sistema de flujo en el sector Pichidegua, así como también, de una interpretación del nivel del agua subterránea en los pozos, incluyéndose datos de profundidad de la napa freática.

El flujo subterráneo posee una dirección paralela a la dirección del río Tinguiririca. Los aportes desde las zonas de quebradas se dirigen hacia el sector del río Tinguiririca, para luego curvarse y continuar paralelo a él. Las principales direcciones de Flujo se representan en la **Figura N° 7.10**, las cuales han sido obtenidas del informe SDT 209 de la Dirección General de Aguas.

Respecto de la profundidad de la napa freática de la zona de proyecto, en ese mismo estudio se presentan pozos de observación existentes en la zona, los cuales se presentan en la **Figura N° 7.11**. Los datos disponibles son de larga data (1950`s – 1960`s), en donde para esa fecha, los niveles de las aguas subterráneas, en los pozos monitoreados, se encontraban entre 1,2 y 4,2 metros bajo la superficie de terreno.





**Figura N°7.11:** Pozos de Observación de niveles del agua subterránea (cuenca del río Tinguiririca). En rojo se delimita la zona del proyecto asociada al sector Pichidegua.

### **7.5.2 Niveles Freáticos y Direcciones de Flujo**

Durante el desarrollo del proyecto fueron efectuadas nuevas mediciones del nivel de las aguas subterráneas en el sector de Pichidegua, las cuales estuvieron orientadas a la caracterización de la dinámica de las aguas subterráneas. Se efectuaron las siguientes mediciones:

- Levantamiento Topográfico de Norias y Pozos seleccionados.
- Medición de Nivel Freático (realizado previo al inicio del riego).

A continuación se describen las actividades realizadas.

#### **Levantamiento Topográfico:**

Durante el año 2010 se llevó a cabo un levantamiento topográfico en norias y pozos seleccionados del sector, para que -en conjunto a las mediciones del nivel freático- permitiese identificar las direcciones del flujo de las aguas subterráneas del sector.

El levantamiento topográfico fue realizado con GPS geodésicos. La topografía fue efectuada en pozos y norias seleccionadas, donde pudo medirse el nivel freático en condiciones sin explotación, previo al período de riego.

A continuación se presentan los resultados obtenidos del levantamiento topográfico efectuado en septiembre del 2010.



**Tabla N°7.1:** Levantamiento topográfico en pozos y norias seleccionados del sector Pichidegua.

ID Pozo	Este (m)	Norte (m)	Altura Brocal. (m)	Altura Terreno (m)
5	283.171	6.191.967	156,646	155,671
3	283.071	6.191.346	156,912	156,672
4	283.222	6.191.451	157,32	156,635
8	284.648	6.192.001	170,231	169,976
23	280.746	6.193.438	145,798	145,453
20	280.195	6.190.991	145,607	145,607
13	286.780	6.192.501	188,939	188,844
15	286.316	6.191.479	176,18	175,485
16	285.560	6.190.584	191,977	191,297
17	282.097	6.189.007	157,445	157,295
18	282.246	6.189.241	157,064	156,919
1	282.570	6.191.186	155,17	154,97
25	279.343	6.193.497	143,054	142,979
30	279.344	6.198.120	153,594	153,629
29	278.654	6.196.638	140,351	140,256
24	280.583	6.194.438	145,933	145,433

**Nota:** Coordenadas referidas al datum WGS 84. Huso UTM Zona 19S.

### Medición de Niveles Freáticos:

En la **Tabla N°7.2** se presenta la medición de niveles freáticos en todos aquellos pozos y norias a los cuales se tuvo acceso durante la campaña de mediciones efectuada en septiembre de 2010 (período previo al inicio de la temporada de riego).

Las mediciones de nivel, referidas a un sistema común, establecido mediante el levantamiento topográfico realizado en estos puntos de interés, permite comparar el nivel energético de las aguas subterráneas espacialmente, visualizar diferencias entre el sistema subterráneo somero y profundo, y estudiar las direcciones de flujo de las aguas subterráneas.

De acuerdo a las mediciones presentadas, se observa que la profundidad de la napa freática de la zona del proyecto, se ubica entre 0,6 a 9,2 m de profundidad en el sistema somero (12 mediciones distribuidas en el área del proyecto), en tanto que, entre 0,8 a 7,6 m de profundidad en el sistema profundo (4 mediciones concentradas en el sector sur oriente de la cuenca).

Por otro lado, comparando el nivel energético en los sistemas somero y profundo (ver **Figura N°7.12**), se observa que las norias poseen niveles superiores a los que presentan los pozos profundos en áreas cercanas, lo que corrobora que se trataría de dos sistemas distintos, existiendo una posibilidad de infiltración desde el sistema superior/somero al profundo, el cual estaría limitado por la presencia de la capa de arcilla en el sector donde se ubican los pozos 3, 4, 5 y 8.

**Tabla N°7.2:** Mediciones de nivel freático en pozos y norias seleccionadas en el sector Pichidegua (campaña septiembre 2010).

Pozo ID	Altura Brocal m.snm	Nivel Estático m.bnb	Cota Nivel Estático m.snm
5	156,646	0,795	155,851
3	156,912	4,268	152,644
4	157,32	5,563	151,757
8	170,231	7,63	162,601
23	145,798	1,875	143,923
20	145,607	1,203	144,404
13	188,939	2,428	186,511
15	176,18	3,625	172,555
16	191,977	9,168	182,809
17	157,445	2,525	154,92
18	157,064	2,346	154,718
1	155,17	2,13	153,04
25	143,054	2,912	140,142
30	153,594	1,665	151,929
29	140,351	0,588	139,763
24	145,933	1,75	144,183

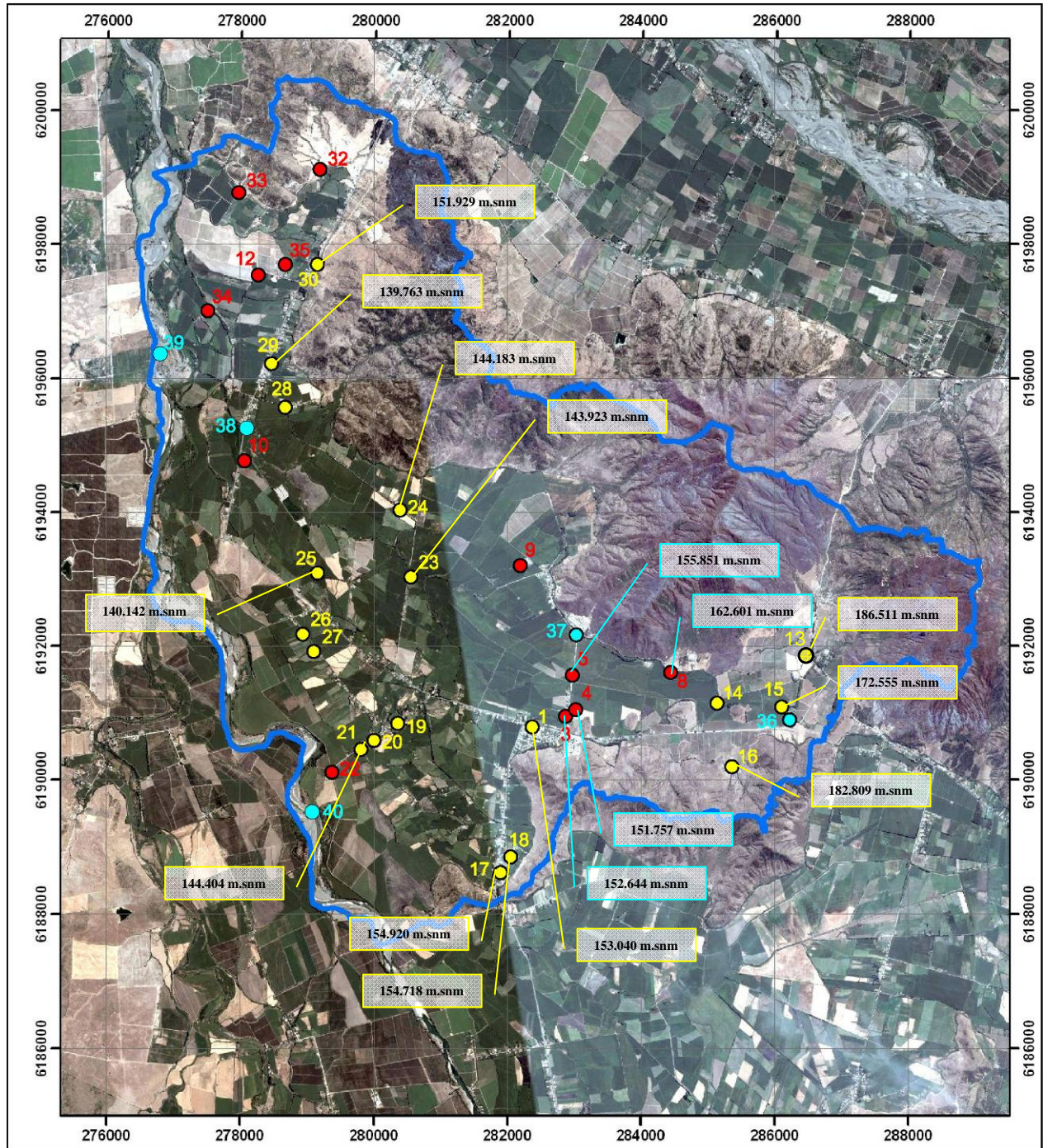


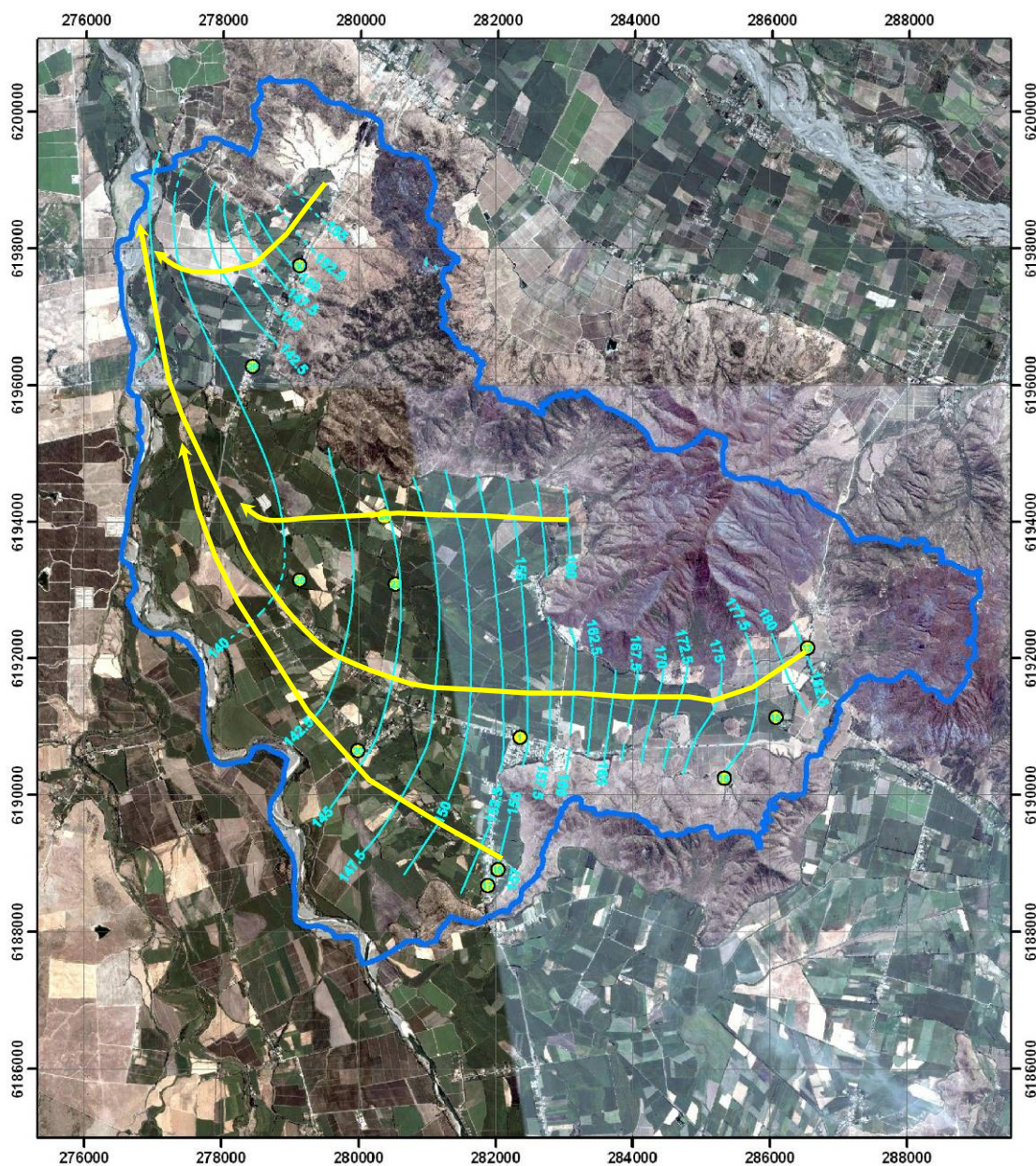
Figura N°7.12: Mediciones de Nivel Freático en Pozos (Rojo) y Norias (Amarillo), Septiembre 2010. Sector Pichidegua.



### Direcciones de Flujo de las Aguas Subterráneas:

Respecto al flujo de las aguas subterráneas, no existen suficientes mediciones en el sistema profundo (acotado a las mediciones en los pozos ubicados en el sector sur-oriente).

Por otro lado, en el sistema somero se observa que un flujo en dirección paralela al río Tinguiririca. Los aportes desde las zonas de quebradas se dirigen hacia el sector del río Tinguiririca, para luego curvarse y continuar paralelo a él. Las principales direcciones de Flujo se representan en la **Figura N°7.13**, las cuales han sido obtenidas de las mediciones de niveles efectuadas durante septiembre de 2010.



**Figura N°7.13:** Equipotenciales (curvas celeste) y direcciones de Flujo de las Aguas Subterráneas (líneas amarillas), Sistema Acuífero Somero, Septiembre 2010.



## **8. CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA E ISOTÓPICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS**

---

Se presentan los resultados obtenidos en las campañas de monitoreo efectuados para caracterizar química e isotópicamente las aguas subterráneas. Se presentan en forma separada para los dos “sectores pilotos” donde se desarrolla el proyecto.

### **8.1 SECTOR SAN PEDRO**

#### **8.1.1 Catastro de Pozos y Norias en el Sector San Pedro**

Los monitoreos de las aguas subterráneas se realizan en pozos y norias existentes. Para efectuar lo anterior, primero se efectúa un reconocimiento en terreno para identificar los pozos y norias que sean de utilidad para los objetivos del proyecto.

En **Tabla N°8.1** se presenta el listado de los pozos catastrados en terreno, incluyendo los pozos con derechos constituidos de aprovechamiento de aguas subterráneas. En las **Figuras N° 8.1 y 8.2** se presenta la ubicación de esos pozos, distribuidos en zonas NorEste y SurOeste, respectivamente.

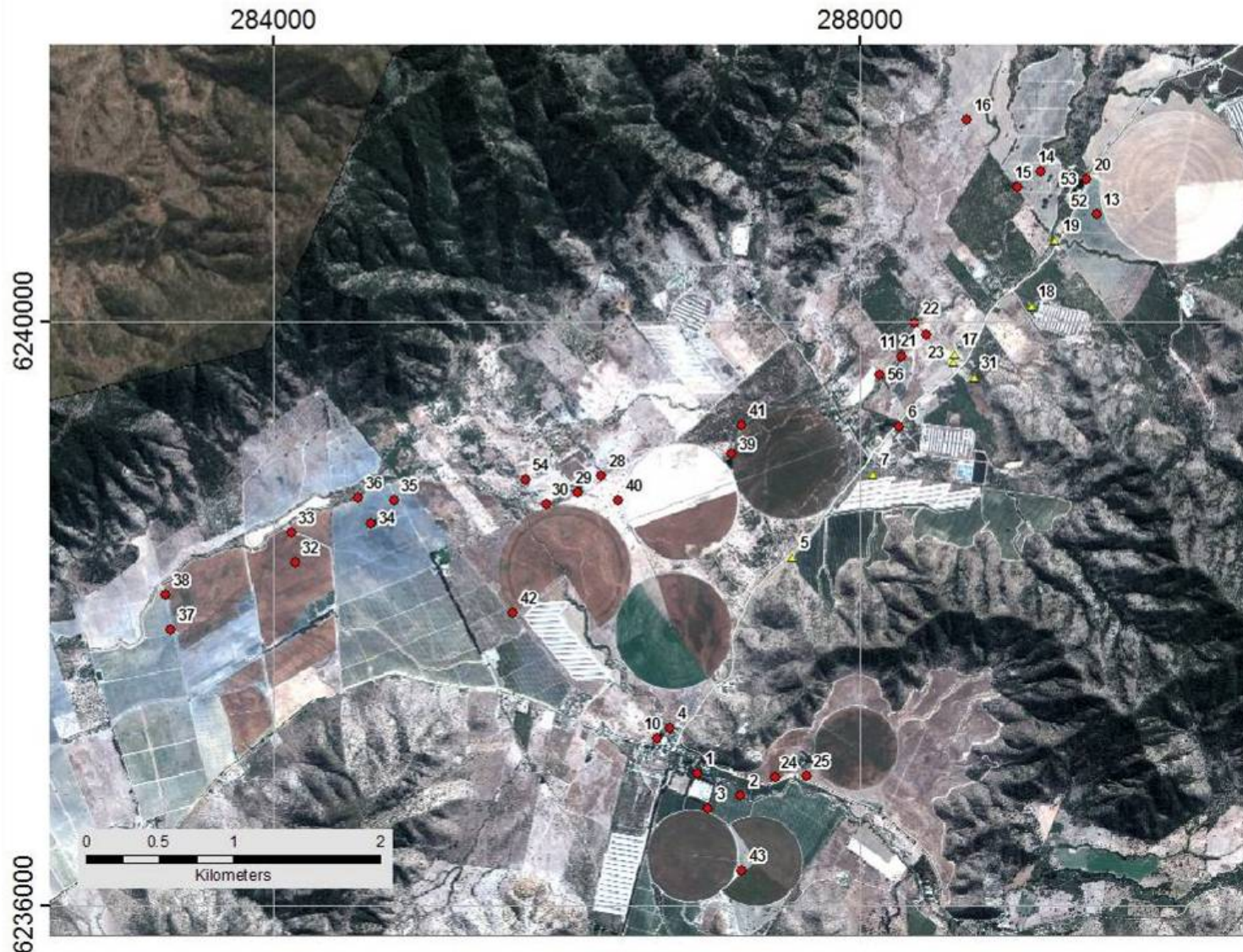
Los pozos y norias reconocidos y que se incluyen en el informe, se ubican en terrenos privados, cuyos propietarios han autorizado su inclusión en el presente catastro y su monitoreo.

**Tabla N°8.1:** Catastro de Pozos y Norias y su información disponible en el Sector San Pedro

Pozo ID	Este	Norte	Tipo de Punto	Profundidad (m)	Caudal (L/s)	Res DGA	Método de muestreo
1	286436	6236819	pozo profundo			No	del pozo
2	286709	6236582	pozo profundo	67	15	287	descarga en tranque
3	287007	6236424	pozo profundo		20	395	descarga en tranque
4	286785	6236342	pozo profundo		15	928	descarga en tranque
5	286524	6236889	noria	13.8		No	del pozo
6	287356	6238055	pozo profundo			No	del pozo
7	288087	6238958	noria			No	del pozo
8	278204	6244371	pozo profundo		20	No	descarga en tranque
9	278478	6243531	pozo profundo		20	No	descarga en tranque
10	278027	6243155	pozo profundo	90	10	612	descarga en tranque
56	287956	6239313	pozo profundo	67	60	881, pozo 3	mezcla de aguas descargada en tranque
11	288098	6239436	pozo profundo	60	45	413	mezcla de aguas descargada en tranque
13	289430	6240407	pozo profundo	30	4	413, pozo 4	no es posible
14	289047	6240697	pozo profundo	32	10	413	descarga en tranque
15	288893	6240592	pozo profundo	37	9	413, pozo 3	mezcla de aguas descargada en tranque
16	288547	6241051	pozo profundo	35		413, pozo 5	mezcla de aguas descargada en tranque
17	288463	6239451	noria	21.3		No	del pozo
18	289168	6240109	noria	20.3		No	del pozo
19	289331	6240564	noria	16		No	del pozo
20	289361	6240650	pozo profundo			No	descarga en tranque
21	288267	6239586	tubo			No	no es posible
22	288193	6239664	pozo profundo	60	26	881, pozo 1	mezcla de aguas descargada en tranque
23	288454	6239401	noria	30		No	del pozo
24	287241	6236555	pozo profundo	60		652, pozo 1	del pozo
25	287451	6236559	pozo profundo	70		652, pozo 2	no es posible
26	278406	6236870	pozo profundo	70		904, pozo 1	no es posible
27	278451	6236676	pozo profundo	70		904, pozo 2	del pozo
28	286055	6238618	pozo profundo			No	del pozo
29	285894	6238500	pozo profundo			No	no es posible
30	285680	6238424	pozo profundo	75		499	del pozo
31	288598	6239288	noria			No	del pozo
32	283970	6238024	pozo profundo	76	11	708	descarga en tranque
33	283942	6238231	pozo profundo	42	20	No	descarga en tranque
34	284487	6238288	pozo profundo		0	No	descarga en tranque
35	284644	6238451	pozo profundo		10	No	descarga en tranque
36	284401	6238467	pozo profundo	50	30	No	descarga en tranque
37	283124	6237559	pozo profundo			No	descarga en tranque
38	283087	6237805	pozo profundo	78	25	704	descarga en tranque
39	286943	6238765	pozo profundo			No	descarga en tranque
40	286172	6238450	pozo profundo			No	descarga en tranque
41	287016	6238961	pozo profundo			No	descarga en tranque
42	285453	6237682	pozo profundo			No	del pozo
43	287016	6235911	pozo profundo			No	descarga en tranque
44	277496	6237886	pozo profundo			23	del pozo
45	277033	6238043	pozo profundo			23	del pozo
46	276769	6238460	pozo profundo			695	del pozo
47	276261	6240055	pozo profundo			130	del pozo
48	280437	6233846	pozo profundo			No	del pozo
49	280244	6233719	pozo profundo			969	del pozo
50	280150	6233897	pozo profundo			460	del pozo
51	280573	6230054	noria			No	del pozo
54	285538	6238588	pozo profundo	85		367	del pozo
53			descarga			No	mezcla de aguas descargada en tranque
52			descarga			No	mezcla de aguas descargada en tranque
55			pozo profundo			No	del pozo

**Nota1:** Los datos faltantes de profundidad y caudal de bombeo de los pozos/norias se deben a que dicha información era desconocida o no fue proporcionada por sus propietarios.

**Nota2:** Coordenadas tomadas con GPS Navegador referidas al datum WGS 84. Huso UTM Zona 19S.



**Figura N°8.1:** Catastro de pozos (rojo) y norias (amarillo), encontrados en la zona NorEste del sector San Pedro. Los números en la figura corresponden al campo “pozo ID” de **Tabla N°8.1.**



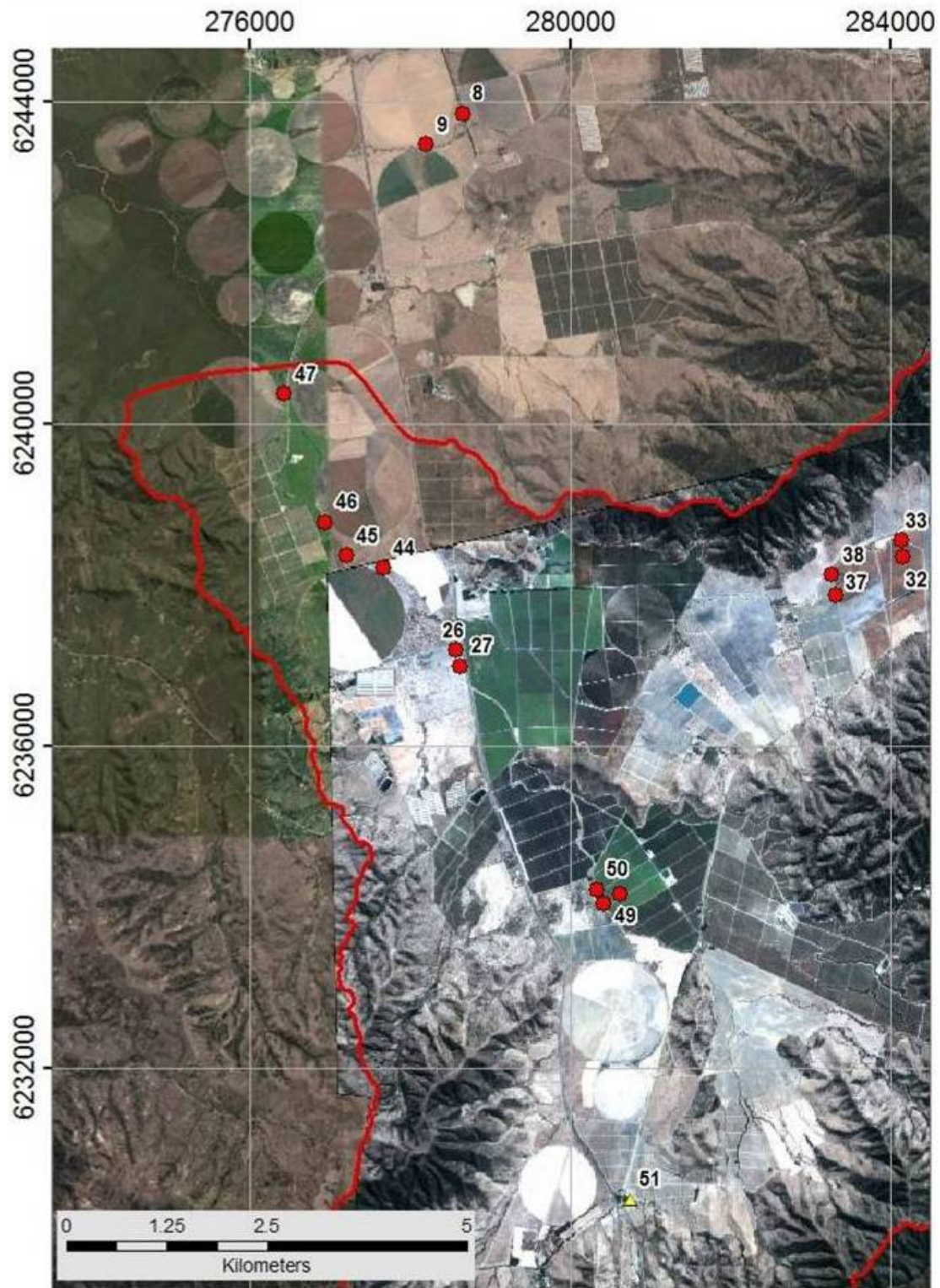


Figura N°8.2: Catastro de pozos (rojo) y norias (amarillo), encontrados en la zona SurOeste del sector San Pedro.  
Los números en la figura corresponden a la columna “pozo ID” de **Tabla N°8.1**.



### **8.1.2 Mediciones Hidroquímicas**

Se efectuó un total de 6 campañas de monitoreo en el sector de San Pedro.

Se realizó una primera campaña de monitoreo en enero de 2009, para obtener una primera caracterización de las aguas en todos los pozos encontrados. Su resultado permite visualizar en forma preliminar los niveles de nitratos y seleccionar los pozos donde se realizarán análisis químicos completos en las campañas siguientes. La campaña de Enero 2009 representa la época seca, en la cual se esperan niveles más profundos del agua subterránea (referidos a la superficie del terreno).

Las campañas restantes, desarrolladas en abril de 2009, abril y septiembre de 2010, abril y octubre de 2011, fueron realizadas para efectuar un seguimiento en el tiempo de la calidad de las aguas subterráneas en los pozos seleccionados, incluyendo muestreos estacionales, que permitiesen identificar variaciones en el tiempo.

Las mediciones consideraron análisis de macroelementos químicos y elementos traza seleccionados, en donde como mínimo se analizó: boro, calcio, hierro, potasio, magnesio, sodio, estroncio, zinc, bicarbonato, carbonato, cloruro, nitrógeno amoniacal, nitrógeno total, nitratos, fósforo, sulfato, y el carbono orgánico disuelto. Todos los resultados se expresan en mg/L. Los resultados de los análisis químicos efectuados se presentan en el **Anexo E**.

#### **a) Monitoreo Preliminar (Enero de 2009)**

Los análisis realizados incluyen mediciones *in situ* de conductividad eléctrica (a 25°C), temperatura, pH y oxígeno disuelto. Además, se midió en terreno nitratos y cloruros en todas las muestras, mientras que en las muestras de norias se midió adicionalmente nitrógeno total. En algunos pozos profundos, elegidos aleatoriamente, se midió adicionalmente nitrógeno total y sulfatos.

#### **◆ Mediciones In - Situ**

##### **Norias (7 puntos de monitoreo):**

Los valores de conductividad eléctrica de las aguas están en un rango entre 282 y 510  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura N°8.3**) con un promedio de 346  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , el cual es similar al promedio de conductividad eléctrica de los pozos (375  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Considerando que estas norias son bombeadas regularmente, sus aguas representan las aguas del acuífero somero.

Los valores de oxígeno disuelto son normales, entre 3,54 y 6,89 mg/L (**Figura N°8.4**), con excepción de un valor bajo de 1,34 mg/L (Noria 23), el que podría representar condiciones reductoras que promueven la desnitrificación.

Respecto a los valores de N-Nitrato (**Figura N°8.5**) en pozos someros (norias), éstos presentaron valores inferiores a 10 mgN/L, salvo por las norias 5 y 31, las que presentaron concentraciones de 16 y 12 mgN/L, respectivamente.

### **Pozos (32 puntos de monitoreo):**

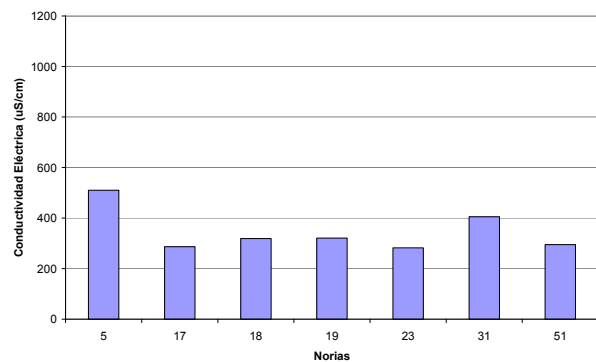
La conductividad eléctrica de las aguas de los pozos, medidas en la primera campaña, están comprendidas en un rango entre 219 y 1.063  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura N°8.6**). La conductividad eléctrica promedio de 375  $\mu\text{S}/\text{cm}$  sugiere que generalmente la concentración de los iones disueltos en los pozos profundos del sector es baja. Este valor promedio de conductividad eléctrica podría representar un estándar natural del flujo de aguas en el/los acuífero(s).

Los pozos con conductividades más altas son: Pozo 47, Pozo 46 y Pozo 54, con valores de 1.063, 718 y 803  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente. El agua en estos pozos representa a las aguas del acuífero ya que ellos son bombeados regularmente. Sin embargo, las aguas de estos pozos presentan concentraciones más altas de nitratos y cloruros, lo que indica que el aporte de sales podría en parte provenir desde una fuente particular en el sistema de flujo.

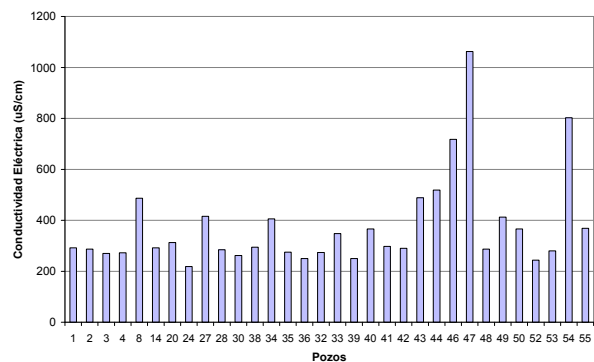
Respecto a los valores de oxígeno disuelto (**Figura N°8.7**) en pozos profundos, éstos presentan un rango entre 3,11 y 9,4 mg/L. Estas magnitudes no son lo suficientemente bajas como para indicar la existencia de ambientes reductores que pudiesen promover la desnitrificación. Tampoco son tan altas, como para sugerir que el bombeo estuviese incorporando oxígeno a las muestras.

Respecto a los valores de N-Nitrato (**Figura N°8.8**), en esta campaña de monitoreo se observan valores menores a 10 mg N/L (límite permisible para consumo humano), con excepción de los siguientes pozos: Pozo 20 (15 mg N/L), Pozo 40 (14 mg N/L), Pozo 43 (27 mg N/L), Pozo 46 (12 mg N/L) y Pozo 47 (15 mg N/L).

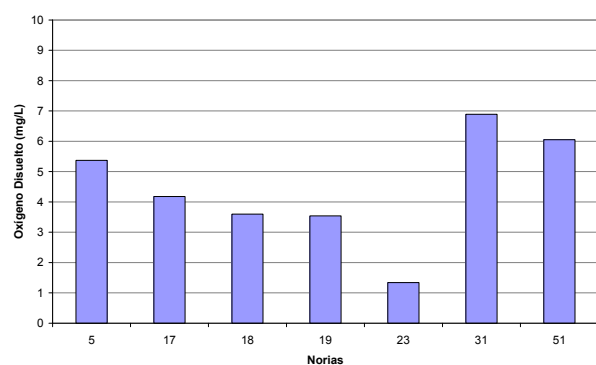
En el **Anexo E** se presentan los resultados de los análisis físico-químicos efectuados en terreno de: Temperatura, CE, pH, OD,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Nitrógeno total, N-Nitratos y Cl<sup>-</sup>.



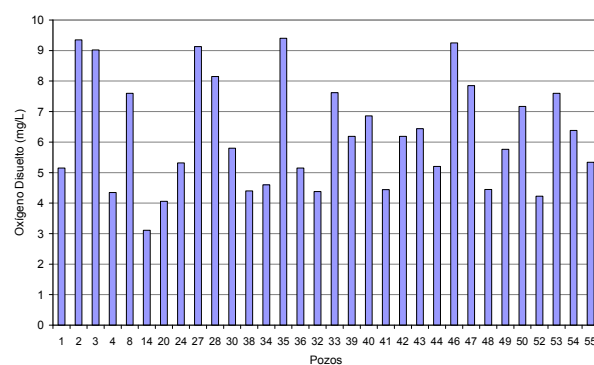
**Figura N°8.3:** Conductividad específica (25°C) en norias medidas durante la campaña preliminar (enero 2009).



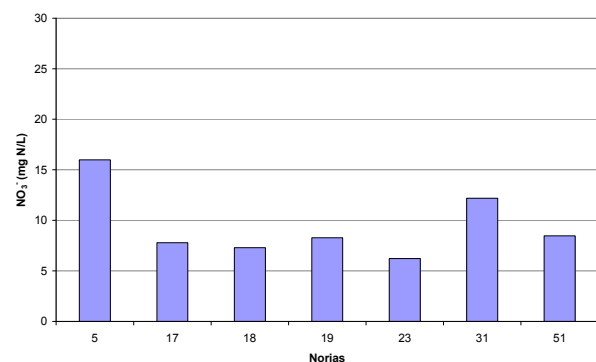
**Figura N°8.6:** Conductividad específica (25°C) en pozos, medidas durante la campaña preliminar (enero 2009).



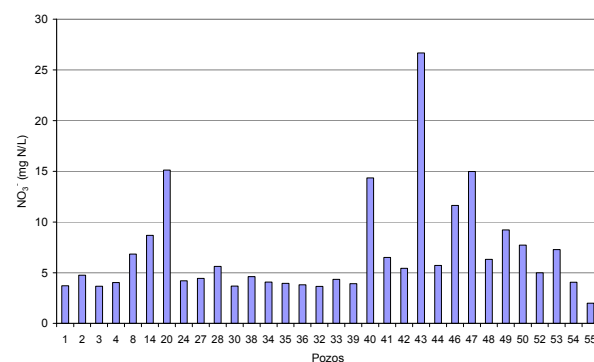
**Figura N°8.4:** Concentraciones de oxígeno disuelto en norias medidas durante la campaña preliminar (enero 2009).



**Figura N°8.7:** Concentraciones de oxígeno disuelto en pozos, medido durante la campaña preliminar (enero 2009).



**Figura N°8.5:** Concentraciones de N-NO<sub>3</sub> en aguas de norias, medidas durante la campaña preliminar (enero 2009).



**Figura N°8.8:** Concentraciones de de N-NO<sub>3</sub> en aguas de pozos, medido durante la campaña de enero 2009.

♦ **Selección de Pozos para ser Monitoreados durante el Período del Proyecto**

En la **Tabla N°8.2** se presentan los pozos seleccionados para efectuar los análisis químicos completos de sus aguas durante el período del proyecto. La justificación de su selección se presenta en la misma tabla, aplicándose los siguientes criterios generales:

- Ubicación del pozo con respecto al flujo de las aguas subterráneas.
- Ubicación del pozo con respecto a otros pozos.
- Ubicación del pozo con respecto a donde se aplican los purines u otras potenciales fuentes de nitrógeno.
- Disponibilidad de información geológica (perfiles) u otra información similar asociada a la construcción del pozo.
- Concentración de nitrato u otra información geoquímica.
- Profundidad del pozo; zona no-saturada vs. zona saturada.

Estos pozos representan los puntos de mayor interés. No obstante, cabe señalar que no siempre los pozos seleccionados corresponden a los finalmente muestreados en cada campaña, por cuanto en la práctica surgen limitaciones para el muestreo (por ejemplo: sin acceso por presentar bomba instalada y sin energía, pozo sellado, etc.), y en esos casos se buscaron pozos de reemplazo en sectores en el entorno a los pozos que no se pudieron medir.

**Tabla N°8.2: Selección de Pozos en Sector San Pedro, para ser Monitoreados durante el Proyecto.**  
 Justificaciones y limitaciones de los pozos para análisis de química completo, observadas después de realizar la campaña de monitoreo de reconocimiento.

Pozo ID	Justificación 1	Justificación 2	Justificación 3	Justificación 4	Limitaciones
53	Pozos de cabecera en la cuenca (con respecto al sistema de flujo del agua subterránea). Pueden representar la calidad de aguas de recarga en la cuenca	No hay riego con purines cerca de los pozos; pueden representar calidad de agua de recarga en la cuenca	2 pozos en la misma unidad del acuífero; acuífero confinado, acuífero de arena y grava, 23-35m profundidad	Facilidad para realizar muestreos	Mide la descarga desde 2 pozos
14	Pozo en zona de cabecera de la cuenca	Alta concentración de NO <sub>3</sub> - (15,12 mg N/L); importante para investigar la fuente del nitrógeno		Facilidad para realizar muestreos	no hay perfil geológico
20	Pozo en zona de cabecera de la cuenca	Bastante alta concentración de NO <sub>3</sub> - (8,69 mg N/L); importante para investigar la fuente del nitrógeno	Posibilidad de ver la influencia de dos fuentes de riego en la cuenca (purines y agua pura)	Facilidad para realizar muestreos	no hay perfil geológico
18	Noria más cercana a la zona de cabecera de la cuenca (con respecto al sistema de flujo del agua subterránea).	Posibilidad de ver la influencia de dos fuentes de riego en la cuenca (purines y agua pura)	Facilidad para realizar muestreos		
13	Alta concentración de NO <sub>3</sub> - (12.19 mg N/L); importante para investigar la fuente del nitrógeno	Facilidad para realizar muestreos			Profundidad del pozo desconocida



Pozo ID	Justificación 1	Justificación 2	Justificación 3	Justificación 4	Limitaciones
39	Relativamente baja concentración de NO <sub>3</sub> - (3.9 mg N/L) en la misma zona de pozos (Pozo 40) con alta concentraciones	Pozo contiguo a sector donde se aplica purines			no hay perfil geológico
40	Alta concentración de NO <sub>3</sub> - (14.35 mg N/L); importante para investigar la fuente del nitrógeno	Pozo contiguo a sector donde se aplica purines	Facilidad para realizar muestreos		no hay perfil geológico
30	Pozo con perfil geológico en la zona central de la cuenca	Pozo contiguo a sector donde se aplica purines	El pozo es la fuente de agua de los planteles de cerdos en este sector	Facilidad para realizar muestreos	Influencia de agua desde 7 unidades de acuíferos
43	Alta concentración de NO <sub>3</sub> - (26.68 mg N/L); importante para investigar la fuente del nitrógeno	El pozo esta directamente al lado de donde se aplica riego	Facilidad para realizar muestreos		no hay perfil geológico
2	Proximidad a Pozo 43, permitiendo comparar resultados de sus análisis químicos	Pozo con perfil geológico	Facilidad para realizar muestreos		Influencia de agua desde 7 unidades de acuíferos
32	Pozo con perfil geológico	Posible influencia de fertilizantes inorgánicos	Facilidad para realizar muestreos		
38	Pozo con perfil geológico	Posible influencia de fertilizantes inorgánicos	Proximidad a Pozo 32, aguas abajo en el sistema de flujo		
49	Alta concentración de NO <sub>3</sub> - (9.23 mg N/L); importante para investigar la fuente del nitrógeno	Sistema de flujo subterráneo a parte del sistema de flujo principal en la cuenca			no hay perfil geológico
55	Relativamente baja concentración de NO <sub>3</sub> - (2.0 mg N/L) en la misma zona de pozos (Pozo 49) con alta concentraciones	Sistema de flujo subterráneo a parte del sistema de flujo principal en la cuenca			no hay perfil geológico
51	Alta concentración de NO <sub>3</sub> - (8.47 mg N/L); importante para investigar la fuente del nitrógeno	Sistema de flujo subterráneo a parte del sistema de flujo principal en la cuenca			
27	Pozo con perfil geológico	El pozo queda cerca de la salida de la cuenca	Posibilidad de representan la influencia de varias fuentes de nitrógeno		
47	Alta concentración de NO <sub>3</sub> - (14.98 mg N/L); importante para investigar la fuente del nitrógeno	El pozo queda cerca de la salida de la cuenca	El pozo queda directamente al lado de donde se aplica purines		no hay perfil geológico
46	Alta concentración de NO <sub>3</sub> - (11.64 mg N/L); importante para investigar la fuente del nitrógeno	El pozo queda cerca de la salida de la cuenca	El pozo queda directamente al lado de donde se aplica purines		no hay perfil geológico
44	Relativamente baja concentración de NO <sub>3</sub> - (5.7 mg N/L) en la misma zona de pozos (Pozo 46) con altas concentraciones	El pozo queda cerca de la salida de la cuenca	El pozo queda directamente al lado de donde se aplica purines		no hay perfil geológico

## **b) Campaña de Monitoreo Abril de 2009**

La campaña de Abril 2009, al igual que la de Enero 2009, representa la época seca.

Los resultados de las mediciones de esta campaña se presentan en el **Anexo E**. La información obtenida se analiza separando las mediciones del sistema profundo (monitoreado por pozos) y del somero (monitoreado por norias), según se presenta a continuación:

### ◆ **Mediciones In – Situ**

#### **Norias (3 puntos de monitoreo):**

Las aguas en las tres norias muestreadas en abril de 2009, presentan niveles bajos de conductividad eléctrica, con valores entre 263 y 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura N°8.9**), los cuales son similares a las aguas de los pozos profundos en esta campaña y también a las aguas de las norias monitoreadas en la primera campaña.

Las concentraciones de oxígeno disuelto, para las tres norias, están comprendidas entre 4,75 y 5,36 mg/L (**Figura N°8.10**), las cuales son similares a las concentraciones medidas en la primera campaña (entre 3,54 y 6,89 mg/L).

Por otro lado, de la **Figura N°8.11** se observa que las concentraciones de N-Nitrato presentan un rango entre 6 y 8 mg N/L, valores inferiores al límite permisible para agua potable (10 mgN/L).

#### **Pozos (9 puntos):**

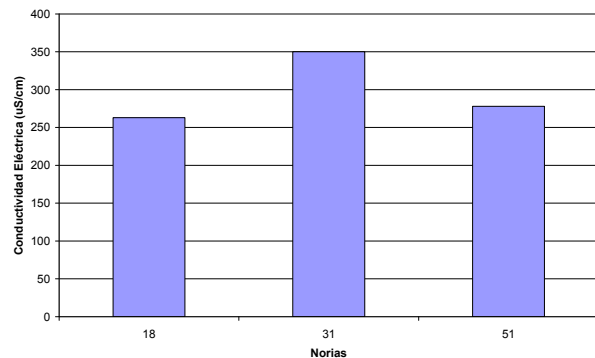
La conductividad eléctrica en las aguas de los pozos varían entre 264 y 365  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura N°8.12**), valores que son similares a los observados en la campaña preliminar de enero 2009, para los mismos pozos. Esto significa que las características químicas del agua no han cambiado, lo cual es coherente en el caso de aguas subterráneas.

Las concentraciones de oxígeno disuelto varían entre 4,19 y 8,87 mg/L (**Figura N°8.13**), valores que son muy similares a los resultados de la campaña de enero 2009.

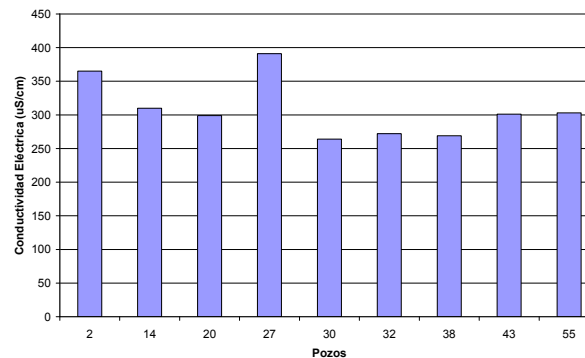
Respecto a las concentraciones de N-Nitrato medidas en pozos profundos durante la campaña de abril de 2009, ésta se encuentra por debajo de 10 mg N/L (límite permisible para consumo humano) con excepción de Pozo 14 (10,3 mg N/L) y Pozo 20 (14,2 mg N/L) (ver **Figura N°8.14**). Además, en 5 de los pozos se mide concentraciones de nitrato por debajo de 4 mg N/L.

### ◆ **Parámetros Químicos**

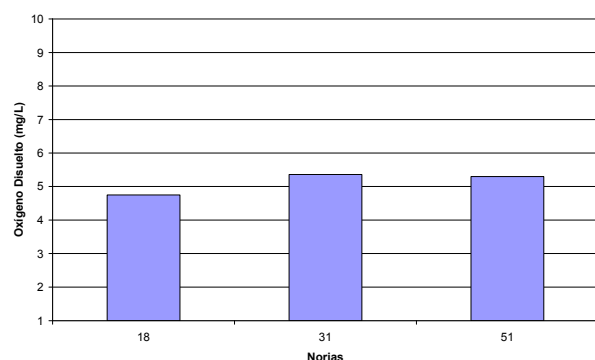
Los resultados obtenidos de los análisis de laboratorio para las muestras de aguas colectadas en 3 norias y 9 pozos, se presentan en **Anexo E**. El monitoreo consideró el análisis de los siguientes parámetros: B; Ca; Fe; K; Mg Total; Na Total; Sr; Zn; HCO<sub>3</sub>; CO<sub>3</sub>; Cl; NO<sub>2</sub>; N; NO<sub>3</sub>; P; SO<sub>4</sub> y COT.



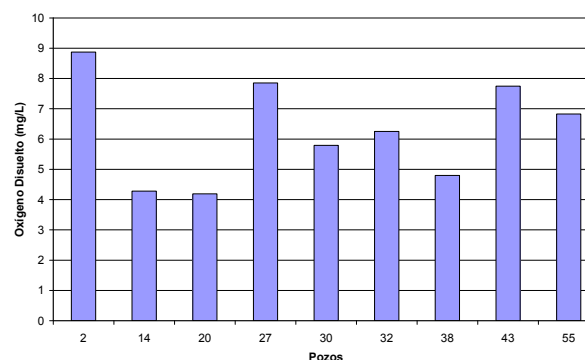
**Figura N°8.9:** Conductividad específica (25°C) en norias, medidas durante la campaña de abril de 2009.



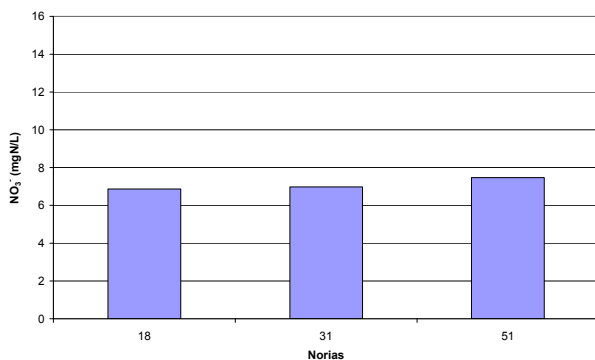
**Figura N°8.12:** Conductividad específica (25°C) en pozos, medidas durante la campaña de abril de 2009.



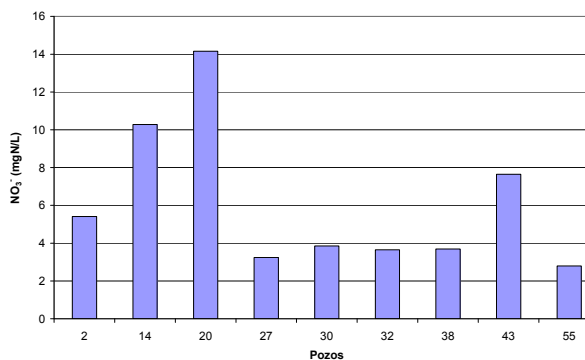
**Figura N°8.10:** Concentraciones de oxígeno disuelto en norias, medidas durante la campaña de abril de 2009.



**Figura N°8.13:** Concentraciones de oxígeno disuelto en pozos, medidas durante la campaña de abril de 2009.



**Figura N°8.11:** Concentraciones de N-Nitratos en norias medidas durante la campaña de abril de 2009.



**Figura N°8.14:** Concentraciones de N-Nitratos en pozos medidas durante la campaña de abril de 2009.

### c) Campaña de Monitoreo de Abril de 2010

#### ◆ Mediciones In – Situ

##### **Norias (5 puntos de monitoreo):**

Las mediciones en norias muestran que la Conductividad Específica es baja y similar en toda el área (250-400  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), indicando un bajo contenido de iones disueltos. (**Figura N°8.15**).

Respecto a la concentración de oxígeno disuelto, ésta es relativamente baja ( $\approx 3$  mg/L en norias 5, 17, y 18), pero no lo suficientemente baja para indicar condiciones anaeróbicas (**Figura N°8.16**).

Finalmente, se observa que las concentraciones de N-Nitrato presentan valores inferiores a 10 mgN/L (**Figura N°8.17**).

##### **Pozos (23 puntos):**

En los pozos, el rango de Conductividad Específica está en torno al mismo rango observado para las norias (250-450  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo cual también indica un bajo contenido de iones disueltos (ver **Figura N°8.18**).

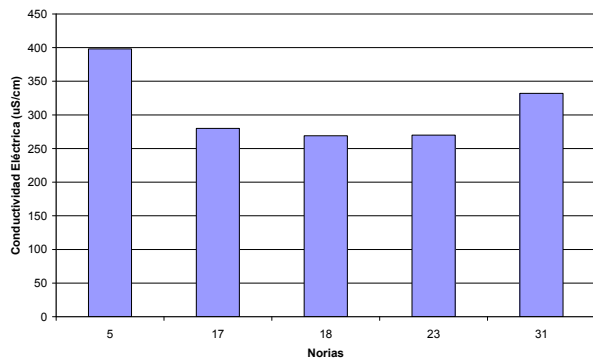
Las concentraciones de oxígeno disuelto no indican una condición anaeróbica en las zonas de captaciones de los pozos (**Figura N°8.19**).

En **Figura N°8.20** se observa que la mayoría de los pozos (20 de un total de 23 pozos) presentan concentraciones de N-Nitratos menores que 6 mgN/L, y sólo 3 pozos presentan concentraciones mayores a 10 mgN/L. Considerando el límite para consumo humano de 10 mg N/L de N-Nitratos, se puede decir que las concentraciones en el sector San Pedro a nivel regional están bajo el nivel permisible para uso de las aguas en consumo humano.

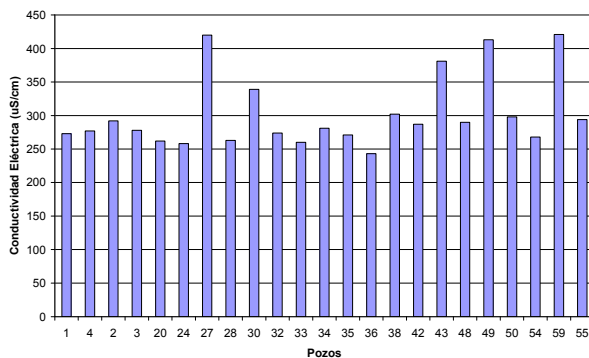
#### ◆ Mediciones de Química Completa

Los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio de las muestras de aguas colectadas en las 2 norias y 10 pozos, se presentan en **Anexo E**. El monitoreo consideró el análisis de los siguientes parámetros: Al; Ag; As; B; Ba; Be; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; K; Li; Mg; Mn; Mo; Na; Ni; Pb; Se; Si; Sn; Sr; Zn;  $\text{HCO}_3$ ;  $\text{CO}_3$ ; Cl;  $\text{NO}_2$ ; N;  $\text{NO}_3$ ;  $\text{NH}_4$ ; P;  $\text{SO}_4$  y COT.

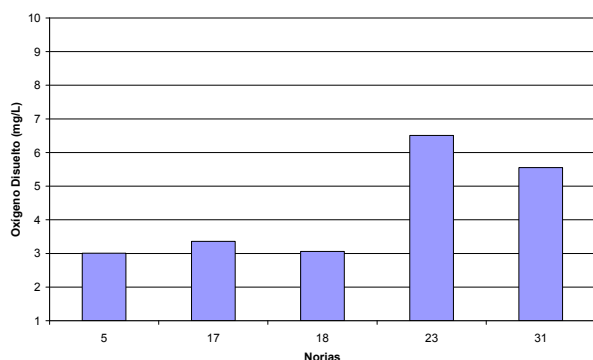




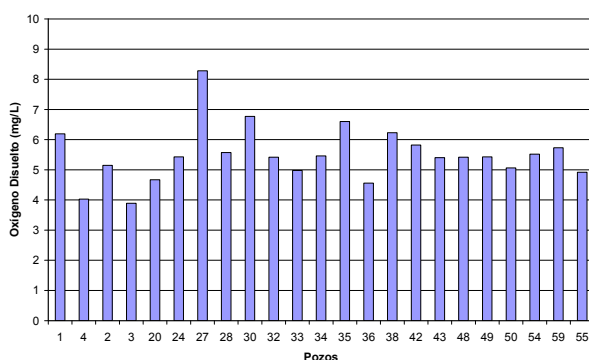
**Figura N°8.15:** Conductividad específica (25°C) en norias, medidas durante la campaña de abril 2010.



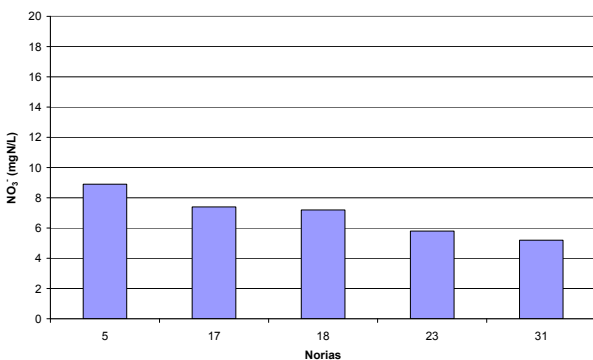
**Figura N°8.18:** Conductividad específica (25°C) en pozos medidas durante la campaña de abril 2010.



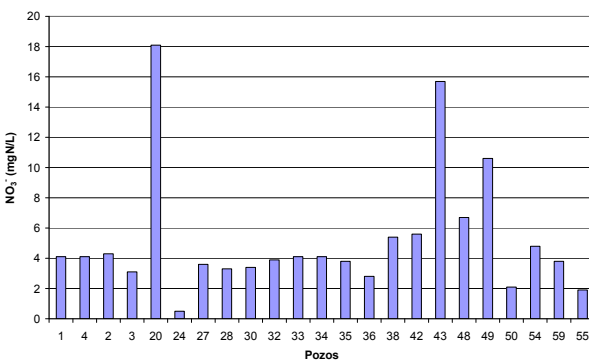
**Figura N°8.16:** Oxígeno Disuelto en norias medidas durante la campaña de abril 2010.



**Figura N°8.19:** Oxígeno Disuelto en pozos medido durante la campaña de abril 2010.



**Figura N°8.17:** N-Nitrato en norias medidas durante la campaña de abril 2010.



**Figura N°8.20:** N-Nitrato en pozos medido durante la campaña de abril 2010.

## **d) Campaña de Monitoreo de Septiembre de 2010**

### ◆ **Mediciones In – Situ**

#### **Norias (6 puntos de monitoreo):**

Las mediciones de conductividad específica se presentan en la **Figura N°8.21**. Se agrupan los valores en dos grupos; el primero con valores entre 300 y 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (al igual que en abril de 2010), y el segundo con valores entre 500 y 650  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En la noria 51, cuya medición de C.E. presenta un valor de 638  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , también presenta una elevada concentración de N-Nitrato (27,7 mg N/L, **Figura N°8.22**), especialmente si se compara con otras norias.

Los valores de N-Nitrato en las norias se encuentran en un rango entre 5,1 y 11,5 mg N/L, salvo a la ya mencionada noria 51 (**Figura N°8.22**).

Respecto a las concentraciones de oxígeno disuelto (O.D.), éstas se encuentran relativamente bajas en las norias 5 (2,5 mg/L) y 18 (2,0 mg/L) y relativamente elevadas en la noria 31 (7,5 mg/L), mostrando ésta última condiciones aeróbicas (**Figura N°8.23**).

#### **Pozos (22 puntos):**

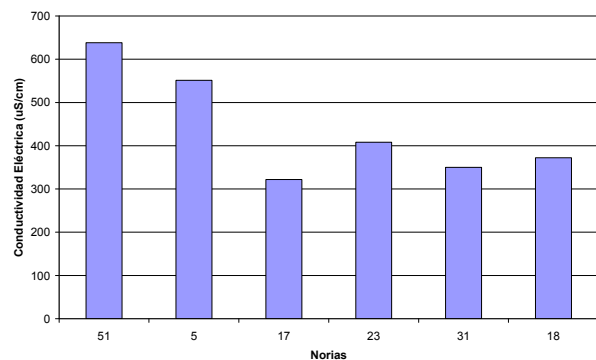
La conductividad específica medida en los pozos se encuentra en un rango entre 250 y 350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , salvo en el pozo 27, el que presenta un valor de 421  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura N°8.24**). Los valores relativamente bajos están asociados a que las concentraciones de iones disueltos son también bajas, aunque aún es posible que algunos compuestos y/o elementos específicos presenten relativamente elevadas concentraciones (ie: sobre el límite de agua potable).

Se observa que las concentraciones de N-Nitrato en las aguas de los pozos son inferiores al límite máximo para su uso en agua potable (10 mg N/L), salvo en las mediciones efectuadas en los pozos 14, 16, y 20 (ver **Figura N°8.25**).

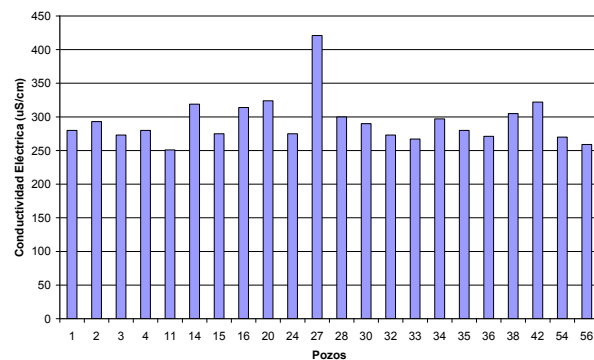
Las concentraciones de oxígeno disuelto revelan condiciones aeróbicas en la mayoría de los pozos, con valores relativamente altos, superiores a 5 mg/L (**Figura N°8.26**). Contrarios a esta tendencia se presentan los pozos 16 y 18, con valores de 2,14 y 2,02 mg/L, respectivamente.

### ◆ **Mediciones de Química Completa:**

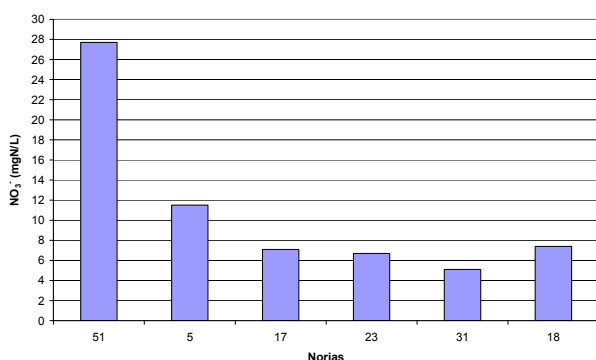
Los resultados de los análisis químicos completos, correspondiente a la campaña de monitoreo efectuada en septiembre 2010, de 3 norias y 6 pozos, son presentados en el **Anexo E**. El monitoreo consideró el análisis de los siguientes parámetros: Al; Ag; As; B; Ba; Be; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; K; Li; Mg; Mn; Mo; Na; Ni; Pb; Sb; Se; Si; Sn; Sr; Zn; HCO<sub>3</sub>; CO<sub>3</sub>; Cl; N; NO<sub>3</sub>; NH<sub>4</sub>; P; SO<sub>4</sub>.



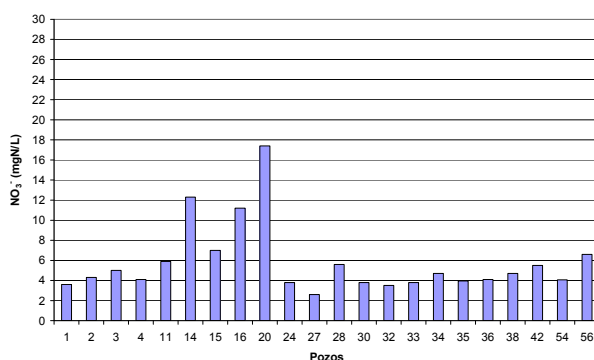
**Figura N°8.21:** Conductividad específica (25°C) en norias medidas durante la campaña de septiembre 2010.



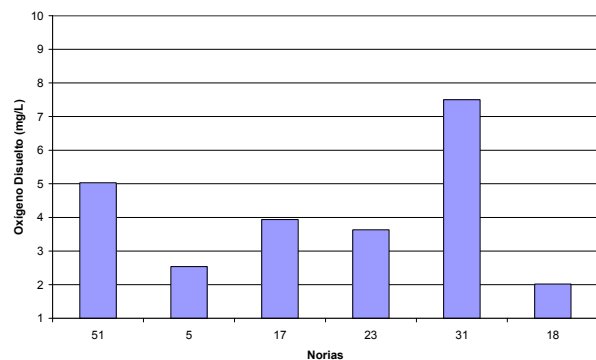
**Figura N°8.24:** Conductividad Específica (25°C) en pozos medidas durante la campaña de septiembre 2010.



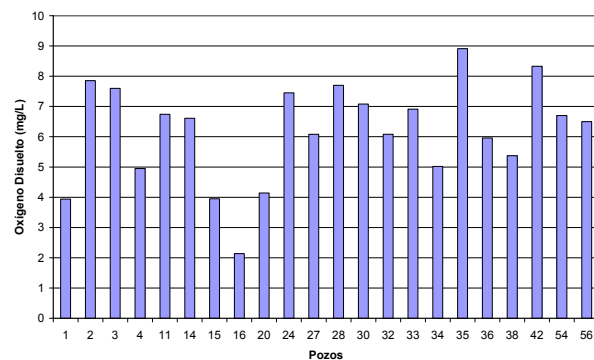
**Figura N°8.22:** N-Nitrato en norias medidas durante la campaña de septiembre 2010.



**Figura N°8.25:** N-Nitrato en pozos medidas durante la campaña de septiembre 2010.



**Figura N°8.23:** Oxígeno Disuelto en norias medidas durante la campaña de septiembre 2010.



**Figura N°8.26:** Oxígeno Disuelto en pozos medidas durante la campaña de septiembre 2010.

## e) Campaña de Monitoreo de Abril de 2011

### ◆ Mediciones In – Situ

#### **Norias (5 puntos de monitoreo):**

En las aguas de las norias se observa que la Conductividad Específica es baja y similar en el área (250-450  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), indicando un bajo contenido de iones disueltos y una baja probabilidad de existir una pluma de contaminantes en la zona de captación de las norias (**Figura N°8.27**).

Respecto a la concentración de oxígeno disuelto, ésta es relativamente alta con valores superiores a 5 mg/L, indicando que las aguas del sistema somero presentan condiciones aeróbicas (**Figura N°8.28**).

Finalmente, se observa que las concentraciones de N-Nitratos son todas inferiores a 10 mg N/L (**Figura N°8.29**), no estando limitado el agua subterránea del acuífero somero para su uso en consumo humano.

#### **Pozos (30 puntos):**

En las aguas de los pozos, a excepción de los 44, 46 y 47, el rango de Conductividad Específica presenta el mismo orden de las norias (250-450  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo cual indica que esta agua presentaría un bajo contenido de iones disueltos (**Figura N°8.30**).

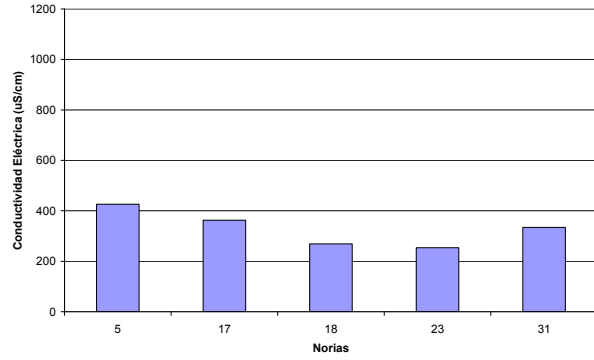
Las concentraciones de oxígeno disuelto no indican una condición anaeróbica en las zonas de captaciones de los pozos (**Figura N°8.31**).

Finalmente, de acuerdo a lo presentado en la **Figura N°8.32**, la mayoría de los pozos (25 de un total de 30 pozos) tienen concentraciones de N-Nitratos menores que 10 mgN/L, y sólo 5 pozos presentan concentraciones mayores a 10 mgN/L. Considerando el límite para el uso del agua en consumo humano (10 mg N/L de N-Nitratos), se puede observar que las aguas del sistema acuífero profundo pueden ser aprovechadas en consumo humano.

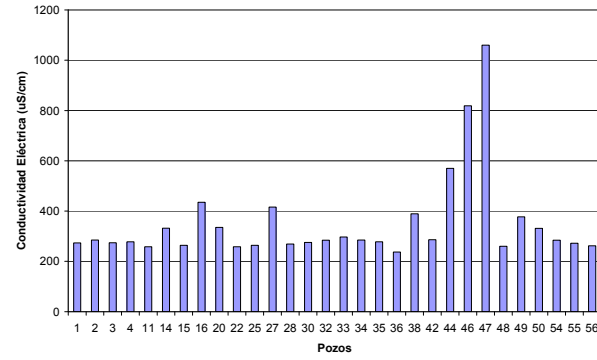
### ◆ Mediciones de Química Completa:

Los resultados de los análisis de laboratorio, correspondientes a aguas de 5 norias y 30 pozos, se presentan en **Anexo E**. El monitoreo consideró el análisis de los siguientes parámetros: Al; Ag; As; B; Ba; Be; Bi; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; K; Li; Mg; Mn; Mo; Na; Ni; Pb; Sb; Se; Si; Sn; Sr; Ti; Tl; V; Zn; HCO<sub>3</sub>; CO<sub>3</sub>; Cl; N; NO<sub>3</sub>; NH<sub>4</sub>; P; SO<sub>4</sub>.

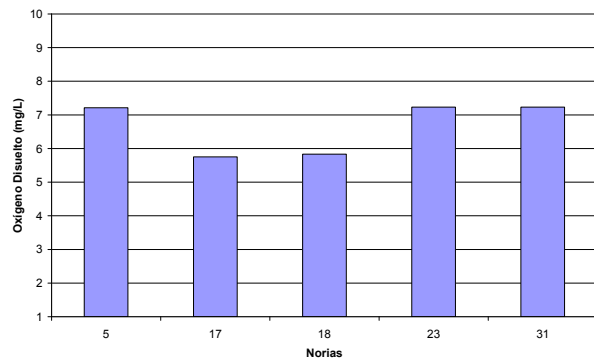




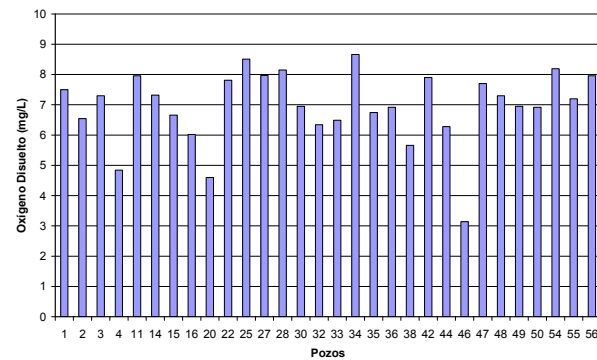
**Figura N°8.27:** Conductividad específica (25°C) en norias medidas durante la campaña de abril 2011.



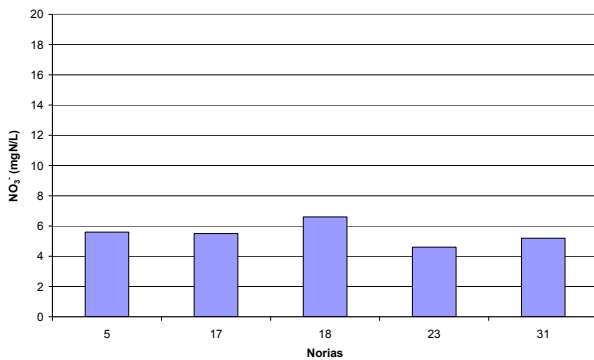
**Figura N°8.30:** Conductividad específica (25°C) en pozos medidas durante la campaña de abril 2011.



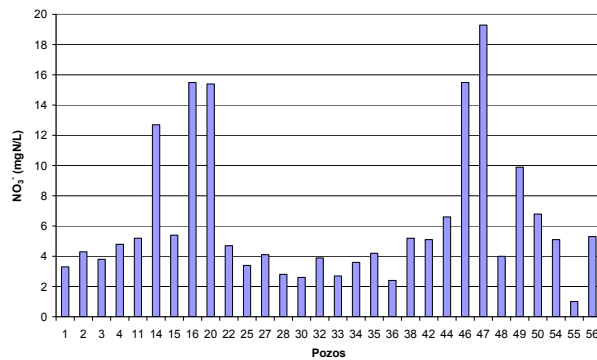
**Figura N°8.28:** Oxígeno Disuelto en norias medidas durante la campaña de abril 2011.



**Figura N°8.31:** Oxígeno Disuelto en pozos medidas durante la campaña de abril 2011.



**Figura N°8.29:** N-Nitrato en norias medidas durante la campaña de abril 2011.



**Figura N°8.32:** N-Nitrato en pozos medidas durante la campaña de abril 2011.

## f) Campaña de Monitoreo Octubre de 2011

### ◆ Mediciones In – Situ

#### Norias (3 puntos de monitoreo):

En la campaña efectuada durante el mes de octubre de 2011, sólo fue posible monitorear un total de 3 norias en el sector de San Pedro. De las mediciones realizadas se observa que la Conductividad Específica es baja y similar en el área (200-350  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), indicando un bajo contenido de iones disueltos y una baja probabilidad de que exista una pluma de contaminantes en la zona de captación de las norias (**Figura N°8.33**).

Respecto a la concentración de oxígeno disuelto, ésta es relativamente alta con valores superiores a 6 mg/L, indicando que las aguas presentan condiciones aeróbicas (**Figura N°8.34**).

Finalmente, las concentraciones de N-Nitratos son todas inferiores a 10 mg N/L (**Figura N°8.35**). Esta es la misma condición observada en el monitoreo efectuado en la estación seca (abril 2011).

#### Pozos (26 puntos):

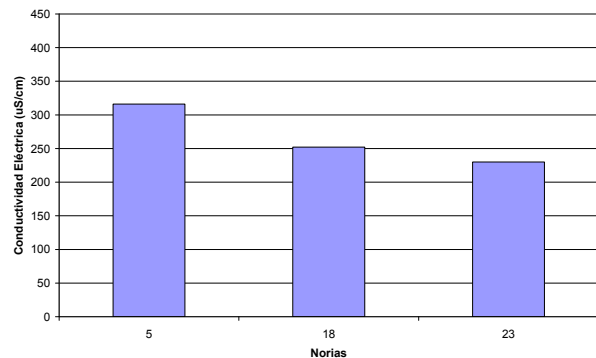
En los pozos, los valores de Conductividad Específica medidos presentan un rango similar a los obtenidos en las norias (200-450  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), lo cual indica que estas aguas presentaría un bajo contenido de iones disueltos y baja probabilidad de que exista una pluma de contaminantes en las zonas de captación de los pozos (**Figura N°8.36**).

Las concentraciones de oxígeno disuelto indican una condición aeróbica en las zonas de captaciones de los pozos, con valores superiores a 5 mg/L (**Figura N°8.37**).

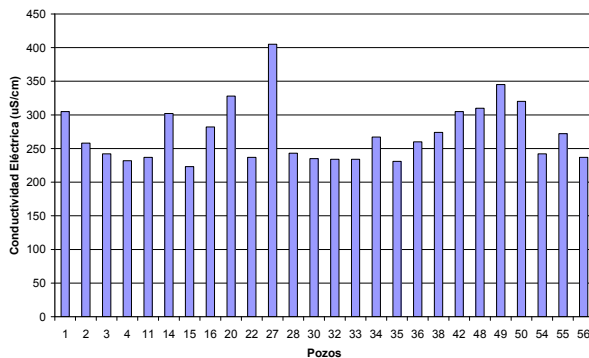
Finalmente, de acuerdo a lo presentado en la **Figura N°8.38**, la mayoría de los pozos (24 de un total de 26 pozos) tienen concentraciones de N-Nitratos menores que 10 mgN/L. Considerando el límite para uso en consumo humano de 10 mg N/L, se puede señalar que son bajas las concentraciones de nitratos en las aguas subterráneas del sector San Pedro.

### ◆ Mediciones de Química Completa:

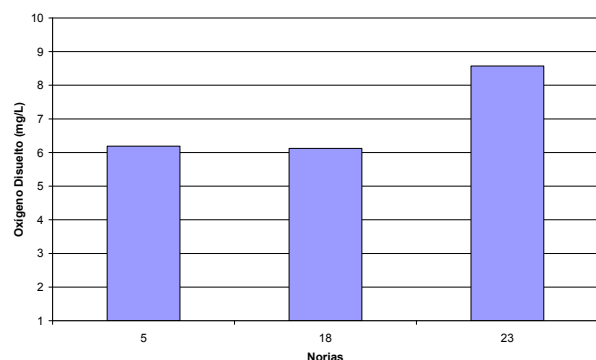
Los resultados de los análisis de laboratorio se presentan en **Anexo E**, correspondientes a aguas de 1 norias y 26 pozos. El monitoreo consideró el análisis de los siguientes parámetros: Al; Ag; As; B; Ba; Be; Bi; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; K; Li; Mg; Mn; Mo; Na; Ni; Pb; Sb; Se; Si; Sn; Sr; Ti; Tl; V; Zn; HCO<sub>3</sub>; CO<sub>3</sub>; Cl; N; NO<sub>3</sub>; NH<sub>4</sub>; P; SO<sub>4</sub>.



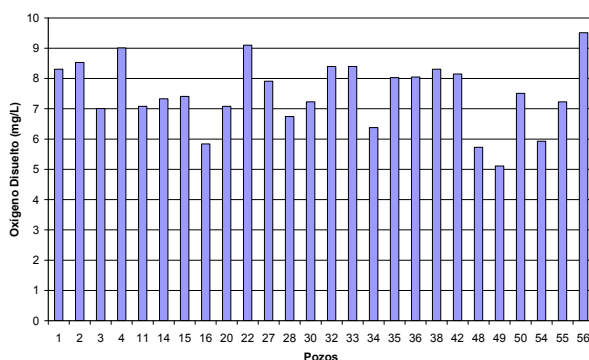
**Figura N°8.33:** Conductividad específica (25°C) en norias medidas durante la campaña de octubre 2011.



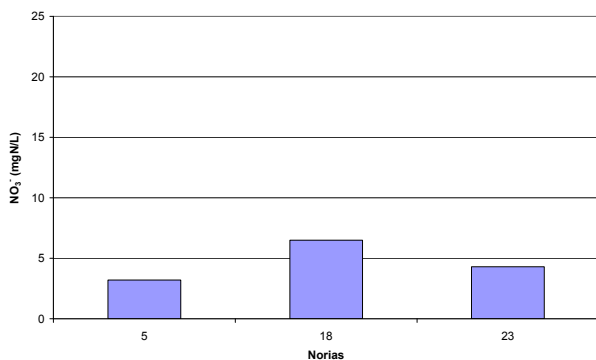
**Figura N°8.36:** Conductividad específica (25°C) en pozos medidos durante la campaña de octubre 2011.



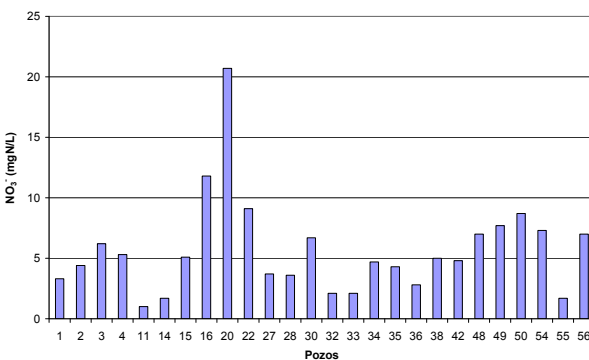
**Figura N°8.34:** Oxígeno Disuelto en norias medidas durante la campaña de octubre 2011.



**Figura N°8.37:** Oxígeno Disuelto en pozos medidos durante la campaña de octubre 2011.



**Figura N°8.35:** Nitrato (N-NO3) en norias medidas durante la campaña de octubre 2011.



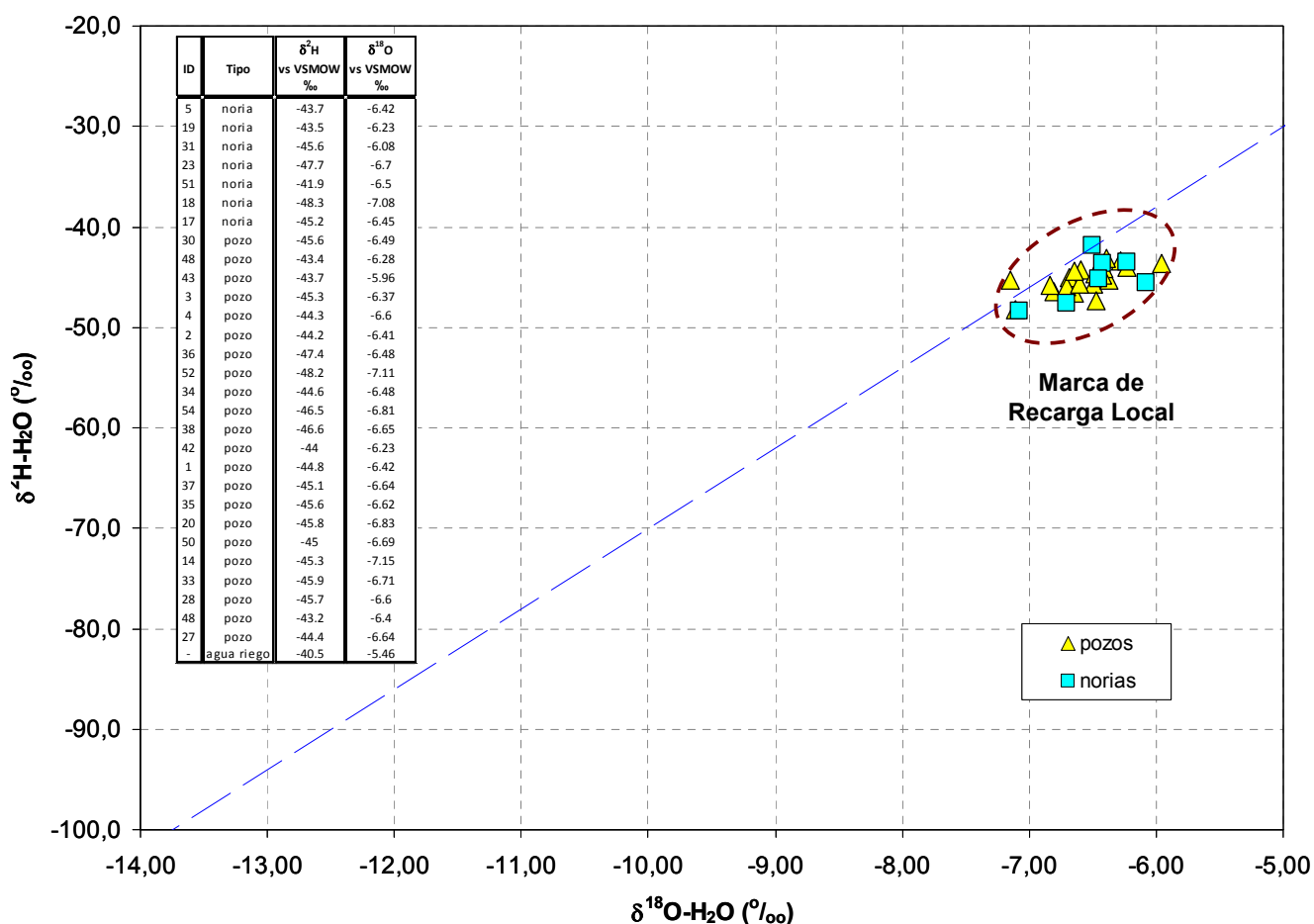
**Figura N°8.38:** Nitrato (N-NO3) en pozos medidos durante la campaña de octubre 2011.

### 8.1.3 Mediciones Isotópicas

#### a) Isótopos Estables del Hidrógeno y Oxígeno del Agua

Se efectuó una medición de isótopos estables del Hidrógeno y Oxígeno del agua en una serie de pozos y norias distribuidos en el área de estudio.

La **Figura N°8.39** presenta los isótopos estables del agua medidos en el sector de San Pedro. Los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  varían entre -5,8 y -7,2‰ y los valores de  $\delta^2\text{H}$  varían entre -40,0 y -50,0‰. El rango en ambas dimensiones es acotado. De acuerdo a la **Figura N°2.4** (Capítulo 2), el origen del agua subterránea en el sector San Pedro es de una altura aproximada de 500 m.snm (similar a la de la cuenca). Este hecho significa que el agua en las zonas de captación de las norias y los pozos es el producto de infiltración de precipitación que cae directamente en la cuenca del sector analizado del proyecto.



**Figura N°8.39:**  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  de agua en el sector San Pedro.



## b) Isótopos Radioactivos: Tritio (<sup>3</sup>H) del Agua

Los análisis de Tritio han sido efectuados en el Environmental Isotope Laboratory (EIL) de la Universidad de Waterloo, Canadá. Los resultados de la campaña de monitoreo realizada en abril 2010, son presentados en la **Tabla N°8.3**.

De la información presentada, se observa que las mediciones de Tritio en las aguas subterráneas en el sector San Pedro son inferiores al límite de detección analítico (<0.8 UT) (**Figura N°8.40**), indicando que las aguas de la cuenca tienen un largo tiempo de residencia en el sistema. Este comportamiento en parte puede estar relacionado con el hecho que la mayor parte de la recarga al acuífero confinado se produce en la cabecera de la cuenca, donde están presente los materiales de mayor permeabilidad; en el resto del área, el acuífero profundo está cubierto por capas de arcilla de baja permeabilidad.

En el caso de las norias, sistema acuífero somero, los bajos niveles de Tritio estarían relacionados con la baja permeabilidad de las arcillas y al nivel relativamente profundo del agua en éstas.

Cabe destacar el caso de las aguas del pozo 43, las cuales presentan un valor de 1,3 UT. Este valor muestra que las aguas captadas por este pozo son más recientes que las aguas en otras zonas de la cuenca. Es posible que este pozo esté más cerca de un área de recarga, que podría corresponder a una zona de piedemonte localizada cerca del pozo. No obstante, se observa que el contenido de nitrato en sus aguas varía bastante entre las campañas de mediciones (7,65 a 26,68 mg N/L). Esa hecho sugiere que ese comportamiento se debería a una conexión entre el acuífero y la parte somera de las áreas de cultivo, a través de una defectuosa construcción del pozos. En este caso, la variación en las concentraciones de nitrato correspondería a los cambios en las actividades en la superficie, específicamente a la aplicación estacional de fertilizantes inorgánicos.

**Tabla N°8.3:** Contenidos de Tritio en las aguas subterráneas del Sector San Pedro, monitoreo abril 2010.

Pozo ID	Tritio (UT*)	± 1σ
18	<0.8	0,3
42	<0.8	0,3
43	1,3	0,4
59	<0.8	0,3
48	<0.8	0,3
5	<0.8	0,3
27	<0.8	0,3

\*1UT = 3.221 Picocuries/L (IAEA, 2000 Report).

\*1UT = 0.11919 Becquerels/L (IAEA, 2000 Report).

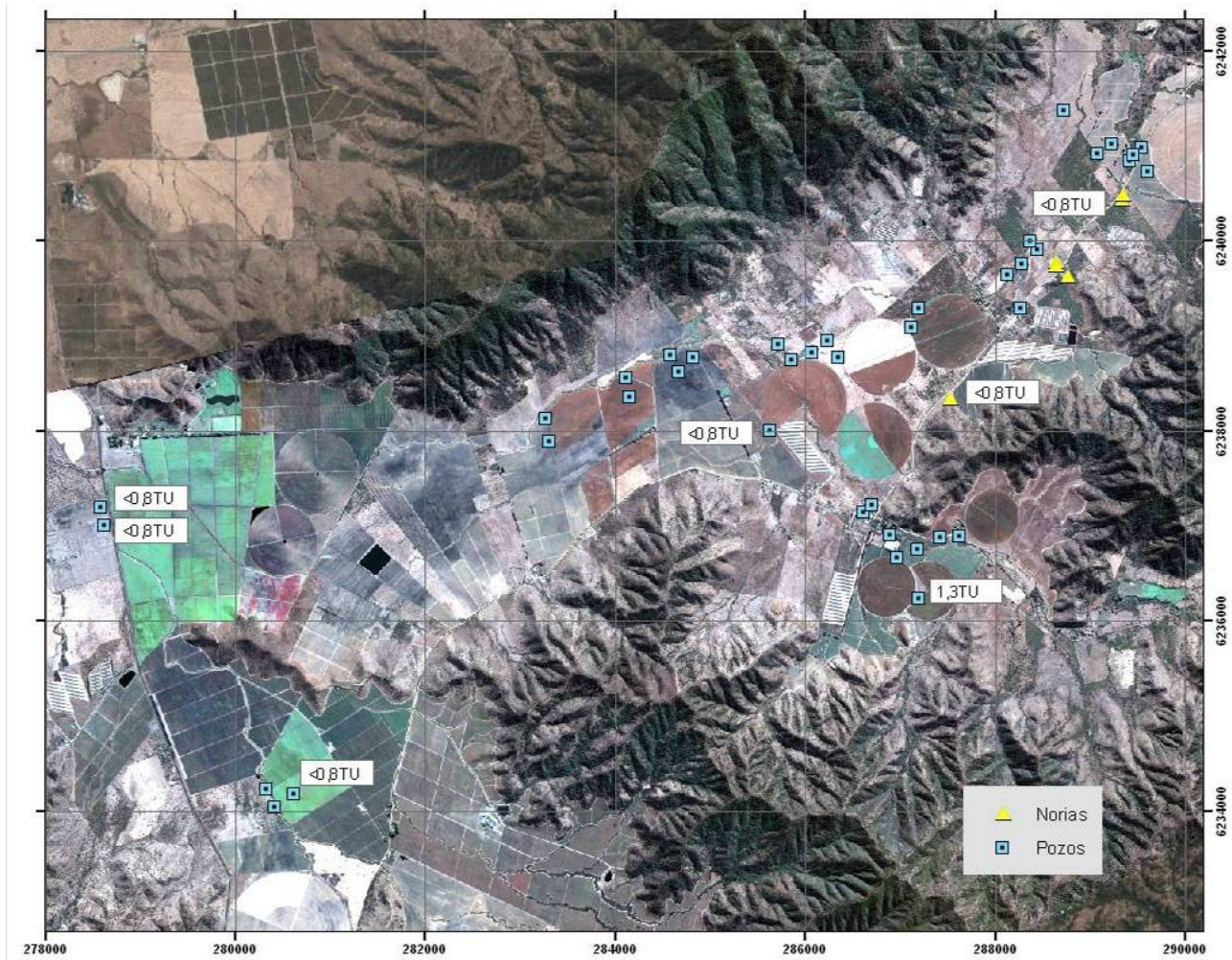


Figura N°8.40: Ubicación puntos de medición y contenidos de Tritio (UT) en las aguas subterráneas de Sector San Pedro.

**c) Mediciones Isotópicas de Nitrógeno-15 y Oxígeno-18 de Nitrato en Aguas Subterráneas**

Se efectuó mediciones isotópicas de Nitrógeno-15 y Oxígeno-18 de Nitrato en Aguas Subterráneas en una serie de pozos y norias distribuidos en el área de estudio.

Los resultados de las muestras colectadas durante la campaña de abril 2009 son presentados en la **Tabla N°8.4**. En la **Tabla N°8.5** se reportan los resultados de análisis de los isótopos de nitrato (nitrógeno-15 y oxígeno-18), de las aguas muestreadas en abril 2010.

**Tabla N°8.4:** Resultados de análisis de Nitrógeno-15 y Oxígeno-18 de Nitrato (muestreo: abril 2009).

Pozo ID	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mgN/L	δ <sup>15</sup> N ‰ (AIR)	δ <sup>18</sup> O ‰ (VSMOW)
28	5,6	7,87	-
54	4	7,61	-
14	8,7	13,63	6,41
52	5	9,05	-
20	15,12	14,55	6,34
19	8,28	15,17	8,49
18	7,29	5,35	-
30	3,68	7,77	-
17	7,78	6,70	-
23	6,22	8,68	-
5	15,99	12,38	8,43
31	12,19	8,24	-
1	3,72	8,24	-
4	4,03	7,06	16,81
2	4,75	6,82	4,62
35	3,96	8,46	-
36	3,81	8,52	-
34	4,07	8,73	-
24	5,43	7,23	-
3	3,67	6,33	4,51
43	26,0	10,74	4,04
38	4,62	7,54	5,41
33	4,35	5,60	-
32	3,65	7,71	5,64
27	4,44	10,07	5,94
48	6,32	5,60	-
50	7,72	7,64	-
55	1,99	7,21	-
51	8	10,63	-

**Tabla N°8.5:** Resultado de análisis de Isótopos de Nitrato (nitrógeno-15 y oxígeno-18) de la campaña de muestreo de abril 2010.

Pozo ID	NO <sub>3</sub> mgN/L	δ <sup>15</sup> N-NO3 ‰ (AIR)	δ <sup>18</sup> O-NO3 ‰ (VSMOW)
18	7,2	6,49	5,93
23	5,8	6,65	
17	7,4	6,60	4,42
31	5,2	6,07	3,59
5	8,9	14,45	7,12
54	4,8	8,23	4,86
28	3,3	5,78	
20	18,1	14,16	5,42
30	3,4	6,41	5,12
42	5,6	5,09	
4	4,1	7,30	5,40
3	3,1	5,76	5,27
2	4,3	5,47	
24	0,5	5,21	
1	4,1	7,18	4,55
36	2,8	7,84	
35	3,8	6,61	
34	4,1	6,63	
43	15,7	10,79	2,89
59	3,8	9,49	5,96
49	10,6	6,59	4,50
50	2,1	6,25	
55	1,9	5,91	6,29
48	6,7		
38	5,4	7,46	
33	4,1	7,85	5,09
32	3,9	6,39	
27	3,6	9,38	6,03



## **8.2 SECTOR PICHIDEGUA**

### **8.2.1 Catastro de Pozos y Norias**

Los monitoreos de las aguas subterráneas en el sector de Pichidegua se realizan en pozos y norias existentes en el sector. Por lo anterior, se efectúa un reconocimiento del terreno, identificando los pozos y norias que sean de utilidad para los objetivos del proyecto.

Para obtener una primera caracterización de las aguas del sector, en febrero 2009 se realizó una campaña de monitoreo en todos los pozos encontrados. Esas mediciones permiten visualizar los niveles de nitratos en las aguas del sector y, en base a ello, se seleccionan los pozos a ser monitoreados durante el período del proyecto. La campaña de Febrero representa la época seca, en la cual se esperan niveles más profundos del agua subterránea.

Los pozos y norias reconocidos y que se incluyen en el presente informe, se ubican en terrenos privados, cuyos propietarios han autorizado su inclusión en el presente catastro y su monitoreo

En la **Tabla N°8.6** se presenta el listado de pozos catastrados, así como los puntos de interés de aguas superficiales. En la **Figura N°8.41** se presenta la distribución geográfica de dichos puntos.

**Tabla N°8.6:** Catastro de Pozos/Norias y puntos de muestreo aguas superficiales e Información disponible en el Sector Pichidegua.

Punto ID	ESTE (m)	NORTE (m)	Tipo de Punto	Profundidad (m)	Pozo DGA	Perfil Geológico	Método de Muestreo
1	282388	6190816	Noria		no		desde la noria
3	282888	6190974	Pozo Profundo	50	no		desde el llave del pozo
4	283040	6191075	Pozo Profundo	55	no		desde el llave del pozo
5	282990	6191592	Pozo Profundo	100	no		desde el llave del pozo (después de purga de cloruro)
8	284467	6191633	Pozo Profundo	40	no	disponible	desde el pozo
9	282209	6193235	Pozo Profundo		no		no es posible (cloruro)
10	278065	6194807	Pozo Profundo	50	no		desde el llave del pozo
12	278273	6197593	Pozo Profundo	50	no	disponible	no es posible (cerrado)
13	286587	6192099	Noria	4	no		desde la noria
14	285164	6191171	Noria		no		desde la noria
15	286135	6191115	Noria		no		desde la noria
16	285386	6190219	Noria	12	no		desde el llave del pozo (cerca de la oficina)
17	281913	6188630	Noria	5	no		desde la noria
18	282065	6188867	Noria	5	no		desde la noria
19	280368	6190869	Noria		no		desde la noria
20	280012	6190613	Noria		no		desde la noria
21	279816	6190478	Noria		No. Res. 61		desde la noria
22	279380	6190137	Pozo Profundo		No. Res. 195	disponible	desde el pozo
23	280565	6193064	Noria		no		desde la noria
24	280403	6194068	Noria		no		desde la noria
25	279164	6193125	Noria	5	no		desde la noria
26	278942	6192207	Noria		no		desde la noria
27	279107	6191947	Noria		no		desde la noria
28	278677	6195609	Noria	14	no		desde la noria
29	278472	6196264	Noria	2	no		desde la noria
30	279163	6197751	Noria		no		desde la noria
32	279201	6199177	Pozo Profundo		No. Res. 28		desde el pozo
33	277982	6198830	Pozo Profundo		No. Res. 28		desde el pozo
34	277516	6197057	Pozo Profundo	82	no		desde el pozo
35	278680	6197751	Pozo Profundo		no		desde el pozo
36	286254	6190922	agua superficial		no		sumergiendo la botella perpendicular del corriente
37	283049	6192197	agua superficial		no		sumergiendo la botella perpendicular del corriente
38	278100	6195297	agua superficial		no		sumergiendo la botella perpendicular del corriente
39	276801	6196411	agua superficial		no		sumergiendo la botella perpendicular del corriente
41	276153	6202557	agua superficial		no		sumergiendo la botella perpendicular del corriente
40	279083	6189541	agua superficial		no		sumergiendo la botella perpendicular del corriente

**Nota1:** Los datos faltantes de profundidad de los pozos se deben a que dicha información era desconocida o no fue proporcionada por sus propietarios.

**Nota2:** Coordenadas tomadas con GPS Navegador referidas al datum PSAD56. Huso UTM Zona 19S.

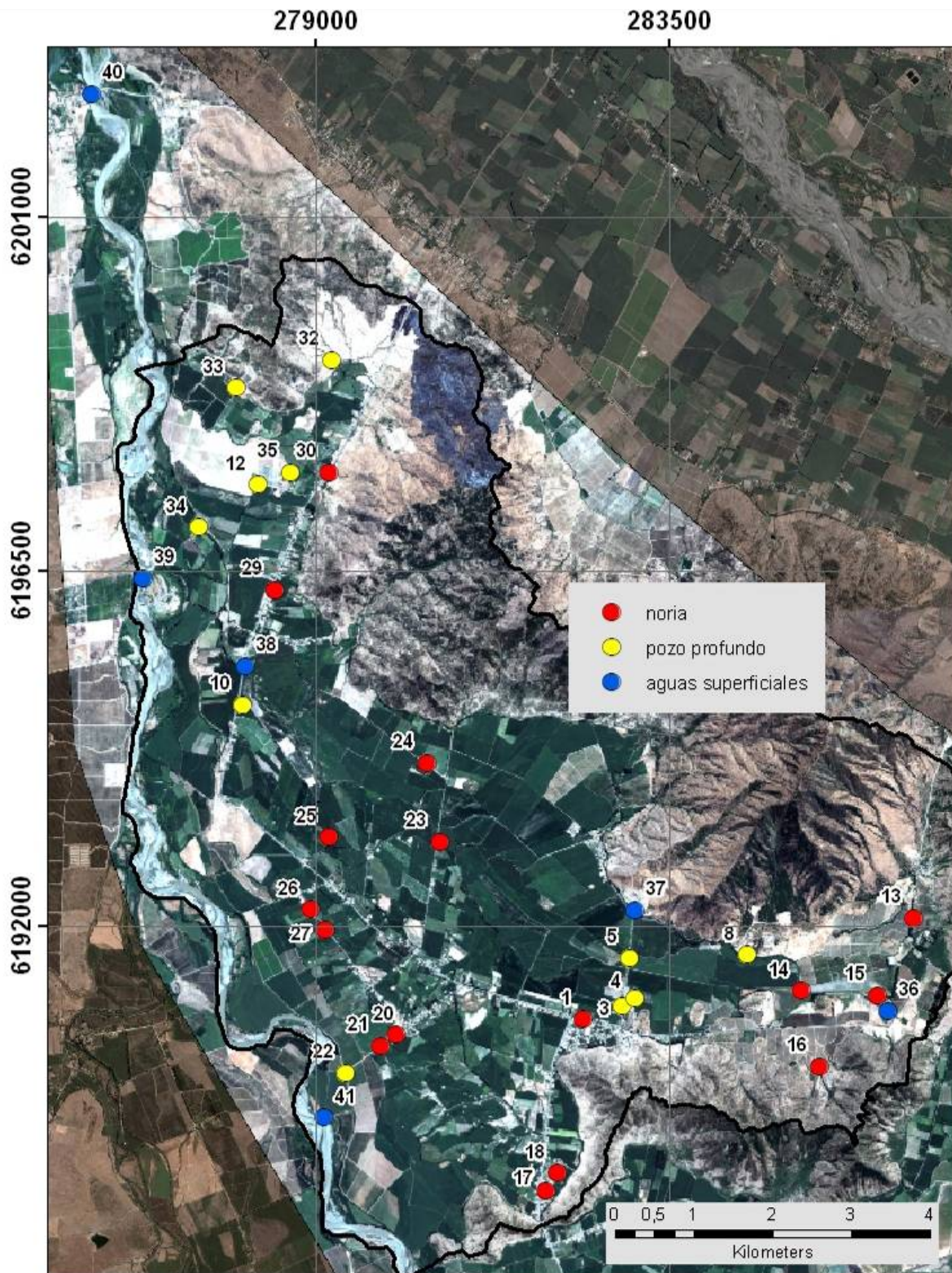


Figura N°8.41: Catastro de pozos, norias, y aguas superficiales reconocidos por GP en el sector Pichidegua. Los números en la figura corresponden al campo “punto ID” de Tabla N°8.6.



## 8.2.2 Mediciones Hidroquímicas

Se efectuó un total de 6 campañas de monitoreo en el sector de Pichidegua.

La primera campaña (febrero de 2009) corresponde al reconocimiento inicial de pozos y de la calidad de las aguas subterráneas del sector. Las campañas siguientes, desarrolladas en abril de 2009, abril y octubre de 2010, mayo y octubre de 2011, fueron realizadas con el objetivo de realizar un seguimiento en el tiempo de la calidad de las aguas subterráneas en los pozos seleccionados, considerando muestreos estacionales.

El detalle de los resultados de los análisis efectuados se presenta en el **Anexo E**.

### a) **Muestreo Preliminar (Febrero de 2009)**

Los análisis realizados incluyen mediciones *in situ* de conductividad eléctrica, temperatura, pH y oxígeno disuelto. Además, se midió en terreno nitratos y cloruros en todas las muestras, mientras que en las muestras de norias y canales se midió adicionalmente nitrógeno total, y en algunos pozos profundos, elegidos aleatoriamente, se midió nitrógeno total y sulfatos.

#### ◆ **Mediciones In - Situ**

##### **Aguas Superficiales:**

Las aguas superficiales tienen valores de conductividad eléctrica entre 482 y 620  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , las cuales son bastante constantes en los diferentes puntos muestreados (**Figura N°8.42**).

Asimismo, los valores de oxígeno disuelto medidos son relativamente constantes (**Figura N°8.43**), entre 6,75 y 8,9 mg/L, que son típicos de aguas en movimiento que se oxigenan durante su curso en el cauce.

Finalmente, respecto a los valores de N-Nitrato (**Figura N°8.44**), se observa que los puntos monitoreados presentan una muy baja concentración de nitratos con valores menores a 5 mgN/L.

##### **Norias:**

El rango de conductividad eléctrica en las norias es entre 495 y 1.568  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , con un promedio de 941  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura N°8.45**). Los valores de la Noria 14, Noria 15, Noria 16, y Noria 24, las cuales están siendo bombeadas regularmente, presentan valores de 741, 748, 540, y 1.462  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , respectivamente. La noria 24 (1.462  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) es la que presenta un mayor valor de conductividad, lo cual puede estar relacionado a actividades agrícolas y/o domésticas en las cercanías de esta Noria. La noria 24 también presenta altas concentraciones de N-Nitrato (27,8 mgN/L) y cloruro (102 mg/L), los que posiblemente provienen de un pequeño galpón de aves y el canal próximo a la noria. Otras norias en el sector, que no están siendo bombeadas con frecuencia, presentan el mismo rango de valores que las norias en operación regular. Esto podría significar que estas norias están siendo recargadas con agua fresca de las unidades del acuífero.



La conductividad eléctrica en las norias es más alta que en los pozos profundos, lo cual puede indicar que la parte somera del acuífero es más impactada por actividades agrícolas y domésticas. Las norias 18 (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:18,7 mg N/L, Cl<sup>-</sup>: 83 mg/L) y 25 (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>:13,85 mg N/L, Cl<sup>-</sup>: 102 mg/L), tienen altas concentraciones de nitrato y cloruro, los cuales puede provenir de actividades agrícolas y/o domésticas.

El oxígeno disuelto presenta valores entre 2,2 y 6,8 mg/L (**Figura N°8.46**). Los valores bajos probablemente son los resultados del consumo de oxígeno en la oxidación de materia orgánica en la zona no saturada y saturada; sin embargo, estos valores no representan condiciones extremadamente reductoras.

Finalmente, respecto a los valores de N-Nitrato (**Figura N°8.47**), en esta campaña de monitoreo se observan valores por debajo de 10 mg N/L (límite permisible para consumo humano) con excepción de Noria 1 (34 mg N/L), Noria 18 (18 mg N/L), Noria 24 (25 mg N/L) y Noria 25 (13 mg N/L).

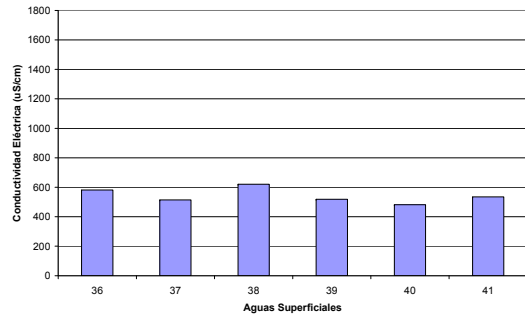
### **Pozos:**

Se observa un grupo de pozos con conductividad eléctrica relativamente baja, presentando valores entre 283 y 474 µS/cm (**Figura N°8.48**). Estos valores son iguales o menores que los valores de aguas superficiales medidas durante la misma campaña y podrían representar aguas de recarga poco evolucionadas químicamente. Otro grupo presenta una conductividad eléctrica relativamente alta, con valores entre 629 y 1.045 µS/cm (**Figura N°8.48**). En este caso, los valores altos de conductividad eléctrica podrían ser un resultado del contacto entre el agua y unidades del acuífero específicas que presentan altos contenidos de iones, los cuales han sido disueltos. La otra posibilidad está asociada a la influencia de la actividad agrícola en la zona. Por ejemplo, el Pozo 33 tiene una conductividad eléctrica de 629 µS/cm, presentando también una relativamente alta concentración de cloruro (229 mg/L).

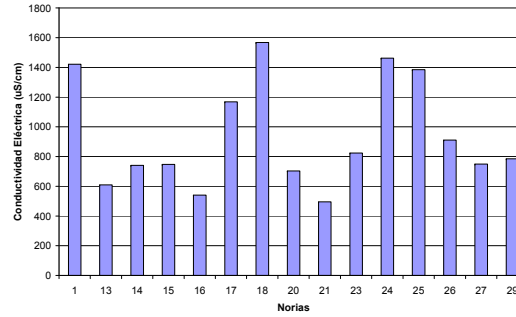
Respecto al oxígeno disuelto, los valores encontrados varían entre 2,9 y 9,2 mg/L (**Figura N°8.49**). El valor más alto es similar al valor del oxígeno disuelto más alto de las aguas superficiales (8,9 mg/L), lo cual significa que las aguas subterráneas están en condiciones aeróbicas. Por otro lado, los valores más bajos probablemente estarían relacionados a consumo de oxígeno asociados a oxidación de materia orgánica y/o sulfuros que podrían existir en la zona de recarga.

Respecto a los valores de N-Nitrato (**Figura N°8.50**), en esta campaña de monitoreo se observan valores por debajo de 10 mg N/L (límite permisible para consumo humano).

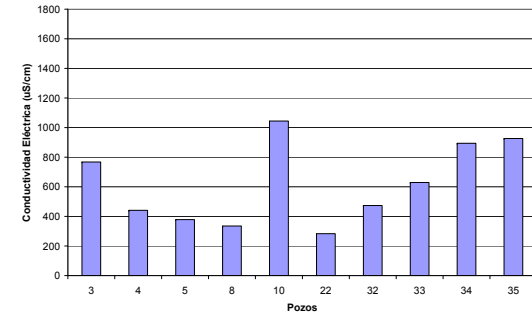
En **Anexo E** se presentan los análisis físico-químicos realizados en terreno. Incluyen los análisis *in situ* de Temperatura, CE, pH, OD, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Nitrógeno total, Nitratos y Cl<sup>-</sup>.



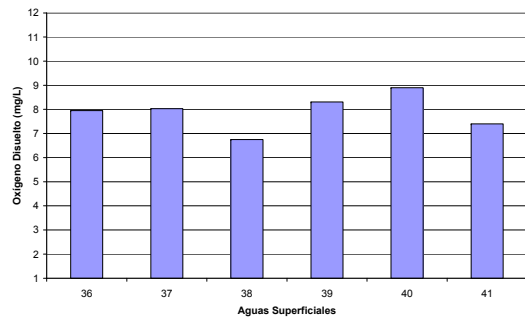
**Figura N°8.42:** Conductividad específica (25°C) de aguas superficiales medidas durante la campaña de febrero de 2009.



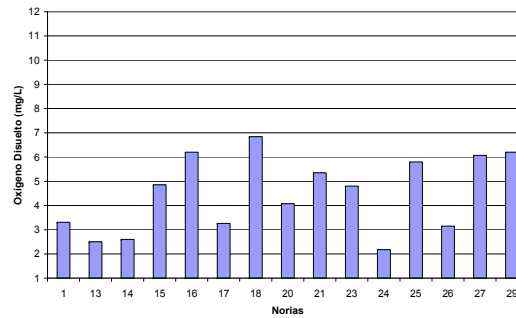
**Figura N°8.45:** Conductividad eléctrica en norias medidas durante la campaña de febrero de 2009.



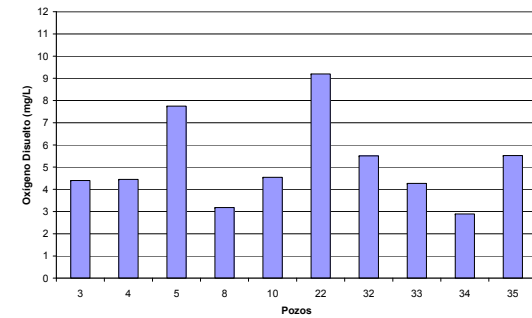
**Figura N°8.48:** Conductividad eléctrica de pozos medidas durante la campaña de febrero de 2009.



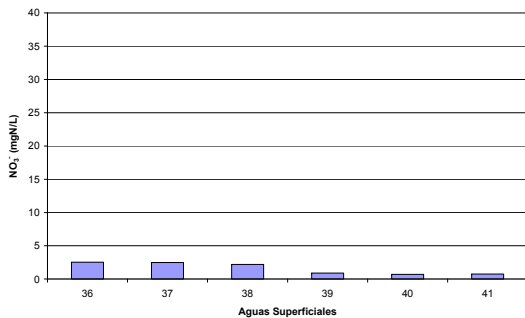
**Figura N°8.43:** Concentraciones de oxígeno disuelto en aguas superficiales medidas durante la campaña de febrero de 2009.



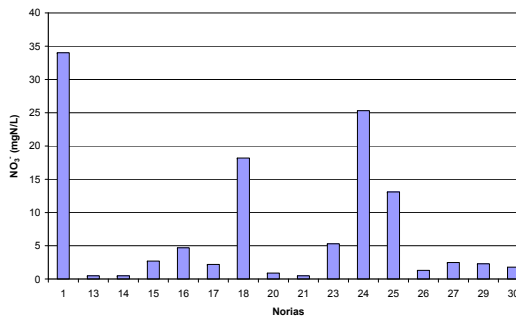
**Figura N°8.46:** Concentraciones de oxígeno disuelto en norias medidas durante la campaña de febrero de 2009.



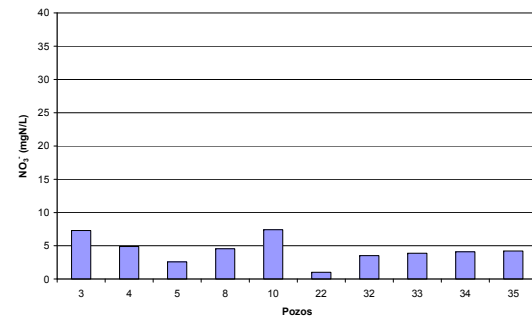
**Figura N°8.49:** Concentraciones de oxígeno disuelto en pozos medidas durante la campaña de febrero de 2009.



**Figura N°8.44:** Concentraciones de N-Nitratos en aguas superficiales medidas durante la campaña de febrero de 2009.



**Figura N°8.47:** Concentraciones de N-Nitratos en norias medidas durante la campaña de febrero de 2009.



**Figura N°8.50:** Concentraciones de N-Nitratos en pozos medidas durante la campaña de febrero de 2009.

♦ **Selección de Puntos para Monitoreo durante el Proyecto**

En la **Tabla N°8.7** se presentan los puntos seleccionados para efectuar el monitoreo de sus aguas. La justificación para la selección de cada punto en el sector Pichidegua, es presentada en la misma tabla, de acuerdo con los siguientes criterios generales:

- Ubicación del pozo o punto con respecto a las direcciones del flujo de las aguas subterráneas.
- Ubicación del pozo o punto con respecto a otros pozos.
- Ubicación del pozo o punto de monitoreo, con respecto a donde se aplican los purines u otras potenciales fuentes de nitrógeno.
- Disponibilidad de información geológica (perfiles) u otra información similar asociada a la construcción del pozo.
- Concentración de nitrato u otra información geoquímica.
- Profundidad del pozo; zona no-saturada vs. zona saturada.

Cabe destacar que, en general, en el sector Pichidegua hay una buena distribución de pozos profundos y norias disponibles para sacar muestras y efectuar mediciones *in situ*. La principal limitación de estos pozos es la carencia de información asociada a su litografía, pruebas de bombeo, detalles de construcción, etc.

Finalmente, es necesario señalar que no siempre los pozos seleccionados corresponden a los finalmente muestreados, por cuanto se presentan limitaciones al momento de ejecutar los muestreos.

**Tabla N°8.7:** Justificación y limitaciones de pozos que se proponen para el seguimiento, durante el proyecto, de la calidad de las aguas en el Sector Pichidegua.

Pozo ID	Justificación 1	Justificación 2	Justificación 3	Limitaciones
5	El pozo queda cerca de donde se aplica purines y guanos	Profundidad conocida		No hay perfil geológico disponible
10	El pozo queda cerca de donde se aplica purines y guanos	La profundidad es conocida		No hay perfil geológico disponible
8	El pozo queda cerca de donde se aplica purines y guanos	Existe descripción del perfil geológico y detalles de construcción del pozo		
3	El pozo queda cerca de donde se aplica purines y guanos	La profundidad es conocida		No hay perfil geológico disponible
4	Relativamente baja concentración de nitrato (4,9 mg N/L) en la misma zona de pozos con altas concentraciones	Aumentar la cobertura del sector		No hay perfil geológico disponible
15	La noria se ubica en el sector de cabecera de la cuenca (con respecto al flujo de aguas subterráneas)	La noria es bombeada; el agua puede representar mejor al agua de la unidad acuífera	Facilidad para efectuar muestreos	La profundidad de este pozo es desconocido
1	La noria se ubica contigua a plantel	Alta concentración de NO <sub>3</sub> - (34 mg N/L, in situ); importante para investigar fuente de nitrógeno		
22	Relativamente baja concentración de nitrato (1,0 mg N/L) en el mismo zona de pozos con altas concentraciones	Aumentar la cobertura del sector	Hay perfil geológico disponible	

<b>Pozo ID</b>	<b>Justificación 1</b>	<b>Justificación 2</b>	<b>Justificación 3</b>	<b>Limitaciones</b>
34	Baja concentraciones de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (4,09 mg N/L) pero alta concentraciones de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (1235 mg/L); puede ser un resultado de desnitrificación por FeS <sub>2</sub>	El pozo queda cerca de sector con aplicación de purines		No hay perfil geológico disponible
35	Relativamente baja concentración de nitrato (4,2 mg N/L) en el mismo zona de pozos con altas concentraciones	Permite aumentar la cobertura del sector		No hay perfil geológico disponible
18	Alta concentración de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (18,7 mg N/L); importancia a investigar una fuente de nitrógeno	Facilidad de efectuar muestreos		
25	Alta concentración de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (13,85 mg N/L); importancia a investigar una fuente de nitrógeno	El pozo queda aguas abajo de sector donde se aplican purines		
24	Alta concentración de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (27,75 mg N/L); importancia a investigar una fuente de nitrógeno	Noria con bombeo; el agua puede representar bien al agua de unidad acuífera		La profundidad es desconocida
33	Este pozo queda aguas abajo en la cuenca, con respecto al flujo de aguas subterráneas; representa al agua subterránea que está saliendo la cuenca			
37	Conocer la química de la canal	El agua de este canal es utilizado para riego (a veces con purines) de cultivos de la zona.		
41	Conocer la calidad de aguas superficiales saliendo del sector			



## **b) Campaña de Monitoreo Abril de 2009**

La campaña de Abril 2009 representa la época seca (al igual que la de Enero 2009). Los resultados de las mediciones de esta campaña se presentan en el **Anexo E**. La información obtenida se analiza separando las mediciones del sistema profundo (monitoreado por pozos), somero (monitoreado por norias) y aguas superficiales, según se presenta a continuación:

### **◆ Mediciones In – Situ**

#### **Aguas Superficiales:**

La conductividad eléctrica y oxígeno disuelto son similares a los valores medidos en la campaña anterior. Los valores de conductividad eléctrica en los dos puntos medidos entregan valores de 542 y 612  $\mu\text{S/cm}$ , mientras que las concentraciones de oxígeno disuelto presentan concentraciones de 8,73 y 8,58 mg/L.

Asimismo, las concentraciones de N-Nitrato son relativamente bajas, presentando valores menores a 5 mgN/L.

#### **Norias:**

La conductividad eléctrica (**Figura N°8.51**) es relativamente alta, con la excepción de la Noria 15 (787  $\mu\text{S/cm}$ ). Se observa el mismo patrón que en la campaña de febrero de 2009. El oxígeno disuelto y los N-Nitrato son bajos en la noria 15, lo cual también podría ser un resultado de desnitrificación.

Las concentraciones de oxígeno disuelto, para las cuatro norias restantes, presentan valores superiores a 5 mg/L (**Figura N°8.52**), las cuales son concentraciones suficientemente altas como para suponer condiciones aeróbicas en las aguas muestreadas.

Por otro lado, en la **Figura N°8.53** se observa que las concentraciones de N-Nitratos en norias del sector son relativamente altas, superando concentraciones de 15 mgN/L en 4 de las norias (exceptuando a la noria 15, la cual podría estar sujeta a desnitrificación).

#### **Pozos:**

La conductividad eléctrica medida durante la campaña de abril de 2009 (**Figura N°8.54**) varía entre 272 (Pozo 22) y 1.200  $\mu\text{S/cm}$  (Pozo 34). El valor medido en el pozo 10 (1.002  $\mu\text{S/cm}$ ) es similar a su valor medido en la campaña de enero 2009 (1.045  $\mu\text{S/cm}$ ).

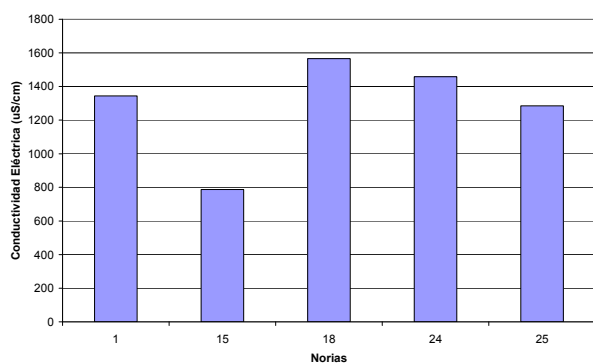
Respecto de la concentración de oxígeno disuelto (**Figura N°8.55**), ésta es muy baja en el Pozo 33, al igual que la concentración de nitrato (2,58 mgN/L), lo cual podría ser el resultado de desnitrificación. El oxígeno disuelto también es bastante bajo en el Pozo 34 (2,9 mg/L), pero está en el rango de otros pozos en el sector (5,5 y 8,36 mg/L).

Respecto a la concentración de N-Nitratos (**Figura N°8.56**), medidos en la campaña de abril

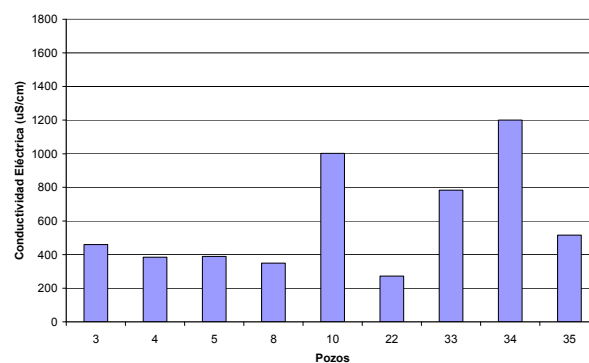
2009, éstos están por debajo del límite para consumo humano (10 mg N/L); inclusive, la mayoría de las concentraciones están por debajo de 5 mg N/L. Además, las concentraciones de nitratos en aguas superficiales son relativamente bajas durante la misma campaña de muestreos. En cambio, el contenido de nitratos en las norias del sector es relativamente alto, superando concentraciones de 15 mgN/L en 4 de las norias.

### ◆ Parámetros Químicos

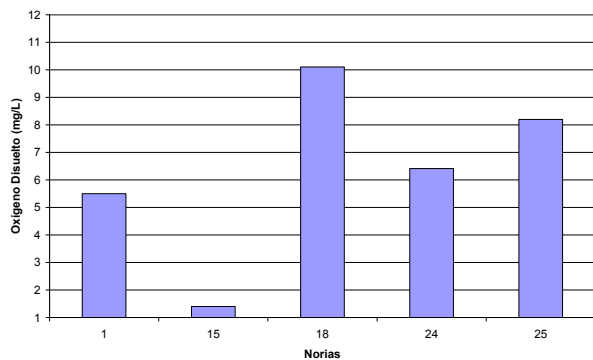
Los resultados de los análisis en laboratorio para muestras de agua en 5 norias y 9 pozos, se presenta en **Anexo E**. El monitoreo consideró el análisis de los siguientes parámetros: B; Ca; Fe; K; Mg Total; Na Total; Sr; Zn; HCO<sub>3</sub>; CO<sub>3</sub>; Cl; NH<sub>4</sub>; N; NO<sub>3</sub>; P; SO<sub>4</sub> y COT.



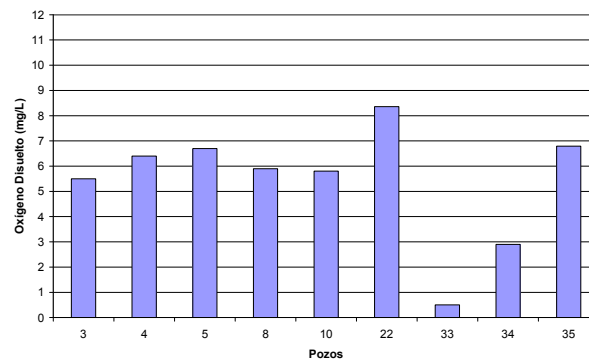
**Figura N°8.51:** Conductividad eléctrica de norias medidas durante la campaña de abril de 2009.



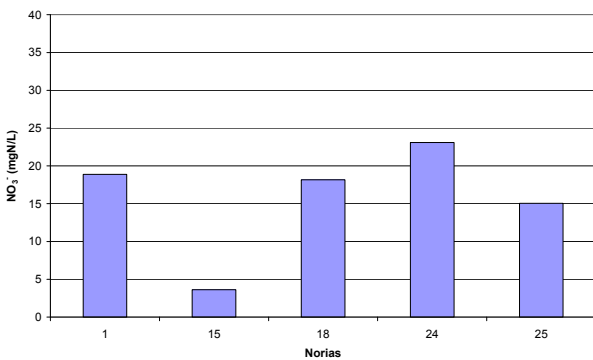
**Figura N°8.54:** Conductividad eléctrica de pozos medidas durante la campaña de abril de 2009.



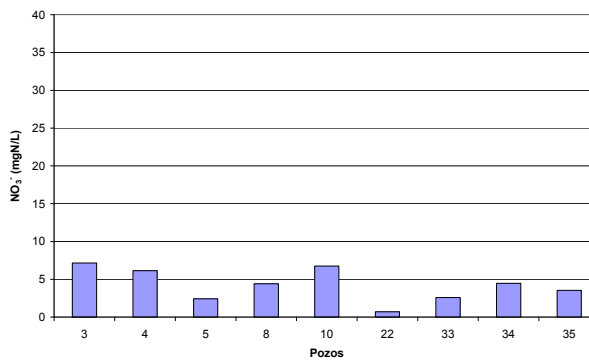
**Figura N°8.52:** Concentraciones de oxígeno disuelto en norias medidas en campaña de abril de 2009.



**Figura N°8.55:** Concentraciones de oxígeno disuelto en pozos medidas durante la campaña de abril de 2009.



**Figura N°8.53:** Concentraciones de nitratos en norias medidas durante la campaña de abril de 2009.



**Figura N°8.56:** Concentraciones de nitratos en pozos medidas durante la campaña de abril de 2009.

### c) Campaña de Monitoreo Abril de 2010

Se monitorearon las aguas en 10 pozos, 6 puntos de aguas superficiales y 16 norias en el sector de Pichidegua. Esta campaña fue realizada al final de la época seca.

#### ◆ Mediciones In – Situ

##### **Aguas Superficiales:**

Las mediciones en aguas superficiales en el sector de Pichidegua muestran una conductividad específica menor a 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura N°8.57**), concentraciones de oxígeno disuelto mayores que 5 mg/L (**Figura N°8.58**) y concentraciones de N-Nitratos menores a 2,5 mg N/L (**Figura N°8.59**).

##### **Norias:**

La conductividad específica medida durante la campaña de abril 2010 presentan valores menores a 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en las norias 14, 15, 16, 20, 27, y 29 (**Figura N°8.60**). Por otro lado, en la misma campaña, la conductividad específica es mayor que 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para las norias 1, 17, 18, 23, 24, 25, y 30.

De las norias con alta conductividad, las norias 1, 18, 24 y 25 también presentan altas concentraciones de N-Nitratos, con valores mayores que 10 mg N/L (límite de consumo humano). Destaca la concentración de N-Nitrato en noria 1, la cual alcanza niveles superiores a 60 mg N/L. Por otro lado, el resto de las norias presentan concentraciones de N-Nitratos menores a 10 mg N/L (**Figura N°8.61**).

Respecto a las concentraciones de Oxígeno Disuelto, ésta varía entre 2 y 6 mg/L (**Figura N°8.62**). Si bien en 3 norias las concentraciones están entre 2.4 y 3 mg/L (norias 16, 17 y 24), estos valores no son lo suficientemente bajos como para indicar condiciones reductoras que promueva la desnitrificación.

##### **Pozos:**

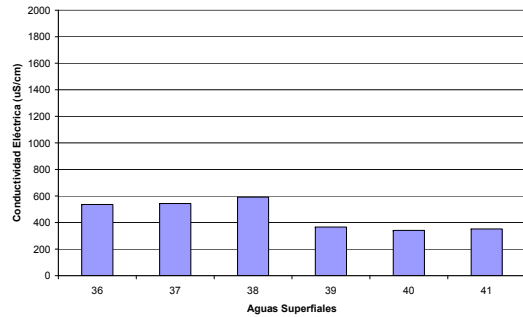
La conductividad específica del agua de los pozos 3, 4, 5, 8, 32, y 33 medidas en abril 2010 es menor o igual a 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura N°8.63**). La conductividad específica medidas en los pozos 10 y 34 es mayor a 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , indicando una mayor presencia de iones disueltos en el agua.

A pesar de lo antes indicado (altas C.E. en pozos) las concentraciones de N-Nitratos son menores que 10 mg N/L en todos los pozos muestreados (**Figura N°8.64**).

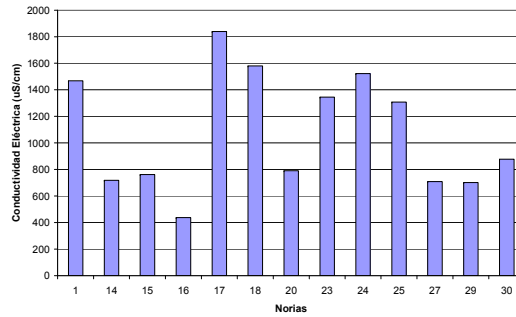
El oxígeno disuelto es mayor que 4 mg/L indicando que no se tienen condiciones anaeróbicas en el acuífero (**Figura N°8.55**).

#### ◆ Mediciones de Química Completa

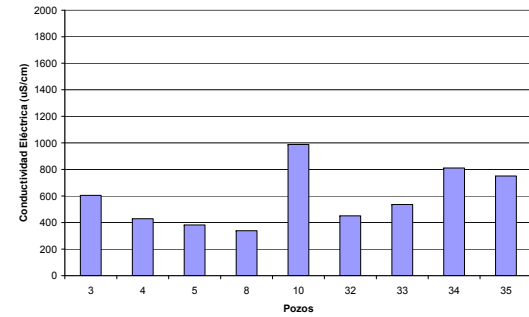
Los resultados obtenidos se presentan en **Anexo E** (6 norias, 8 pozos). El monitoreo consideró el análisis de los siguientes parámetros: Al; Ag; As; B; Ba; Be; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; K; Li; Mg; Mn; Mo; Na; Ni; Pb; Se; Si; Sn; Sr; Zn; HCO<sub>3</sub>; CO<sub>3</sub>; Cl; NO<sub>2</sub>; N; NO<sub>3</sub>; NH<sub>4</sub>; P; SO<sub>4</sub> y COT.



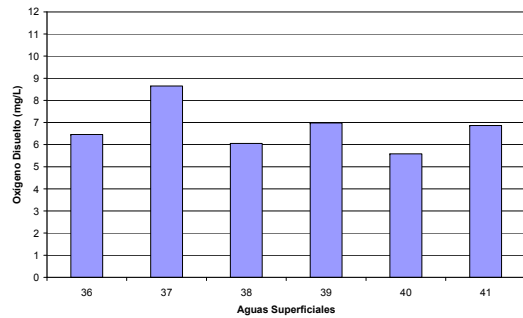
**Figura N°8.57:** Conductividad específica (25°C) de aguas superficiales medidas durante la campaña de abril 2010.



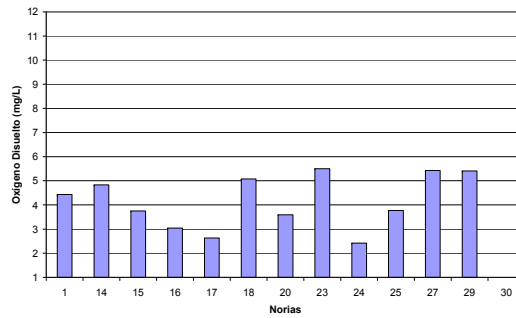
**Figura N°8.60:** Conductividad Específica (25°C) en norias medidas durante la campaña de abril 2010.



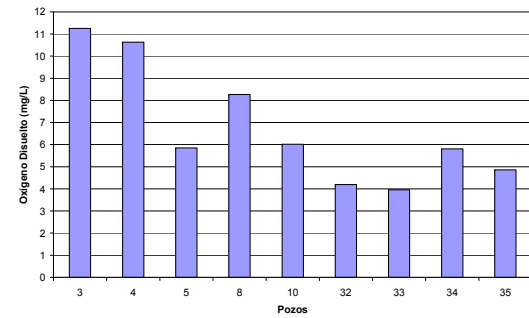
**Figura N°8.63:** Valores de conductividad específica (25°C) en pozos medidas durante la campaña de abril 2010.



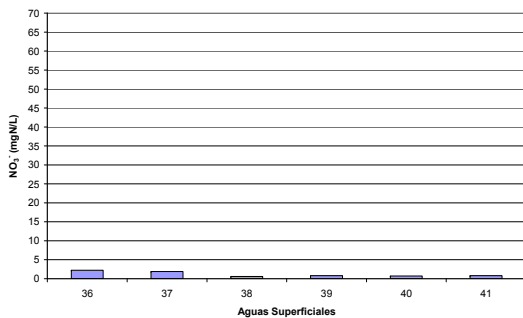
**Figura N°8.58:** Valores de Oxígeno Disuelto de aguas superficiales medidas durante la campaña de abril 2010.



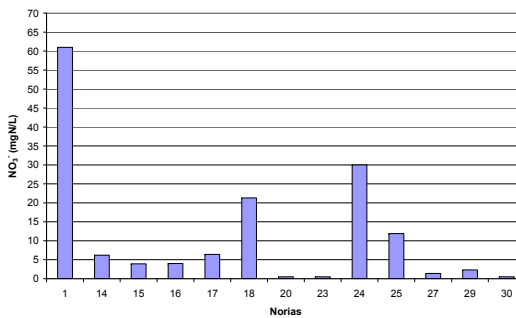
**Figura N°8.61:** Oxígeno Disuelto en norias medidas durante la campaña de abril 2010.



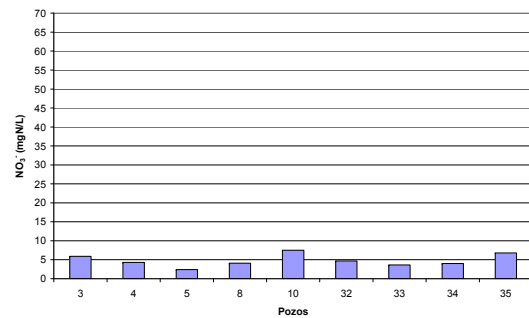
**Figura N°8.64:** Concentración de Oxígeno Disuelto en pozos medidas durante la campaña de abril 2010.



**Figura N°8.59:** Concentraciones de N-Nitrato de aguas superficiales medidas durante la campaña de abril 2010.



**Figura N°8.62:** Concentración de N-Nitrato en norias medidas durante la campaña de abril 2010.



**Figura N°8.65:** N-Nitrato en pozos medidos durante la campaña de abril 2010.



#### **d) Campaña de Monitoreo Octubre de 2010**

Durante esta campaña se monitorearon 9 pozos, 17 norias y 6 puntos de aguas superficiales. Esta campaña fue efectuada al final de la época húmeda.

##### ◆ **Mediciones In – Situ**

##### **Aguas Superficiales:**

En las aguas superficiales se observan valores de conductividad específica muy similares entre sí, con valores entre 555 a 610  $\mu\text{S/cm}$  (**Figura N°8.66**). Asimismo, las mediciones de concentración de N-Nitrato (1,6 a 3,5 mg N/L) y oxígeno disuelto (9 a 10,5 mg/L) también muestran valores similares entre sí (ver **Figuras N°s 8.67 y 8.68**).

##### **Norias:**

En la **Figura N°8.69** se reportan las mediciones de conductividad específica medidas en aguas de norias. Se observan valores relativamente altos de C.E. para las norias 1, 23, 24, 25, 17 y 18 (1400 a 1700  $\mu\text{S/cm}$ ), siendo más bajos (400 a 800  $\mu\text{S/cm}$ ) en las norias 13, 15, 16, 20, y 29. Luego, se prevé elevadas concentraciones de algunos parámetros para el grupo de norias con más altos valores de conductividad. De hecho, se observa que las norias 23 y 24 tienen altas concentraciones de N-Nitrato (44 y 43 mg N/L, respectivamente) y nitrógeno total (43 y 86 mg/L, respectivamente). Cabe destacar que la medición de N-Nitrato en el pozo 18 de 32 mg N/L no es confiable por cuanto la medición de nitrógeno total es de 19,7 mg/L. Finalmente, las mediciones de oxígeno disuelto (comprendidas entre 4 y 9 mg/L, ver **Figura N°8.70**) indican que las condiciones son aeróbicas. Las mediciones de N-Nitratos son presentadas en la **Figura N° 8.71**.

##### **Pozos:**

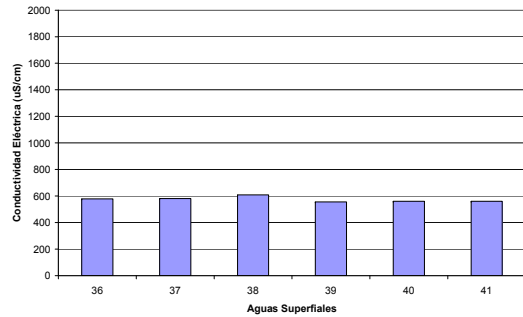
En las aguas de los pozos se observa un amplio rango de valores de conductividad específica (250-1000  $\mu\text{S/cm}$ , ver **Figura N°8.72**). Los pozos 10, 34, y 35 son los que presentan los valores más altos de conductividad (995, 803, y 750  $\mu\text{S/cm}$ , respectivamente).

Todas las mediciones de N-Nitrato se encuentran bajo del límite de uso en agua potable (10 mg N/L), siendo el pozo 10 el que presenta una mayor concentración (8,1 mg N/L, ver **Figura N°8.73**).

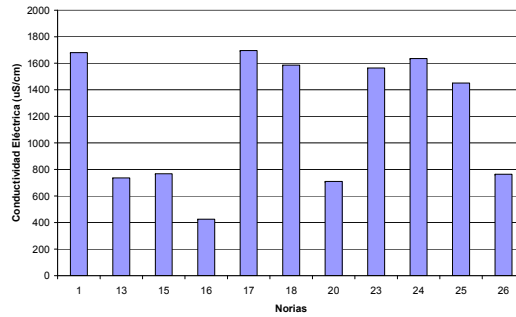
Finalmente, el rango de oxígeno disuelto medido (4,5 – 9,5 mg/L) muestra que las condiciones de las aguas en el sistema profundo son aeróbicas, lo cual no facilita el proceso de denitrificación. (**Figura N°8.74**).

##### ◆ **Mediciones de Química Completa**

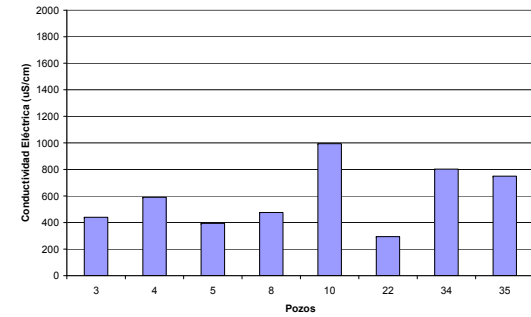
Los resultados obtenidos en los análisis de laboratorio se presentan en **Anexo E**. Los análisis químicos completos se efectuaron en 9 norias, 2 pozos y 2 puntos de aguas superficiales. El monitoreo consideró el análisis de los siguientes parámetros: Al; Ag; As; B; Ba; Be; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; K; Li; Mg; Mn; Mo; Na; Ni; Pb; Sb; Se; Si; Sn; Sr; Zn; HCO<sub>3</sub>; CO<sub>3</sub>; Cl; N; NO<sub>3</sub>; NH<sub>4</sub>; P; SO<sub>4</sub>.



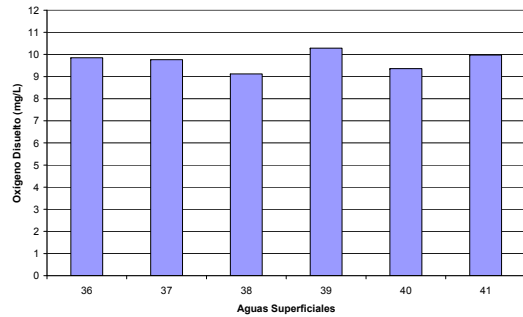
**Figura N°8.66:** Conductividad Específica en aguas superficiales, medidas durante la campaña de octubre 2010.



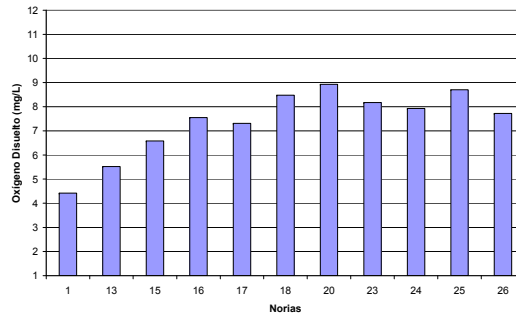
**Figura N°8.69:** Conductividad Específica en norias, medidas durante la campaña de octubre 2010.



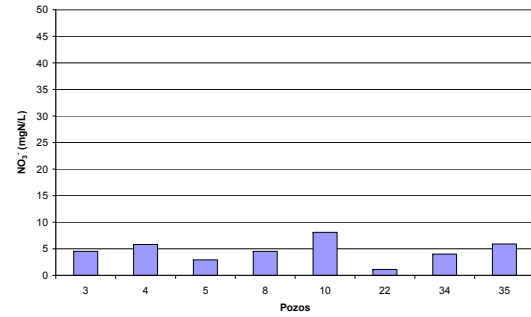
**Figura N°8.72:** Conductividad específica en pozos, medidas durante la campaña de octubre 2010.



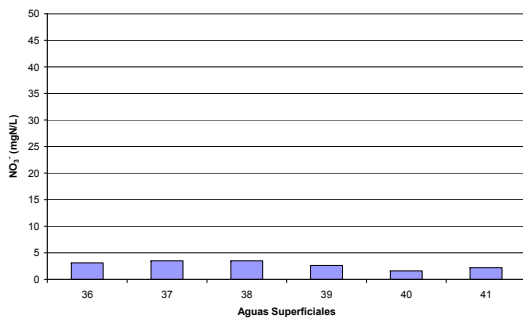
**Figura N°8.67:** Oxígeno Disuelto en aguas superficiales, medidas durante la campaña de octubre 2010.



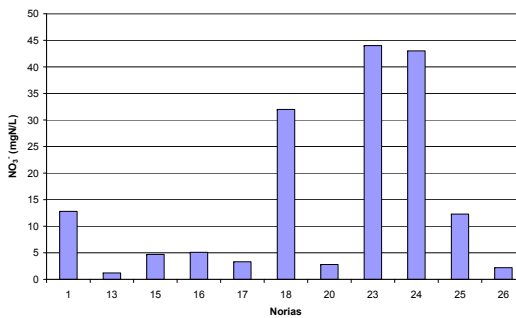
**Figura N°8.70:** Oxígeno Disuelto en norias, medidas durante la campaña de octubre 2010.



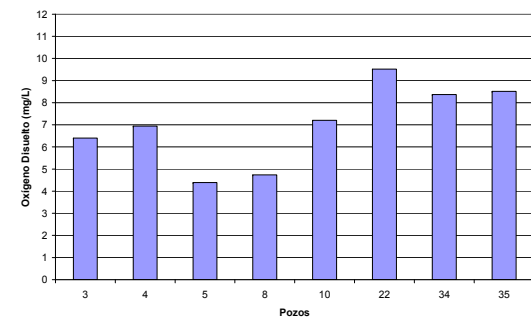
**Figura N°8.73:** Nitrato en pozos, medidas durante la campaña de octubre 2010.



**Figura N°8.68:** Nitrato en aguas superficiales, medidas durante la campaña de octubre 2010.



**Figura N°8.71:** Nitrato en norias, medidas durante la campaña de octubre 2010.



**Figura N°8.74:** Oxígeno Disuelto en pozos, medidas durante la campaña de octubre 2010.

## e) Campaña de Monitoreo Mayo de 2011

### ◆ Mediciones In – Situ

#### **Aguas Superficiales:**

Las mediciones en aguas superficiales en el sector de Pichidegua (2 puntos monitoreados) muestran una conductividad específica menor a 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , concentraciones de nitratos menores a 5 mg N/L y concentraciones de oxígeno disuelto mayores que 5 mg/L.

#### **Norias:**

Las conductividades específicas medidas durante la campaña de mayo 2011 presentan valores menores a 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en las norias 16, 26, 27, y 29 (**Figura N°8.75**). Por otro lado, para la misma campaña, la conductividad específica es mayor que 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  para las norias 1, 15, 17, 18, 20, 24 y 25. De las norias con alta C.E., sólo las norias 18 y 1 presentan concentraciones de N-Nitratos mayores que 10 mg N/L (límite de consumo humano) (**Figura N°8.76**). La concentración de N-Nitrato en noria 1 alcanza el mayor nivel medido (31 mg N/L).

Finalmente, las mediciones de oxígeno disuelto (comprendidas entre 2 y 7 mg/L, ver **Figura N°8.77**) indican que no se tiene una condición reductora.

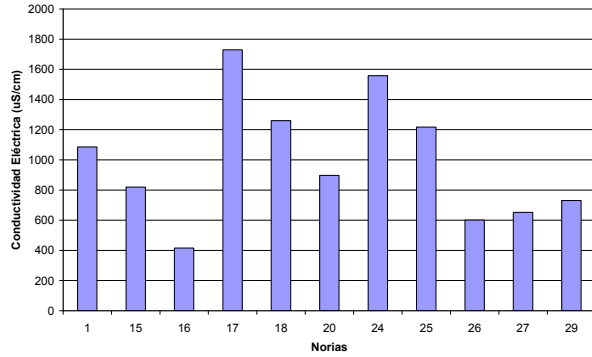
#### **Pozos:**

La conductividad específica del agua de los pozos 4, 5, 8 y 35 medidas en mayo 2011 es menor o igual a 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura N°8.78**). La conductividad específica medidas en los pozos 3, 10 y 34 es mayor a 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , indicando una mayor presencia de iones disueltos en el agua. A pesar de esta observación, las concentraciones de N-Nitratos son menores que 10 mg N/L en todos los pozos muestreados (**Figura N°8.79**).

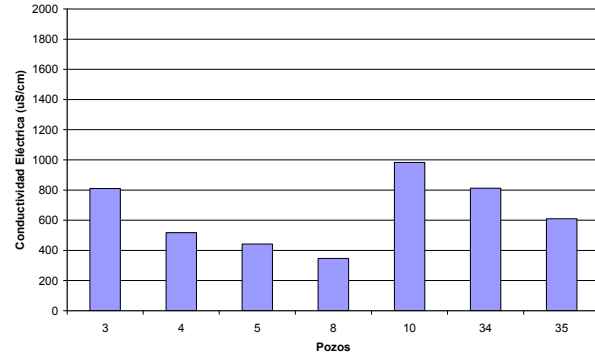
Respecto a las mediciones de oxígeno disuelto, éstas fueron mayor que 4 mg/L, indicando que no se tienen condiciones anaeróbicas en el acuífero (**Figura N°8.80**).

### ◆ Mediciones de Química Completa

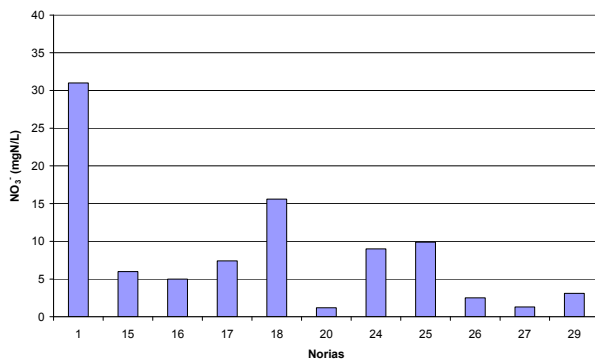
Los resultados de los análisis químicos realizados en laboratorio se presenta en el **Anexo E**. Los análisis químicos completos se efectuaron en 11 norias, 7 pozos y 2 puntos de aguas superficiales. El monitoreo consideró el análisis de los siguientes parámetros: Al; Ag; As; B; Ba; Be; Bi; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; K; Li; Mg; Mn; Mo; Na; Ni; Pb; Sb; Se; Si; Sn; Sr; Ti; Tl; V; Zn; HCO<sub>3</sub>; CO<sub>3</sub>; Cl; N; NO<sub>3</sub>; NH<sub>4</sub>; P; SO<sub>4</sub>.



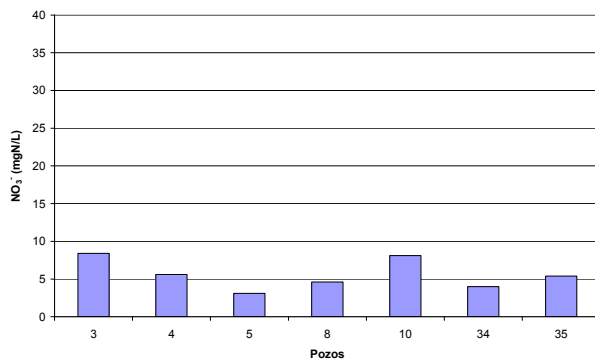
**Figura N°8.75:** Conductividad específica en **norias**, medidas durante la campaña de mayo 2011.



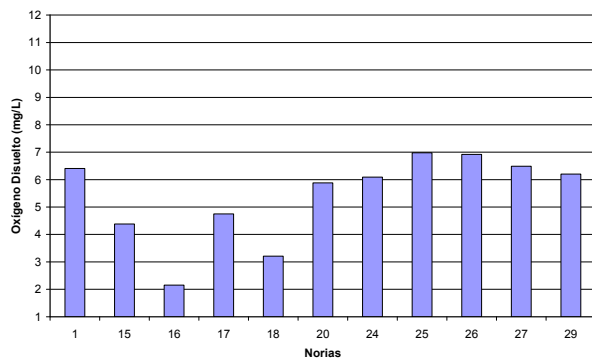
**Figura N°8.78:** Conductividad específica en **pozos**, medidas durante la campaña de mayo 2011.



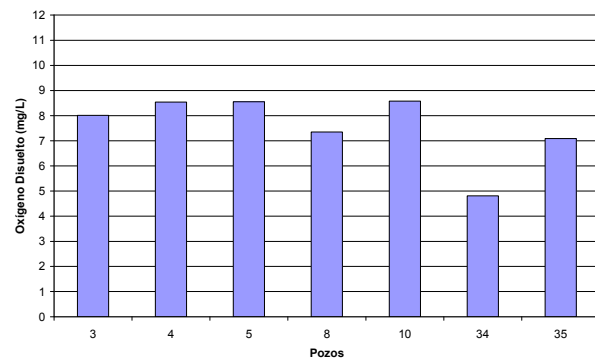
**Figura N°8.76:** N-Nitrato en **norias**, medidos durante la campaña de mayo 2011.



**Figura N°8.79:** N-Nitrato en **pozos**, medidos durante la campaña de mayo 2011.



**Figura N°8.77:** Oxígeno Disuelto en **norias**, medidos durante la campaña de mayo 2011.



**Figura N°8.80:** Oxígeno Disuelto en **pozos**, medidos durante la campaña de mayo 2011.



## **f) Campaña de Monitoreo Octubre de 2011**

### ◆ **Mediciones In – Situ**

#### **Aguas Superficiales (2 puntos):**

Las mediciones en aguas superficiales en el sector de Pichidegua (2 puntos monitoreados) muestran una conductividad específica menor a 600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , concentraciones de N-Nitratos menores a 5 mg N/L y concentraciones de oxígeno disuelto mayores que 5 mg/L.

#### **Norias (10 puntos):**

Las conductividades específicas medidas durante la campaña de octubre 2011 presentan valores menores a 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en las norias 15, 20 y 29 (**Figura N°8.81**). Por otro lado, para la misma campaña, la conductividad específica es mayor que 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en las norias 1, 17, 18, 23, 24, 25 y 26.

De las norias con alta C.E., las norias 1, 18, 23 y 24 son las que presentan concentraciones de N-Nitratos mayores que 10 mg N/L (límite para consumo humano) (**Figura N°8.82**). La concentración de N-Nitrato en las norias 23 y 24 son las que alcanzan los mayores niveles medidos, con concentraciones de 35 y 24 mg N/L, respectivamente.

Las mediciones de oxígeno disuelto (comprendidas entre 5 y 9 mg/L, ver **Figura N°8.83**) indican condiciones aeróbicas en las aguas subterráneas del sistema somero.

#### **Pozos (7 puntos):**

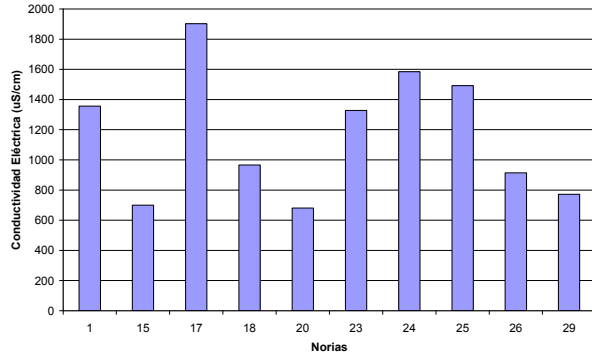
La conductividad específica del agua en los pozos 3, 4, 5, 8, 34 y 35, medidas en octubre de 2011, es menor o igual a 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (**Figura N°8.84**). La conductividad específica medida en el pozo 10 es mayor a 800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , indicando una mayor presencia de iones disueltos en el agua. Los pozos 3 y 34 disminuyeron levemente su C.E. respecto al monitoreo de mayo de 2011, lo cual puede corresponder a un efecto estacional y dilución por corresponder al término del período húmedo.

Las concentraciones de N-Nitratos son menores que 10 mg N/L en todos los pozos muestreados (**Figura N°8.85**).

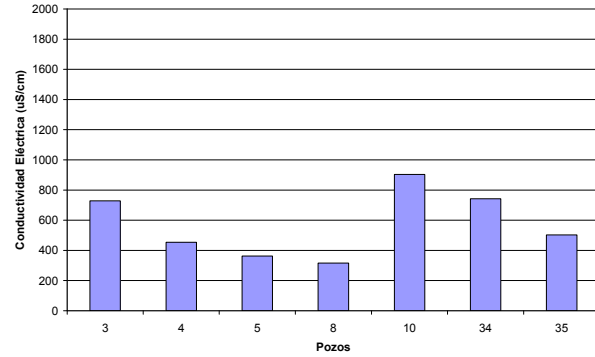
Respecto a las mediciones de oxígeno disuelto, éstas fueron mayores que 7 mg/L, indicando que se tienen condiciones aeróbicas en el acuífero (**Figura N°8.86**).

### ◆ **Mediciones de Química Completa**

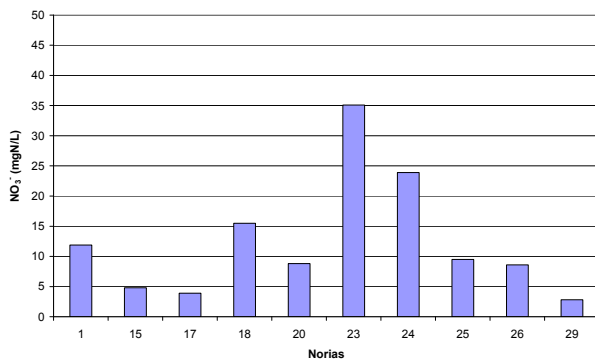
Los resultados de los análisis químicos efectuados en laboratorio se presentan en **Anexo E**. Los análisis químicos completos se efectuaron en 9 norias, 5 pozos y 2 puntos de aguas superficiales. El monitoreo consideró el análisis de los siguientes parámetros: Al; Ag; As; B; Ba; Be; Bi; Ca; Cd; Co; Cr; Cu; Fe; K; Li; Mg; Mn; Mo; Na; Ni; Pb; Sb; Se; Si; Sn; Sr; Ti; Tl; V; Zn; HCO<sub>3</sub>; CO<sub>3</sub>; Cl; N; NO<sub>3</sub>; NH<sub>4</sub>; P; SO<sub>4</sub>.



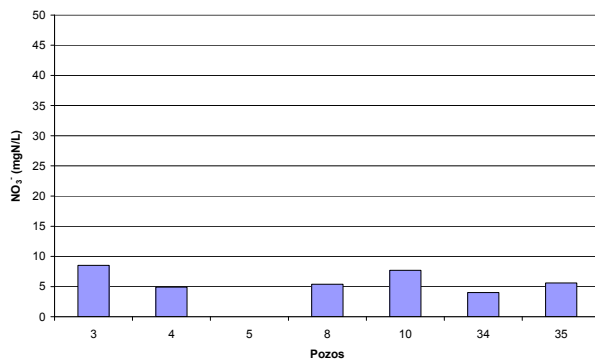
**Figura N°8.81:** Conductividad específica en norias, medidas en octubre 2011.



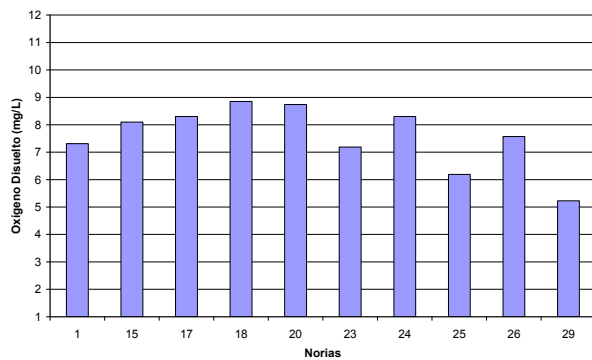
**Figura N°8.84:** Conductividad específica en pozos, medidas durante la campaña de octubre 2011.



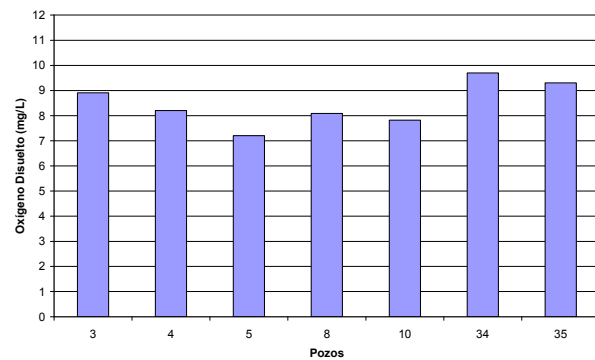
**Figura N°8.82:** Nitrato en norias, medidas durante la campaña de octubre 2011.



**Figura N°8.85:** Nitrato en pozos, medidas durante la campaña de octubre 2011.



**Figura N°8.83:** Oxígeno Disuelto en norias, medidas durante la campaña de octubre 2011.



**Figura N°8.86:** Oxígeno Disuelto en pozos, medidas durante la campaña de octubre 2011.

### 8.2.3 Mediciones Isotópicas

#### a) Isótopos Estables del Hidrógeno y Oxígeno del Agua

Se efectuó una medición de isótopos estables del Hidrógeno y Oxígeno del agua en una serie de pozos y norias distribuidos en el área de estudio.

La **Figura N°8.87** presenta los isótopos estables de agua medidos en el sector. Las aguas superficiales, usadas en el regadío de cultivos del sector definen la marca de las aguas de riego. Se observa que los isótopos estables de las aguas superficiales se encuentran más empobrecidos (valores de  $\delta^{18}\text{O}$  más negativos) en los isótopos más pesados. En particular, los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  de esta agua presentan valores entre -10,8 y -12‰, lo cual corresponde a precipitación proveniente de una mayor altitud a la existente en la cuenca (de 1250 a 1750 m.snm según **Figura N°2.4**, Capítulo 2). Este comportamiento es coherente si se considera que el origen de estas aguas superficiales corresponde a los ríos Cachapoal y Tinguiririca, los cuales nacen a mayores altitudes en la cordillera de los Andes. En esta figura se observa además que un gran número de las norias presentan una marca isotópica cercana a la marca de riego, sugiriendo que el origen de las agua someras correspondería a la recarga por riego proveniente del Río Tinguiririca.

Al otro extremo de la **Figura N° 8.87** se observa un grupo de pozos y una noria con una marca isotópica mucho más enriquecida en los isótopos pesados del agua ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ), lo que definiría la marca del agua de recarga asociada a la precipitación local. Lo antes indicado se ve reforzado por el hecho que los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  medidos en esta agua, con valores entre -6 y -7‰, provendría de precipitación producida a una altura de 500 m.snm (ver **Figura N°2.4**), lo cual es un valor muy cercano a la altitud de la cuenca. Además, la ubicación de la noria 16 y pozo 8 en el piedemonte, afuera de las zona de cultivos, sugiere que el agua en sus captaciones provendría de recarga local.

Luego, hay una serie de muestras que tienen una composición isotópica intermedia entre el agua de riego y el agua de recarga local. En general las aguas del acuífero somero (norias) muestran una mayor contribución de agua de riego en comparación con el agua del acuífero profundo representado por los pozos.

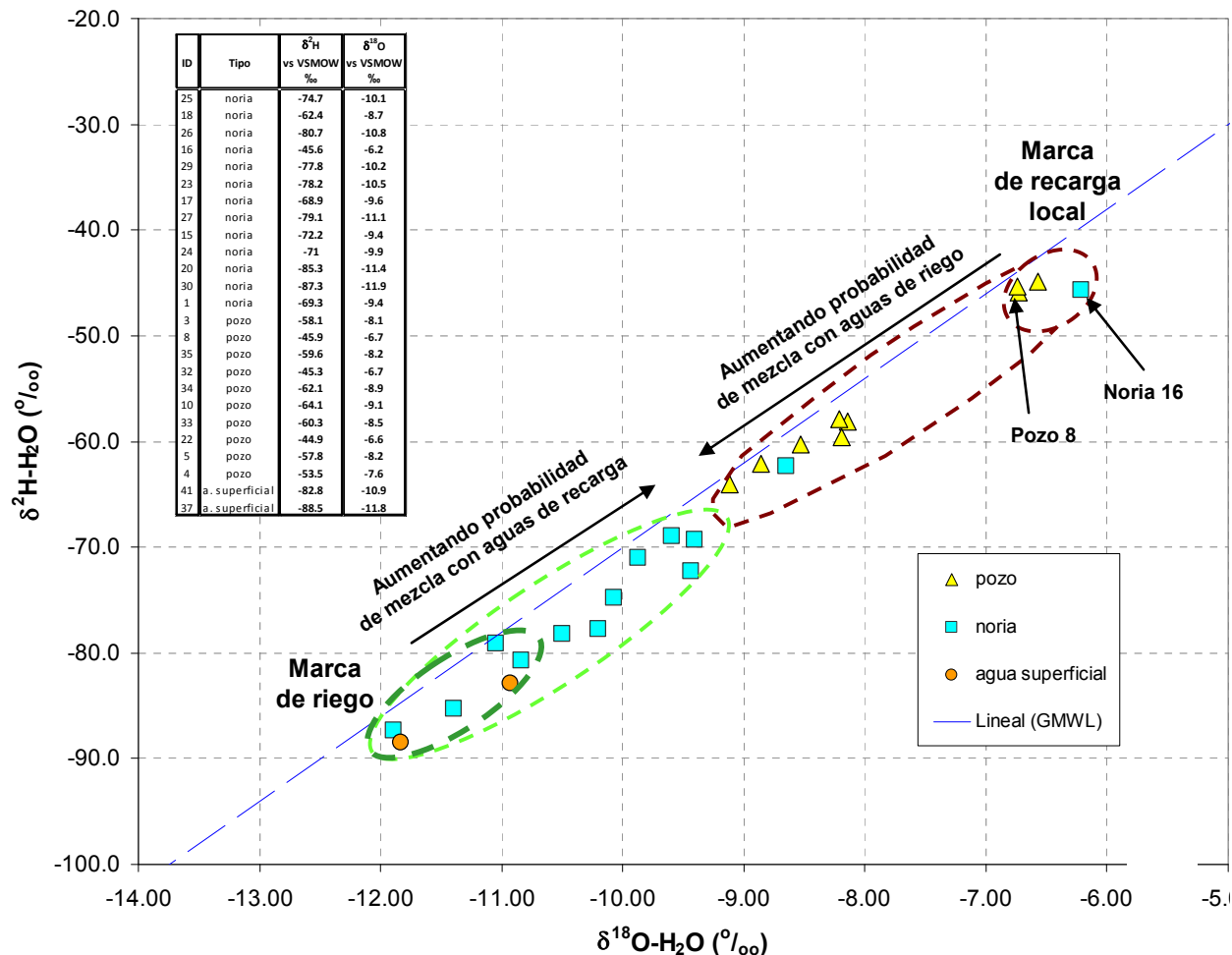


Figura N° 8.87: δ¹⁸O y δ²H de agua en el sector Pichidegua.

### b) Isótopos Radioactivos: Tritio (3H) del Agua

Las mediciones de tritio en las aguas subterráneas en el sector Pichidegua son inferiores al límite de detección analítico, salvo en la medición del Río Tinguiririca, la que tiene un valor de 1,8 UT (ver **Figura N°8.88**).

Considerando que el agua de precipitación debe tener un valor alrededor de 5 UT y que la media-vida de tritio es 12,3 años, se observa que el agua del acuífero profundo tiene un tiempo de residencia de más de 30 años basado en valores en los pozos de 0,8 UT.

Igualmente las aguas en las norias tienen valores de 0,8, lo que significa que las aguas someras viajan muy lentamente por los estratos someros aunque la napa está relativamente cerca de la superficie de terreno.

El Río Tinguiririca también debería tener valores de Tritio parecidos a la precipitación, pero los valores son más bajos por la influencia de descarga de aguas subterráneas hacia el río.



Tomando en cuenta que el acuífero somero está influenciado por agua de riego proveniente del Río Tinguiririca con un valor de tritio de 1,8, se observa que las aguas del acuífero somero tendrían un tiempo de residencia de unos 12 años.

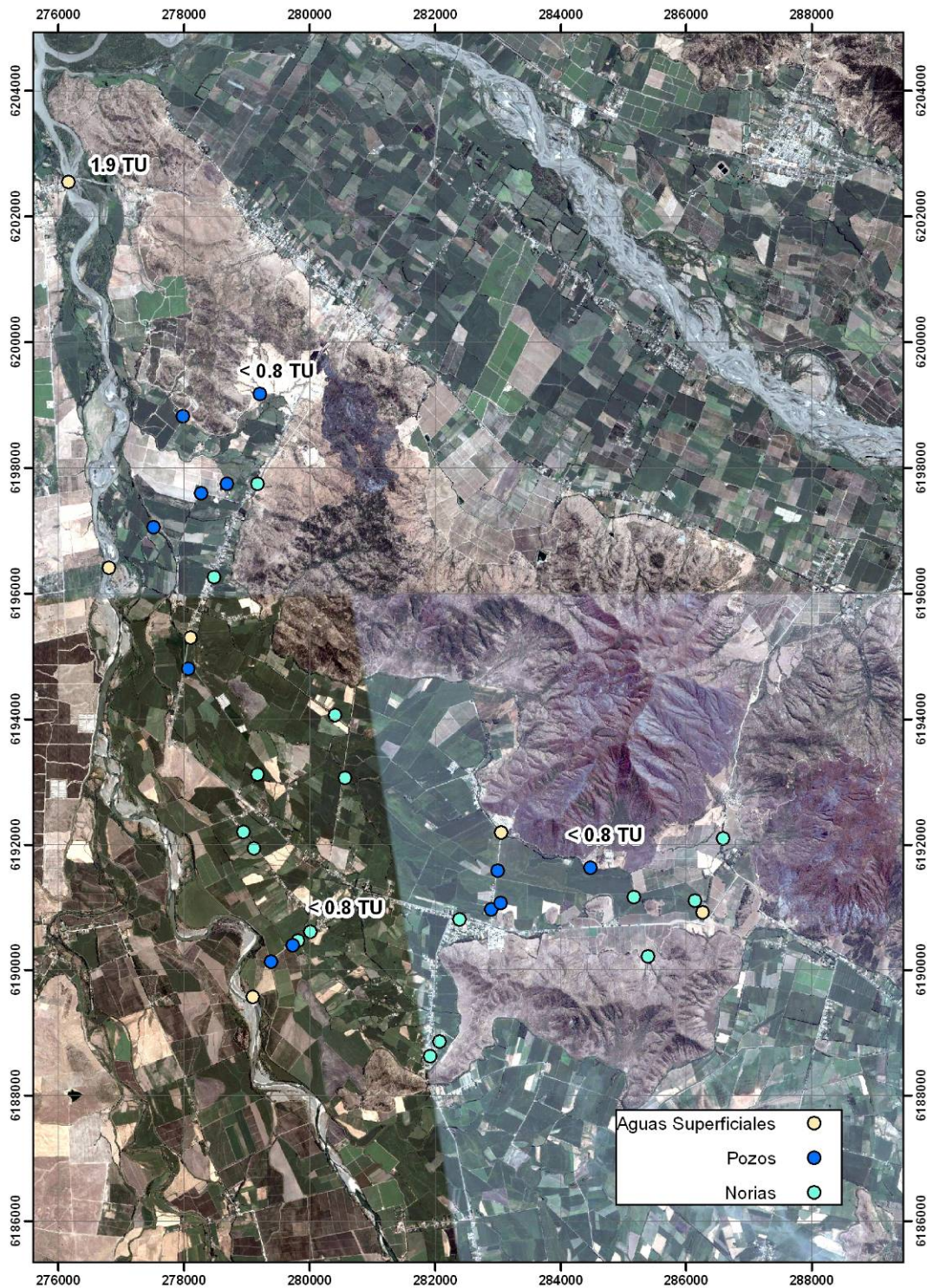


Figura N° 8.88: Mediciones de Tritio en agua, en el sector Pichidegua.

**c) Mediciones Isotópicas de Nitrógeno-15 y Oxígeno-18 de Nitrato en Aguas Subterráneas**

En **Tabla N°8.8** se reportan los resultados de análisis de los isótopos de nitrato (nitrógeno-15 y oxígeno-18), de las muestras colectadas en abril 2009. Los resultados de las muestras colectadas en abril 2010 son presentados en la **Tabla N°8.8**

**Tabla N°8.8:** Resultado análisis de Isótopos de Nitrato (N-15 y O-18, campaña abril 2009).

Pozo ID	NO <sub>3</sub> mgN/L	δ <sup>15</sup> N ‰ (AIR)	δ <sup>18</sup> O ‰ (VSMOW)
25	11,9	14,53	3,49
23	0,5	13,61	2,67
24	30	9,59	3,76
18	21,3	14,11	4,54
17	6,4	13,23	6,93
1	61	9,88	1,38
30	0,5	9,09	6,57
29	2,3	11,54	12,41
15	3,9	20,99	11,57
16	4	4,00	5,10
32	4,7	5,98	
33	3,6	5,71	
35	6,8	5,27	
34	4	6,94	4,16
3	5,9	7,98	3,97
4	4,3	5,68	
5	2,4	7,78	
8	4,1	7,96	
10	7,5	5,92	1,66
37	1,9	6,47	3,80
41	0,8	5,10	

**Tabla N°8.9:** Resultados de análisis de Nitrógeno-15 y Oxígeno-18 de Nitrato (abril 2010).

Pozo ID	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg N/L	δ <sup>15</sup> N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ‰ (AIR)	δ <sup>18</sup> O-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ‰ (VSMOW)
15	8,47	20,25	-
16	4,7	5,75	-
1	34	12,41	-
4	4,89	8,74	-
5	2,58	9,20	-
8	4,56	8,76	-
3	7,3	8,65	5,45
10	7,4	6,84	-
17	2,8	14,65	4,00
18	18,7	15,74	-
22	1	39,60	13,15
23	6,72	18,81	6,91
24	27,75	10,16	3,70
25	13,8	15,78	4,22
29	2,6	11,74	-
27	2,4	10,18	-
34	4	9,18	-
32	3,5	7,50	-
33	3,87	10,02	-
35	4,2	7,07	-
37	2,5	7,62	-

## 9. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

---

### 9.1 SECTOR SAN PEDRO

#### 9.1.1 Hidroquímica

##### a) Marca Química

En la **Figura N°9.1** se presentan los diagramas Piper de las muestras asociadas a las 5 campañas de monitoreo en donde se realizó análisis químico completo de las muestras de agua del Sector San Pedro. Las campañas que contaron con análisis químicos completos corresponden a las campañas de abril 2009, abril 2010, octubre 2010, abril 2011 y septiembre 2011, las cuales comprenden períodos secos (previos al inicio de las lluvias) y períodos húmedos (posterior a las lluvias).

En los diagramas Piper se observa la distribución de los aniones (Cloruro, Bicarbonato y Sulfato) y de los cationes (Calcio, Sodio + Potasio y Magnesio) de las muestras tomadas, definiendo una marca química para las distintas muestras presentadas. Se hace presente que las muestras de purines mostrados en estos diagramas, corresponden a los obtenidos en la campaña de monitoreo de abril de 2009.

Se observa que la “marca química” de los purines y la “marca química” de las aguas subterráneas (aguas naturales) son significativamente diferentes. Al respecto, se observa que los purines presentan un alto contenido de bicarbonato y de sodio + potasio. Por otro lado, en las muestras de aguas naturales de pozos y norias, si bien el anión predominante también es el bicarbonato, la diferencia radica en los cationes predominantes, donde se observa que ningún catión es preponderante por sobre los otros, quedando clasificadas como *Bicarbonatadas Cálcidas y/o Magnésica*.

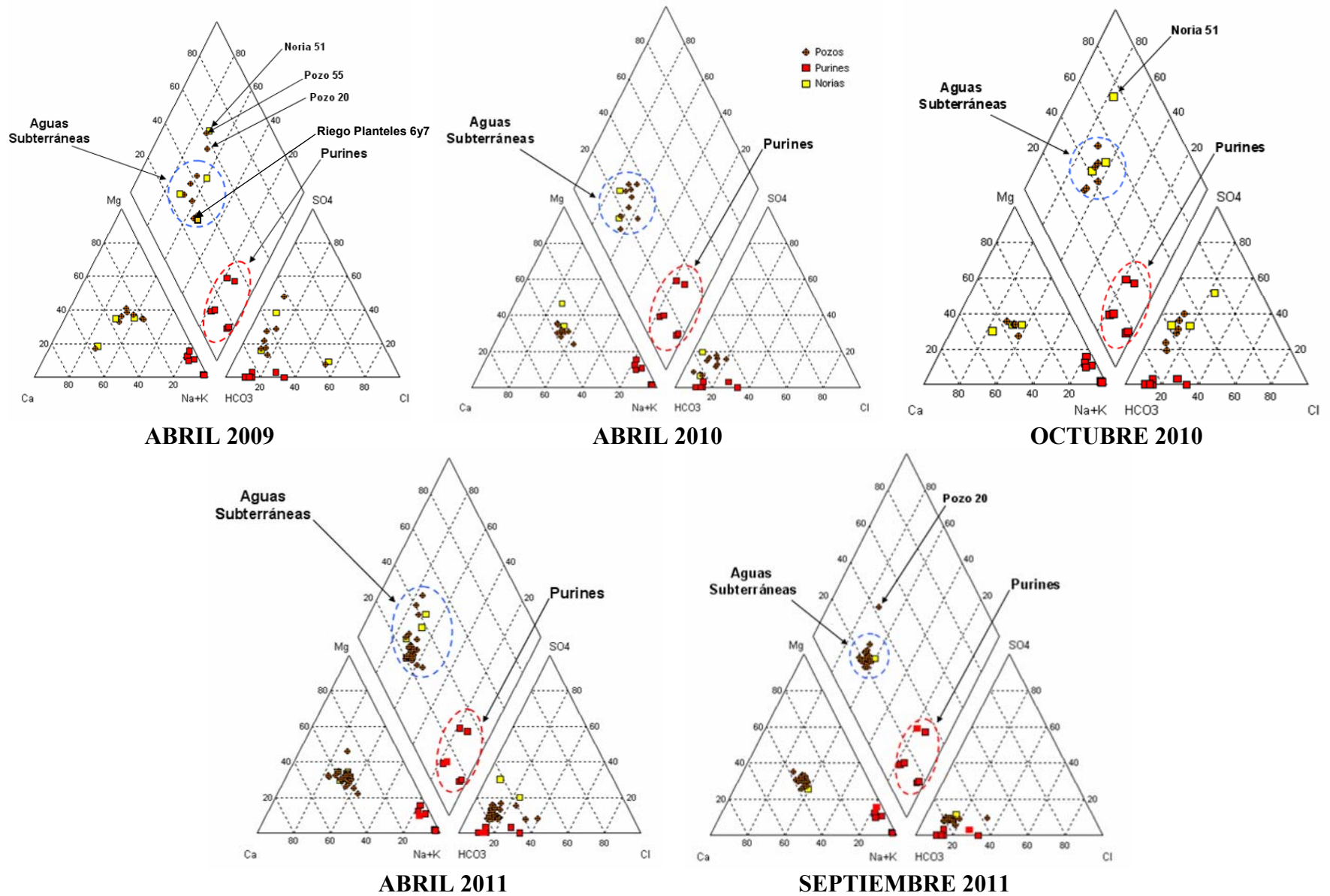
De acuerdo a lo anterior, las marcas químicas de las aguas subterráneas se encuentran agrupadas (mismo tipo de agua) entre muestreos (2009, 2010 y 2011), con la excepción de la noria 51 (abril/mayo 2009 y septiembre 2010) y de los pozos 55 y 20 (abril/mayo 2009), las cuales presentan un alto contenido del anión Cloruro. Se destaca que, de acuerdo a lo indicado en la **Figura N°9.1**, la marca química y las concentraciones de iones del pozo 55 son muy parecidas a las de la noria 51 (ubicada aguas arriba del pozo 55). Las elevadas concentraciones de la noria 51 en comparación con las otras aguas someras de la cuenca, indicarían un aporte de una fuente

puntual de sales. La similitud con las concentraciones del pozo 55 indica que un mismo tipo de agua es el que está ingresando al acuífero en esa zona.

La diferencia significativa que se observa en la química entre los purines y el agua subterránea prácticamente se pierde en el agua de riego debido a la dilución de los purines con el agua subterránea en el embalse de riego. Esto se ve claramente en la **Figura N°9.1** (campana Abril 2009), donde se observa que el agua de riego (Riego Planteles 6 y 7), correspondiente a la mezcla entre purines y aguas subterráneas, se acerca más a la química del agua subterránea. Sin embargo, debido a la gran concentración de nitrógeno en los purines, el agua de riego todavía tiene una concentración apreciable de nitrato con una concentración de 28 mgN/L y de 33 mgN/L como nitrógeno total.

En conclusión, en este Sector Piloto del Proyecto se observa que los trazadores químicos, con la excepción del Nitrato, no son buenos indicadores para evaluar la influencia de los purines en las aguas subterráneas.





**Figura N°9.1:** Diagrama Piper de aguas y purines del Sector San Pedro, monitoreadas en diferentes fechas (5 campañas de monitoreo).

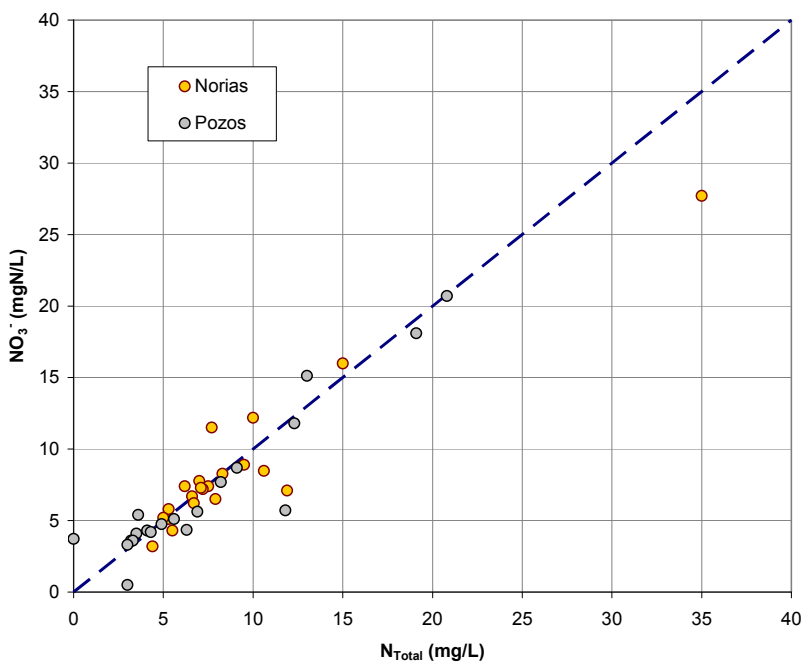
## b) Nitratos vs Otras Especies de Nitrógeno

La comparación entre las concentraciones de N-Nitratos y Nitrógeno Total permite establecer si son los nitratos la especie dominante dentro de las especies de nitrógeno susceptibles de encontrar en las aguas subterráneas.

En las distintas campañas de terreno efectuadas, se realizaron mediciones conjuntas de nitrato y nitrógeno total en norias y pozos seleccionados. En la **Figura N°9.2** se observa que el nitrato es la especie de nitrógeno dominante en las muestras, observándose una tendencia de las mediciones a localizarse en la identidad ( $[\text{NO}_3^-] = [\text{N}_{\text{Total}}]$ ); sin embargo, se observa alguna dispersión.

Se prevé que la dispersión de datos en torno a la recta identidad (concentración de  $[\text{NO}_3^-]$  vs  $[\text{N}_{\text{total}}]$ ) corresponden a problemas analíticos (de laboratorio), los cuales son particularmente evidentes en los casos en que  $[\text{NO}_3^-] > [\text{N}_{\text{total}}]$ . Otra posible explicación a las diferencias observadas correspondería a casos donde, probablemente, además de nitratos, presentarían otras especies de nitrógeno en solución ( $[\text{NO}_3^-] \neq [\text{N}_{\text{total}}]$ ).

No obstante lo anterior, esta figura muestra que los nitratos son la especie preponderante de nitrógeno en las aguas subterráneas muestreadas.



**Figura N°9.2:** N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> vs N<sub>Total</sub>, obtenidos en las diferentes campañas de monitoreo realizadas en San Pedro.

### c) Variación Temporal y Espacial de Nitratos en Sector San Pedro

Las concentraciones de N-Nitratos medidos en el tiempo en las norias y los pozos del sector San Pedro, son presentadas en las **Figuras N° 9.3** (norias) y **9.4** (pozos).

De modo general, se observa que temporalmente las concentraciones de N-Nitratos en norias y pozos no presentan variaciones importantes en su concentración. También se observa que las concentraciones están bajo el nivel permisible para consumo humano (<10 mg N/L), con algunas excepciones asociadas a situaciones localizadas. Una visión más específica, es presentada en los siguientes puntos.

#### ◆ **Norias**

Las concentraciones de N-Nitratos medidas en las norias de San Pedro presentan valores comprendidos entre 5 y 10 mg N/L, con la excepción de las norias 5, 31 y 51, específicamente en la campaña de febrero 2009, en donde las norias 31 y 5 presentaron concentraciones de 12,19 y 15,99 mg N/L, respectivamente, y para la campaña de septiembre 2010, en donde las norias 5 y 51 presentaron concentraciones de 11,5 y 27,7 mgN/L, respectivamente.

Cabe hacer notar que no existe un gran número de norias disponibles para muestreo en el sector San Pedro, ya que por la profundidad a la que se encuentra el nivel freático, éstas en su mayoría se encuentran secas o colgadas, pudiéndose muestrear, como máximo, un total de 5 a 6 norias por campaña. El nivel freático es suficientemente profundo como para limitar, la mayor parte del tiempo, la presencia de agua a un número reducido de norias.

Respecto al alto contenido de N-Nitrato en la noria 31, es posible señalar que existen tres líneas de evidencia que sugieren que el agua en las norias 31, 23, y 17 es la misma:

- Cercanía de la ubicación de las captaciones,
- Mediciones de N-Nitratos en las distintas norias no varían significativamente (entre 5 y 7 mgN/L, salvo la medición de febrero 2009),
- Marca química de Noria 31 es muy parecida entre los muestreos de abril 2009, abril 2010 y septiembre 2010, aunque el contenido relativo de bicarbonato es mayor en abril 2010.

De acuerdo a lo anterior, se presume que el agua obtenida de la noria 31 en febrero 2009 representa un punto del acuífero espacialmente y/o temporalmente muy específico. Esta noria, al estar ubicada en una pradera donde pastan y defecan ganado vacuno, es posible que los guanos allí existentes, interactúen con la escorrentía superficial producida por lluvia e ingresen verticalmente por la noria, la cual puede estar actuando como vía de comunicación preferencial entre la superficie y las aguas subterráneas del sistema somero. Lo anterior es corroborado por las siguientes mediciones en la noria, las que muestran menores concentraciones de N-Nitratos, con valores del orden a 5 mgN/L.

De esta manera, se observa que en el sector de San Pedro, la concentración de N-Nitratos medidos en norias (acuífero somero) es menor al límite de 10 mg N/L, salvo casos aislados en ciertas campañas y en puntos específicos.

**◆ Pozos**

En la cabecera de la cuenca se observa que el pozo 20 presenta sistemáticamente, en todas las campañas de monitoreo, concentraciones de N-Nitratos que sobrepasan el límite establecido en agua para consumo humano (10 mg N/L). Además, en esta zona, las mediciones efectuadas en los pozos 14 y 16 superan este límite, aunque la última medición en el pozo 14 muestra una gran disminución. Por otro lado, también en este sector, el contenido de N-Nitrato en la muestra 53 (mezcla entre aguas de pozos 15 y 16), son más bajos (<10 mg N/L), similares a las mediciones en el pozo 15. Esta diferencia de calidades en estos pozos puede ser explicada por diferencias en las zonas captantes de cada pozo (probablemente más superficial en los pozos con mayores concentraciones de nitratos), existiendo en la zona una graduación en la vertical en la calidad de las aguas, que también puede estar controlada por la geología

El agua de descarga 52 es una mezcla de agua de pozos 11, 22, y 56, ubicados aguas abajo de los pozos 20, 14 y 16, presenta concentraciones menores a 10 mg N/L, más similares a las concentraciones medidas en el pozo 15.

En el mayoría de las mediciones de N-Nitratos realizadas en el centro del sector del proyecto, las concentraciones medidas son bajas, menores que 5 mg N/L. Sólo las muestras obtenidas en el pozo 40 (14,35 mg N/L en febrero 2009) presentaron una concentración superior a 10 mgN/L. La misma situación se observa en el pozo 43, cuyas concentraciones han oscilado entre 7,65 y 26,68 mg N/L. Este pozo está localizado en la parte Sur del área del proyecto. Sin embargo, las aguas subterráneas localizadas aguas abajo del pozo 43 presentan concentraciones de N-Nitratos menores que 5 mgN/L.

En el sector poniente del área del proyecto, las mediciones de N-Nitratos que muestran concentraciones superiores a 10 mg N/L, han sido obtenidas en los pozos 46 y 47 durante la campaña de febrero 2009 y mayo 2011 y del pozo 49 durante la campaña de abril 2010. Aguas arriba de estos pozos, en la dirección de flujo del agua subterránea, se observan concentraciones de N-Nitratos menores a 5 mgN/L en los pozos 27 y 59.

Respecto a lo anterior, se observa que en el sistema profundo se detectan concentraciones de N-Nitratos superiores a 10 mg N/L en focos específicos de la cuenca, por lo que no se puede hablar de una pluma<sup>1</sup> regional de nitratos.

---

<sup>1</sup> Flujo identificable, con una composición diferente a la de su ambiente.



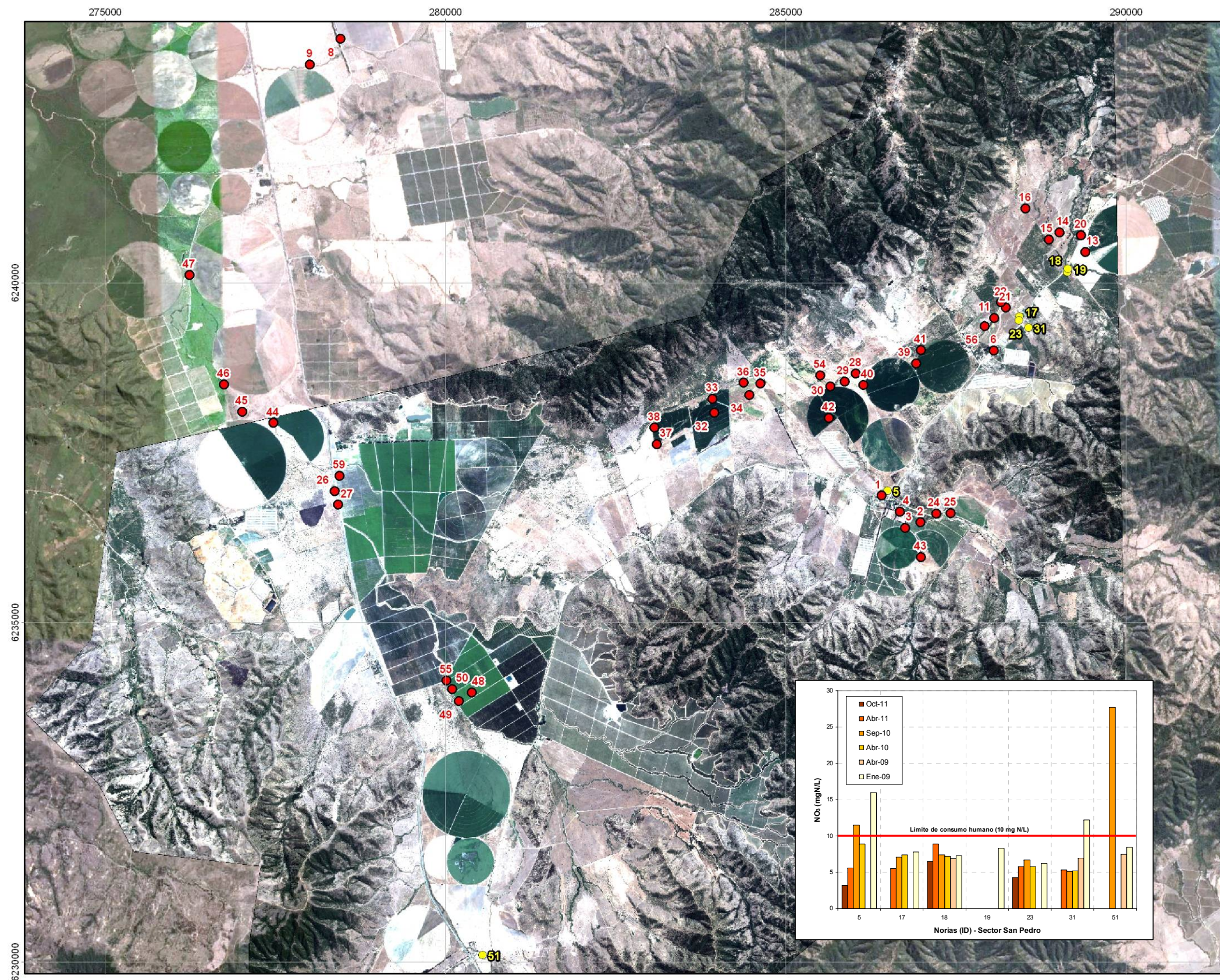


Figura N°9.3: Concentraciones de N-Nitratos medidos entre los años 2009 y 2011 en las **norias** (identificados con círculo amarillo) del sector San Pedro.



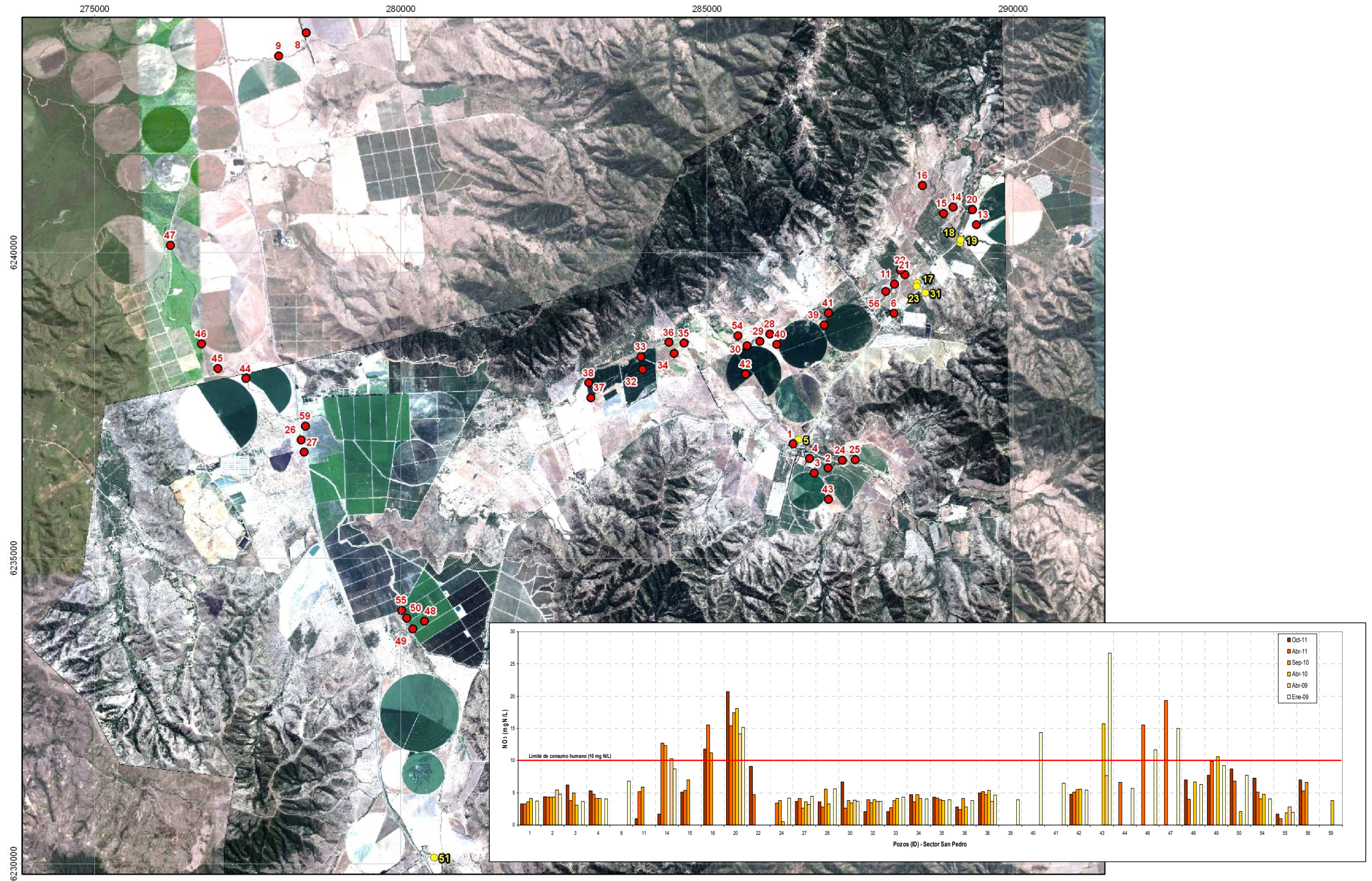


Figura N°9.4: Concentraciones de N-Nitratos medidos entre los años 2009 y 2011 en pozos (identificados con círculo rojo) del sector San Pedro.



### 9.1.2 Isótopos

Los datos de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  en nitratos colectados en la campañas del 2009 y 2010 muestran un amplio rango de valores, el que varía entre 5,4 y 15,2 ‰ (**Figuras N°9.5 y N°9.6**). La mayor parte de los datos están representados por nitratos que se caracterizan por valores de  $\delta^{15}\text{N}$  menores a 10 ‰, con concentraciones de N-Nitratos menores que 8 mgN/L (**Tablas N°8.4 y 8.5**). Los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  sobre 10 ‰ se observan en las aguas que se caracterizan por concentraciones de N-Nitrato cercano a/o mayores que 10 mgN/L (**Tablas N°8.4 y 8.5**).

Los datos de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  muestra un rango de valores entre +2,9 a +8,5 ‰, con valores en su mayoría comprendidos entre +4 y +6 ‰. Los valores más enriquecidos en  $^{18}\text{O}$  se encuentran en los nitratos que también se caracterizan por presentar valores más enriquecidos en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ , y niveles más elevados en su concentración de N-Nitratos (Noria 19 y 5, **Tablas N°8.4 y 8.5**).

Tomando los resultados de nitrificación en estudios de laboratorio (Kumar et. al (1983), Andersson y Hooper (1983) y Hollocher (1984)), los cuales muestran que el oxígeno del nitrato proviene 2/3 de la molécula de agua y 1/3 del oxígeno disuelto (con una composición similar a la del oxígeno atmosférico), se pueden estimar los valores de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  que debería tener el nitrato que se forma por nitrificación en el sector de San Pedro. Tomando los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  del agua, los cuales varían entre -5,9 y -7,2 ‰ y asumiendo un valor de  $\delta^{18}\text{O}$  de +23,2 ‰ para el oxígeno atmosférico, se estima que el nitrato debería presentar valores comprendidos entre +2,9 a +3,8 ‰.

En general, los valores de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  en San Pedro son un poco más enriquecidos que los valores previamente estimados, encontrándose en un rango entre +4 y +6 ‰. Este comportamiento se ha visto en otros estudios, los cuales indican que el oxígeno en los nitratos tendría un mayor aporte del oxígeno disuelto, en combinación con un enriquecimiento en el contenido de  $^{18}\text{O}$  en el oxígeno debido al proceso de consumo de oxígeno en la zona no saturada y enriquecimiento isotópico del agua que participa en la nitrificación (Wassenaar et al., 1995). Esto último se puede dar en aguas de riego que permanecen en la zona no saturada por algún tiempo. El otro factor que podría enriquecer el nitrato en  $^{18}\text{O}$  sería un aporte de fertilizantes como  $\text{KNO}_3$  o  $\text{NH}_4\text{-NO}_3$  en que el nitrato de estos fertilizantes se caracteriza por valores  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  entre 40 y 60 ‰ en el caso del nitrato chileno y alrededor de +25 a 30 ‰ en el caso de fertilizantes inorgánicos industriales (Aravena y Mayer, 2009). El aporte directo de fertilizantes al agua subterránea se ha observado en zonas kársticas en que el fertilizante en periodos de lluvia puede entrar directamente al acuífero sin participar en el ciclo del nitrógeno en el suelo (Wells and Krothe 1989).

En general, por los datos de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ , se puede concluir que el nitrato es formado por nitrificación de amonio y no hay una influencia directa de fertilizantes inorgánicos tipo nitrato de sodio, los que se caracterizan por valores muy enriquecidos en  $^{18}\text{O}$ , en el rango de +25 a +30 ‰. El amonio puede provenir de fertilizantes como urea, de purines, de guano y de aguas servidas.

En relación a la variación espacial de los datos isotópicos en nitratos, los valores de nitratos más enriquecidos en  $^{15}\text{N}$ , con valores que varían entre +13,6 y +15,2 ‰, se encuentran en la cabecera de la Cuenca (pozos 14, 20 y noria 19, **Figura N°9.5 y 9.6**). Las aguas que muestran una

tendencia a valores más enriquecidos en  $^{15}\text{N}$  tienden a su vez a presentar un aumento en la concentración de nitratos, lo cual se observa en las dos campañas. Este comportamiento no puede ser explicado por el proceso de desnitrificación, ya que la concentración de nitratos debería disminuir en vez de incrementarse. La relación  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  versus  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  también muestra que el proceso de desnitrificación no juega ningún rol en la atenuación de nitratos. Los valores más enriquecidos con concentraciones altas de nitratos pueden ser explicados por el aporte de una fuente enriquecida en  $^{15}\text{N}$  y en nitratos. Entre las fuentes posibles, se encuentran residuos domésticos y de animales ( $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ , 7 a 20 ‰) y los purines a la salida a riego ( $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ , 11 a 23‰).

Los pozos 14 y 20 claramente quedan en el rango de valores enriquecidos en  $^{15}\text{N}$  (13,6 a 14,5 ‰) y con concentraciones de N-Nitratos consistentemente cercanos o superiores al límite de consumo humano (10 mgN/L). Estos pozos se encuentran en la cabecera de la cuenca, cercanos a un área de aplicación de purines y lejos de otras fuentes potenciales de nitrógeno como residuos domésticos (**Figura N°9.7**). El nitrato de la noria 19, que también se encuentra en la cabecera, es caracterizado por una concentración de N-Nitrato de 8,3 mgN/L y un valor de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  de 15,2 ‰, dentro del rango isotópico de los N-Nitratos de los pozos 14 y 20. Además, se destaca que la zona de aplicación de purines corresponde a una zona de sedimentos coluviales, en donde la tasa de infiltración debería ser relativamente más rápida comparada con la tasa de infiltración a través de la capa de arcilla que protege el resto del acuífero en la cuenca. Es importante destacar que en la zona de cabecera también hay aguas (pozo 52) que se caracterizan por concentraciones de N-Nitratos del orden de 5 mgN/L y valores de 9,0 ‰ en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ . La muestra 52 representa una mezcla de agua que son bombeadas de los pozos 5, 6 y 7 en el fundo Sta. Beatriz. Este comportamiento tiene que estar asociado a la complejidad geológica del acuífero y a la ubicación de las rejillas de los pozos. Estos nitratos también pueden estar asociados a actividad agrícola histórica con anterioridad de la actividad porcina en la zona.

Siguiendo el sistema de flujo de las aguas subterráneas, aguas abajo de la cabecera de la cuenca, se encuentran los pozos 56, 11, y 22, en que las concentraciones de N-Nitratos varían en torno a 5 mg N/L. No existen datos isotópicos disponibles para esta agua, pero basado en la diferencia en las concentraciones de estos pozos con la concentración de N-Nitrato de los pozos 14 y 20, se puede decir que las altas concentraciones de nitrato en el acuífero asociado a la actividad de riego por purines, en la cabecera de la cuenca, están acotadas cerca del área de los pozos mencionados y no tienen un efecto a escala más regional.

La zona central de la cuenca, representada por los pozos 30, 54 y 28, se caracteriza por valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  alrededor de 7,7 ‰, asociadas a concentraciones de N-Nitratos entre 4 y 5,6 mgN/L. Estos pozos están localizados contiguos a zonas de riego con aplicación purines (**Figura N°9.7**), y cuyos valores isotópicos y de concentración de nitrato no evidencian de un aporte de nitratos de purines al acuífero confinado (existente en la parte central de la cuenca).

Siguiendo el sistema de flujo del agua subterránea, hay una serie de pozos localizados aguas abajo de los pozos 30, 54 y 28, que se caracterizan por valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  entre 5,6 y 8,7 ‰ y bajas concentraciones de N-Nitratos (entre 3,7 y 4,8 mgN/L). Estos pozos están localizados en zonas agrícolas con uso de fertilizante inorgánicos (**Figura N°9.7**); luego, los valores isotópicos obtenidos en esta zona representarían los nitratos asociados al uso de fertilizantes inorgánicos



como la urea, que por el proceso de volatilización en la zona de riego enriquece su contenido de  $^{15}\text{N}$  en comparación al urea original. Este comportamiento fue observado en aguas subterráneas con alto contenido de nitratos en Cataluña, donde la principal fuente de nitratos eran fertilizantes inorgánicos como la urea (Vitoria et al., 2009).

En la noria 5, localizada en la parte SurEste de la cuenca (**Figura N°9.7**), presenta concentraciones altas de N-Nitratos, en un rango entre 8,9 a 15,9 mgN/L, y valores enriquecidos en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ , entre 12,8 y 14,5 ‰. Algunas líneas de evidencia indican que la fuente de nitrógeno en esta noria estaría asociada a residuos domésticos. Primero, la noria está ubicada en la pequeña estancia Santa Rosa, al lado de un almacén y un colegio. Segundo, estas aguas tienen relativamente altas concentraciones de sulfatos y cloruros. Además, se ve que las zonas de aplicación de purines y/o fertilizantes inorgánicos se localizan relativamente lejos de la noria y es muy poco probable que el nitrato haya viajado lateralmente por la capa de arcilla.

Otra área que muestra un valor relativamente enriquecido de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  es la representada por el pozo 43 ( $\delta^{15}\text{N-NO}_3 = 10.8$  ‰), ubicado al sur del área de estudio, en una subcuenca cuyos flujos de agua subterránea se encuentran aportando hacia el valle central (**Figura N°9.7**). El agua captada por este pozo también se caracteriza por altas concentraciones de N-Nitratos que fluctúan entre 7,7 y 26 mgN/L (**Figuras N°9.5 y N°9.6**). No es posible que los purines sean la fuente de nitrato para este pozo, pues no hay aplicaciones de ellos actualmente y no han sido aplicados históricamente en esta zona. Luego, el enriquecimiento en los valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  puede estar asociado a una volatilización de urea entre su aplicación y su infiltración en el suelo o a una fuente que no ha sido identificada. Los valores fluctuantes de N-Nitratos y la presencia de Tritio en esta agua sugieren la existencia de una comunicación entre la parte somera del área de cultivo (que se debería caracterizar por concentraciones altas de nitrato) y el acuífero a través del pozo, debido a una mala construcción del mismo.

Similarmente a lo observado en los pozos ubicados aguas abajo de la zona de aplicación de purines en la zona de la cabecera, los pozos 3, 2, 1 y 4, ubicados aguas abajo del pozo 43, se caracterizan por valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  en un rango de 5,8 y 8,2 ‰ y concentraciones bajas de N-Nitratos entre 3,1 y 4,3 mgN/L. Estos pozos se ubican en una zona en que se utiliza fertilizante inorgánico (**Figura N°9.7**). Luego, en esta zona hay aparentemente un área puntual, caracterizada por una concentración alta de nitratos (pozo 43), situación muy distinta a un nivel más regional, en que el agua se caracteriza por concentraciones de nitratos menores que 5 mgN/L.

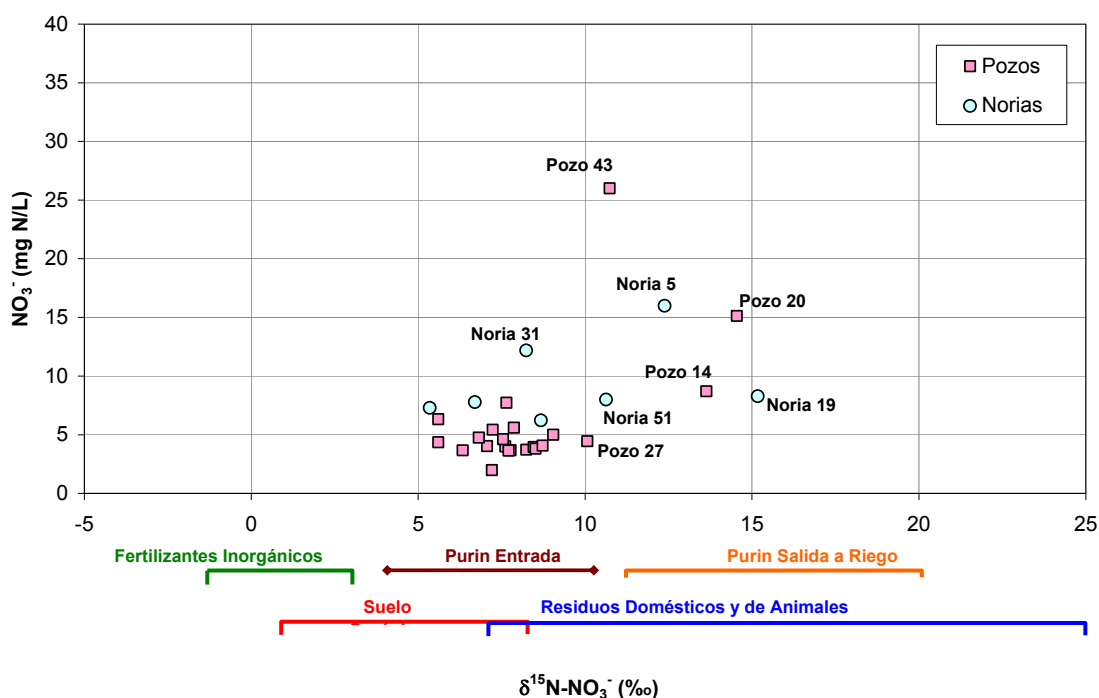
Con respecto a los datos obtenidos en el sector sur-poniente, hay una noria (51, Luis Sanchez) que se caracteriza por una concentración relativamente alta de nitrato (8 mgN/L) y una composición isotópica de 10,6 ‰ (**Figura N°9.5**). Aunque la marca isotópica del nitrato en esta noria presenta un valor relativamente enriquecido de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ , es poco probable que la fuente de nitrógeno sean purines, considerando que la noria está ubicada en una pequeña estancia en la zona. Basado en lo anterior, es más probable que la fuente de la concentración relativamente alta de nitrato en el agua de noria corresponda a residuos domésticos.

Aguas abajo de la noria 51, siguiendo el sentido de flujo, se encuentran varios pozos (48, 49, 50 y 55 - Sta. Raquel), los que se caracterizan por concentraciones de N-Nitratos entre 1,9 a 10

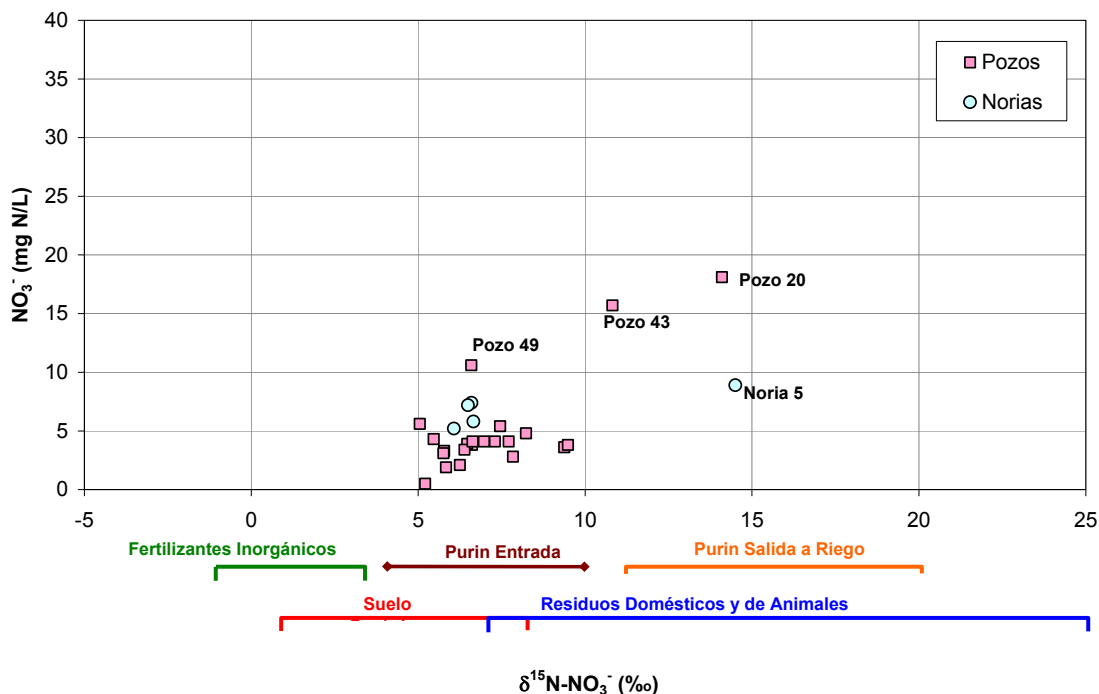
mgN/L, con un rango de valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  entre 5,9 y 7,6 ‰. En este sector no hay aplicación de purines y la fuente principal de nitratos tendría que ser fertilizantes inorgánicos que se usan preferentemente en esta zona (**Figura N°9.7**).

Luego, en la zona de intersección de este sistema de flujo (proveniente del sector sur) y el sistema de flujo del Noreste, se encuentran los pozos 26, 27 y 59. Los pozos 27 y 59 se caracterizan por presentar bajas concentraciones de N-Nitratos (3,8-4,4 mgN/L) y un valor de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  entre 9,4 a 10,0 ‰. En esta zona la fuente principal de nitratos serían la aplicación de fertilizantes inorgánicos (**Figura N°9.7**) más un aporte de nitratos relacionados al sistema de flujo de agua subterráneo localizado aguas arriba de estos pozos.

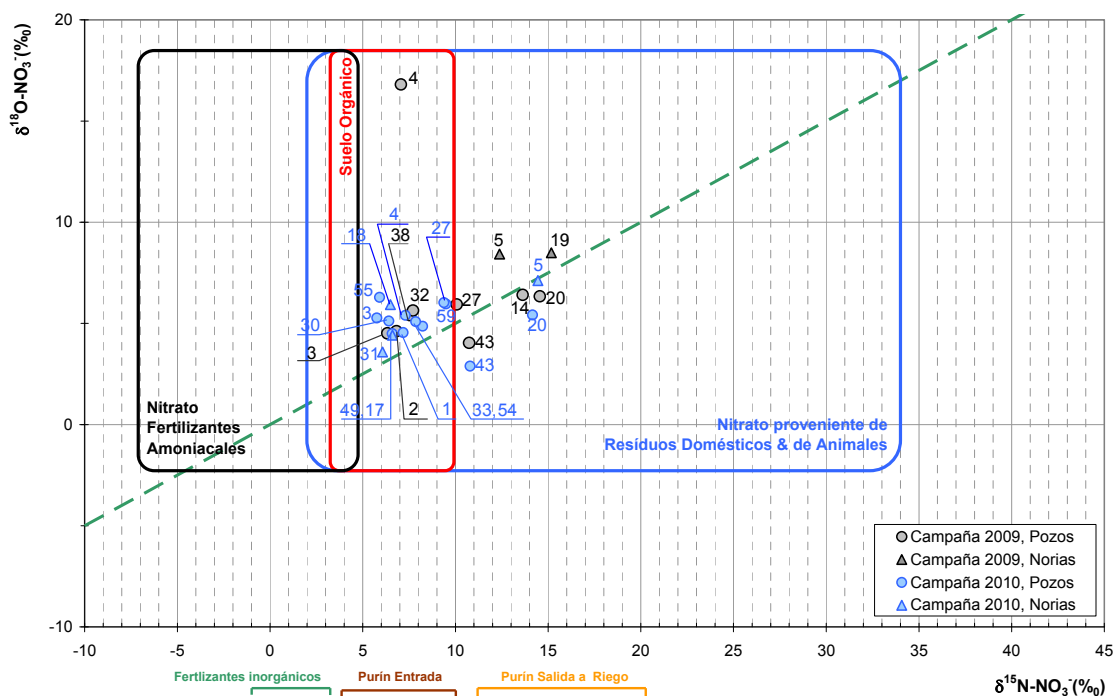
En la parte terminal del sistema de flujo se encuentran los pozos 46 y 47, los que se caracterizan por concentraciones altas de nitratos, sin tener la posibilidad de sacar una muestra para análisis isotópicos, básicamente por problemas de acceso durante las campañas 2009 y 2010. A estos pozos, en las campañas posteriores realizadas, se obtuvo muestras para análisis químico. Estos pozos están en una zona de riego por purines (**Figura N°9.7**), por lo que las altas concentración de nitratos en estos pozos, en comparación con el contenido de nitrato en aguas subterráneas localizadas aguas arriba de esta zona, estarían indicando que la fuente de estos nitratos sería el uso de purines.



**Figura N°9.5 (a):**  $\text{NO}_3^-$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  de  $\text{NO}_3$  en muestras obtenidas de pozos y norias en el año 2009, sector San Pedro. A modo de referencia, se presentan el rango de  $\delta^{15}\text{N}$  de  $\text{NH}_4^+$  obtenidos en las muestras de purines (entrada y salida de laguna de estabilización),  $\delta^{15}\text{N}$  de fertilizantes inorgánicos, y rangos de marcas isotópicas esperadas para diferentes fuentes (suelo orgánico, residuos domésticos y de animales) posibles de Nitratos (Aravena y Clark., 2005; Silva et al., 2002; Clark y Fritz, 1997).



**Figura N°9.5 (b):**  $\text{NO}_3^-$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  de  $\text{NO}_3^-$  en muestras obtenidas de pozos y norias en el año 2010, sector San Pedro. A modo de referencia, se presentan el rango de  $\delta^{15}\text{N}$  de  $\text{NH}_4^+$  obtenidos en las muestras de purines (entrada y salida de laguna de estabilización),  $\delta^{15}\text{N}$  de fertilizantes inorgánicos, y rangos de marcas isotópicas esperadas para diferentes fuentes (suelo orgánico, residuos domésticos y de animales) posibles de Nitratos (Aravena y Clark, 2005; Silva et al., 2002; Clark y Fritz, 1997).



**Figura N°9.6:**  $\delta^{15}\text{N}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de  $\text{NO}_3^-$  en muestras obtenidas de pozos y norias en años 2009 y 2010. A modo de referencia, se presentan el rango de  $\delta^{15}\text{N}$  de  $\text{NH}_4^+$  obtenidos en las muestras de purines (entrada y salida de laguna), la marca de fertilizantes amoniacales, y rangos de marcas isotópicas para diferentes fuentes de Nitratos (fertilizantes, suelo orgánico, residuos domésticos y de animales) (Aravena y Clark., 2005; Silva et al., 2002; Clark y Fritz, 1997).

### **9.1.3 Fuentes de Nitrógeno y Zonas de Impactos Potenciales**

En esta sección se discuten las potenciales fuentes de nitrógeno en el sector San Pedro y su influencia en la calidad de las aguas subterráneas. La **Figura N°9.7** presenta los pozos y norias, junto con las áreas de aplicación de purines/fertilizantes en el área de estudio. Al respecto, se observa lo siguiente:

- Los cultivos P12 – P14 se riegan con aguas obtenidas desde el embalse de riego (Riego Planteles 6 y 7), el cual corresponde a una mezcla de purines (Planteles 6 y 7) y aguas subterráneas (Pozo 30). La concentración de N-Nitrato en esta agua es 28 mg N/L. La superficie de aplicación es de 166,5 ha.

Considerando el sistema de flujo en la cuenca, la zona de influencia potencial de esta aplicación abarca los pozos de Fundo 13 (pozos 14, 15, 16, pozos 11, 13, 20, 22, y 56), noria 19, noria 18, noria 31, noria 23, noria 17, y pozo 6. De éstos, los pozos con relativamente altas concentraciones de N-Nitratos (algunas de sus mediciones mayores a 10 mgN/L) son: pozo 14 ( $9,1 \pm 4,5$  mg N/L); pozo 16 ( $12,8 \pm 2,3$  mg N/L); pozo 20 ( $16,8 \pm 2,4$  mg N/L).

Respecto de estos pozos, el diagrama Piper muestra que la composición química de las aguas de riego de los Planteles 6 y 7 y del Pozo 14 son bastantes similares. Esto es debido a que las aguas de riego de los Planteles 6 y 7 corresponden a una mezcla entre aguas subterráneas con purines (Planteles 6 y 7), predominando en la mezcla las aguas subterráneas. Asimismo, los pozos 14 y 20 cuentan con análisis isotópicos, presentando valores enriquecidos de  $\delta^{15}\text{N}$ , siendo la aplicación de purines la práctica que explicaría su condición.

Por otro lado, si bien la concentración de N-Nitratos en el pozo 16 es alta, la posibilidad de contaminación desde los cultivos con aplicación de purines es baja, pues el sistema de flujo dirige las aguas de recarga al otro lado del cerro que se extiende entre las canchas N1 y N3. Luego, es posible considerar que la concentración de N-Nitratos observada esté asociada a otra fuente de nitratos no caracterizada.

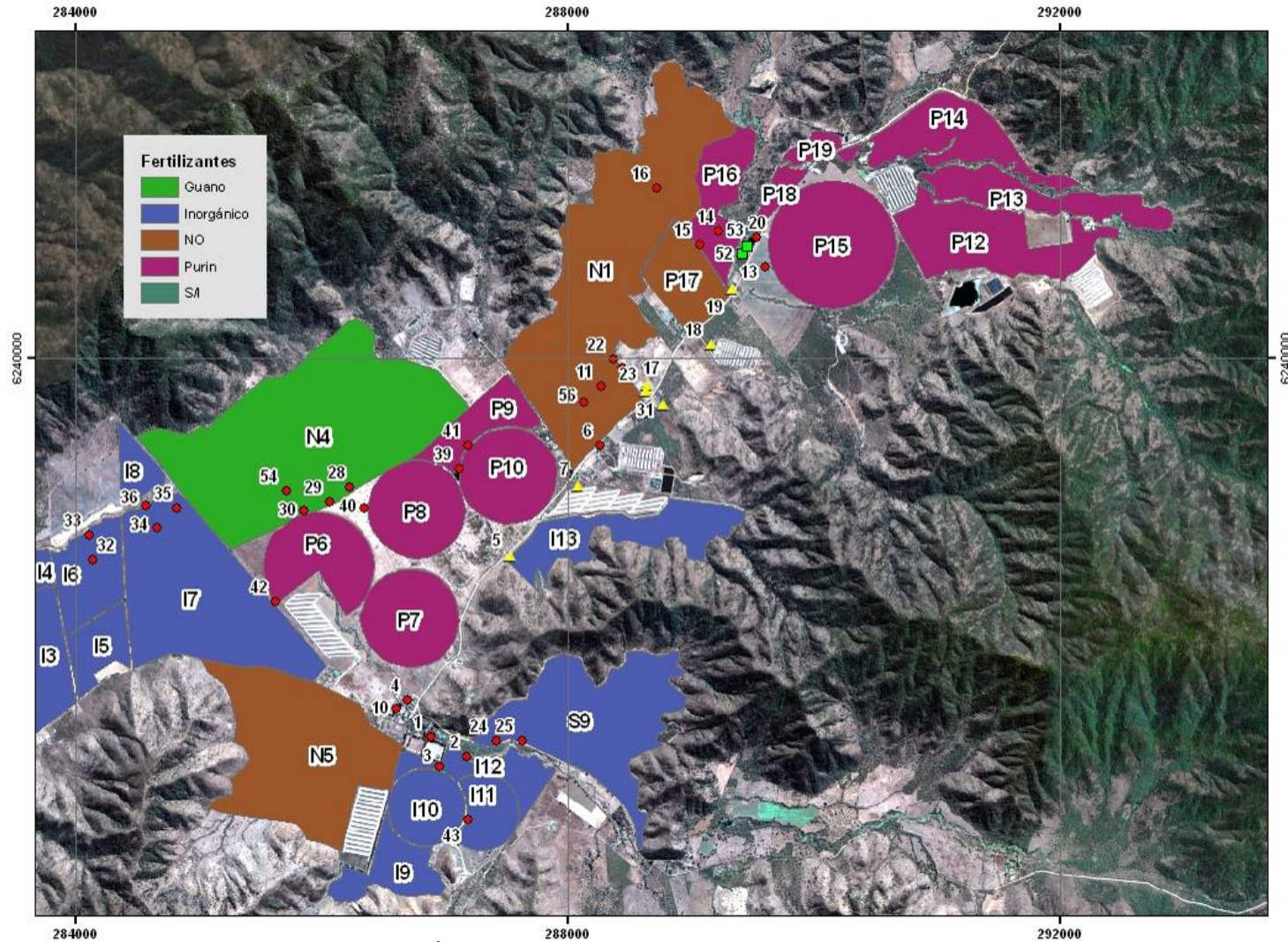
- Otra fuente potencial de nitrógeno más en el valle corresponde a la zona de aplicación de purines para los cultivos P6 – P11. La concentración de amonio ( $\text{NH}_4^+$ ) en los purines del Plantel 7 es de 471 mg/L, pero esta agua se encuentra diluida por las aguas subterráneas en un tranque. La zona de influencia potencial de aplicación en esta zona corresponde a: noria 7, noria 5, Pozos 39-41, pozos 28-30 y pozo 54. Las aguas con concentraciones más altas de N-Nitratos (algunas de sus mediciones mayores a 10 mgN/L) son: noria 5 ( $9,0 \pm 5$  mg N/L) y en el Pozo 40 (14,4 mg N/L, una sola medición) ubicados contiguos a terrenos de aplicación de purines. Llama la atención que haya concentraciones relativamente altas en el pozo 40, cuando las concentraciones en los otros pozos cercanos son relativamente bajas. Esto podría significar que hay partes específicas del acuífero, con altas concentraciones de nitratos que son captadas por las cribas del pozo 40 pero no por los otros pozos cercanos. La otra posibilidad es una contaminación local en el pozo mismo, por un defecto en la construcción del pozo, proveniente desde los



pastizales para bovinos próximos a dicho pozo u otra fuente no identificada. Los perfiles geológicos de los Pozos 30 y 54, muestran que existen delgadas unidades acuíferas de mayor permeabilidad en esta sección de la cuenca.

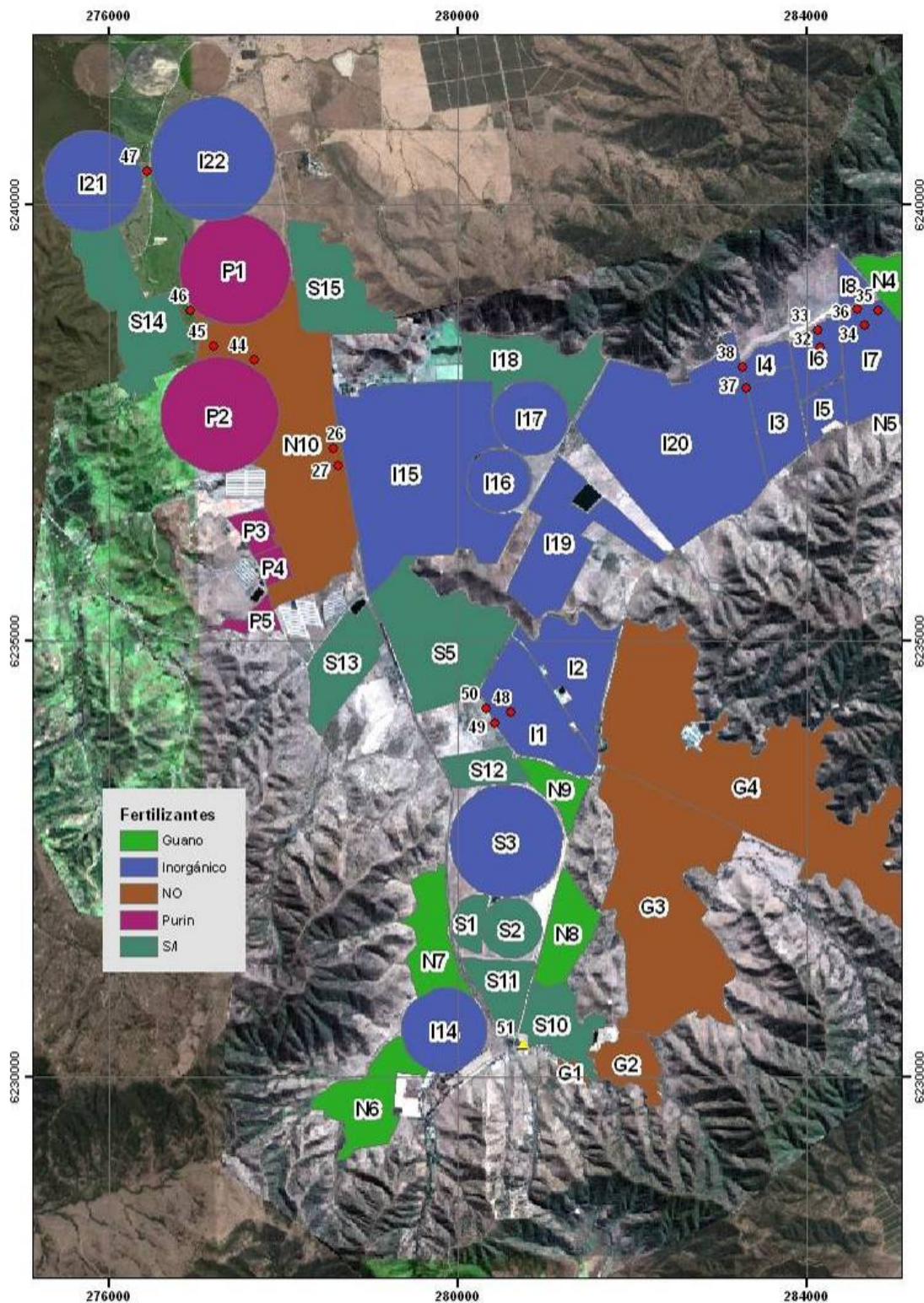
Respecto a la Noria 5, tal como se ha señalado en acápite anteriores, los altos niveles de N-Nitratos se explicarían por un origen doméstico.

- Los pozos 32, 33, 34, 35, 36, 37 y 38, los cuales por su ubicación podrían estar siendo afectados por la aplicación de purines en los cultivos P6 – P11; sin embargo, sus concentraciones de N-Nitratos son bajas y la aplicación de fertilizantes inorgánicos en estos fundos es una fuente más probable. Los datos isotópicos indicarían que estos nitratos son de origen de fertilizantes inorgánicos.
- En los cultivos I9 – I11 se aplican fertilizantes inorgánicos. Las concentraciones de N-Nitratos en los pozos en esta zona (pozo 2-4, pozo 24, y pozo 1) son relativamente bajas, con la excepción del pozo 43 ( $16,7 \pm 9,6$  mg N/L, resultados preliminares). Este pozo presenta una gran variabilidad en las mediciones de N-Nitratos, lo cual puede significar que responde a una contaminación local que llega al acuífero por una construcción deficiente del pozo (avalado por mediciones de Tritio). En esta zona se aplican fertilizantes sintéticos, sin aplicación de purines (actual o histórica). Los datos isotópicos también muestran que el nitrato es de origen de fertilizantes inorgánicos.
- En la zona de influencia potencial de la aplicación de purines de Loica (cultivos P1 – P5), se ubican los pozos 44-47. De éstos, los pozos 47 ( $17,1 \pm 3,1$  mg N/L) y el pozo 46 ( $13,6 \pm 2,7$  mgN/L) tienen relativamente altas concentraciones de N-Nitratos. Desafortunadamente no se pudo obtener muestras de agua para análisis químicos e isotópicos de estos pozos; sin embargo, por su ubicación, son los purines la fuente más evidente de nitratos en estos pozos.
- Si bien no se tiene claridad de las actividades agrícolas en el fundo de cultivos S5 – S8, es muy posible que en ellos se apliquen fertilizantes inorgánicos, dado que es una práctica muy común en el cultivo de frutas en este sector. La aplicación de fertilizantes también podría ser una fuente de nitrato en la zona de influencia potencial de aplicación de purines de los plantales localizados a la salida de la cuenca (1 y 2), como se explicó en puntos anteriores.



**Figura N°9.7(a):** Distribución de Pozos y Norias en el Área Oriente del Sector del Proyecto, e Identificación de Tipo de Fertilizantes utilizados en sector San Pedro (P: Purín; I: Fertilizante Inorgánico; N: Ninguna aplicación; S: Sin Información). Los números sólo indican un orden correlativo).





**Figura N°9.7(b):** Distribución de Pozos y Norias en el Área Poniente del Sector del proyecto, e Identificación de Tipo de Fertilizantes utilizados en sector San Pedro (P: Purín; I: Fertilizante Inorgánico; N: Ninguna aplicación; S: Sin Información. Los números sólo indican un orden correlativo).

#### **9.1.4 Estudio Complementario en Perfiles de Suelo**

Las mediciones realizadas en el período del proyecto (campañas de medición en: abril 2009, abril 2010, octubre 2010, abril 2011 y septiembre 2011) en las aguas subterráneas el sector San Pedro, las cuales comprenden períodos secos (previos al inicio de las lluvias) y períodos húmedos (posterior a las lluvias), muestran que las concentraciones de N-Nitratos en norias (acuífero somero) y pozos (acuífero profundo) no presentan variaciones temporales importantes en su concentración. También se observa que las concentraciones están bajo el nivel permisible para consumo humano (<10 mg N/L), con algunas excepciones asociadas a situaciones localizadas, en focos específicos de la cuenca. Por lo anterior, no se puede hablar de una pluma regional de nitratos.

Sin embargo, en la superficie del sector existen fuentes importantes de Nitrógeno, tales como la agricultura con aplicación de fertilizantes y planteles de cerdos con aplicación de purines al suelo.

Para mejorar el entendimiento del porqué esas cargas de nitrógeno en la superficie no se expresan en la calidad de las aguas subterráneas, en el último año del proyecto se realizaron mediciones en perfiles verticales del suelo para evaluar pérdidas potenciales de formas nitrogenadas ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ). El estudio complementario de suelo fue desarrollado por la Universidad de Chile, e incluyó un monitoreo continuo en el periodo Abril a Octubre de 2011. El estudio completo se adjunta en **Anexo C**.

El sector seleccionado para efectuar las mediciones corresponde a suelos de textura gruesa (escenario conservador), cultivados con maíz y sometidos a aplicaciones de purín de cerdo en la temporada anterior.

Las tareas desarrolladas contemplaron los siguientes puntos:

- ◆ Evaluar continuamente los niveles de  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_4$  en los suelos hasta 1 m de profundidad.
- ◆ Determinar las tasas de mineralización neta de N.
- ◆ Establecer un balance hídrico en los suelos.
- ◆ Establecer un índice de riesgo de lixiviación de N- $\text{NO}_3$  y validarlo para las condiciones estudiadas.
- ◆ Evaluar los niveles de  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_4$  en los suelos al final del estudio, hasta 3 m de profundidad.

Se evaluó (ver **Tabla N°9.1**) una situación con aplicación de purines de cerdo -en la temporada anterior- en pradera (SCE1) y otra con cosecha de maíz (SCE2). Como punto de control se evaluó otro perfil (SSE) sin aplicación de enmienda (purines u otros mejoradores de suelo).

La información proporcionada por los propietarios indicó que cada unidad de muestreo elegida presenta un uso y manejo del suelo similar, particularmente en lo que se refiere a tipo de cultivos, dosis de fertilizantes y de purín de cerdo.



**Tabla N°9.1:** Descripción de las condiciones o tratamientos evaluados en sector San Pedro.

Tratamientos	Serie de suelos	Vegetación actual <sup>1</sup>	Aplicación enmienda	Última labor
SSE	Quilamuta	PMA	Ninguna	Ninguna
SCE1	Quilamuta	BTC	Purín de cerdo	Siembra pradera
SCE2	Quilamuta	Barbecho	Purín de cerdo	Cosecha

<sup>1</sup> BTC: pradera mezcla ballica-avena-cebada; PMA: pradera mediterránea anual.

Las conclusiones obtenidas en los Balances de Nitrógeno efectuados en esas Parcelas Experimentales, muestran que:

- Sólo en la superficie del suelo (20-30 cm), los análisis de N-NO<sub>3</sub> muestran que los niveles son mayores en el perfil cuyo suelo tuvo tratamiento con aplicación de purines (SCE1), respecto al perfil de control (SSE). A profundidades mayores (45-55 cm y 95-105 cm), los niveles medidos muestran valores similares entre SCE1 y SSE. En ambos tratamientos el balance de N entre 0-1 m mostró que la lixiviación de N fue similar entre SCE1 y SSE, donde la pradera artificial en SCE1 habría absorbido una cantidad importante de N durante el período de otoño-invierno, evitando las pérdidas potenciales por lixiviación.
- En todos los tratamientos evaluados se encontró que en el período en estudio los procesos de inmovilización de N dominaron en la superficie del suelo sobre la mineralización de N, donde los factores limitantes para la mineralización fueron las relaciones C/N iniciales altas y temperatura del suelo bajas (<10°C).
- El balance hídrico mostró valores negativos, con precipitaciones bajo los promedios anuales, sin generación de percolación profunda.
- El estudio de los niveles de N-NO<sub>3</sub> en estratos profundas (intervalo de profundidad de 0-3 m), realizado al final del estudio, mostró que existen zonas dentro del suelo donde hay cambios texturales abruptos que generan discontinuidades en el tamaño de poros que afectarían el movimiento de agua en profundidad (percolación profunda) y en consecuencia la lixiviación de N-NO<sub>3</sub> hacia las aguas subterráneas. Los cambios texturales restringirían la lixiviación, acumulándose el N-NO<sub>3</sub> sobre o dentro de las zonas de movimiento lento de agua.
- Considerando las condiciones climáticas de la zona, las características de los suelos analizados y la duración del estudio (Abril-Octubre), los resultados de este estudio sugieren que los nitratos se estarían acumulando dentro de los 3 primeros metros de profundidad y el riesgo de lixiviación hacia napas más profundas sería bajo. Sin embargo, es necesario realizar estudios de mayor detalle para evaluar los procesos de atenuación del nitrógeno en profundidad y poder evidenciar la variabilidad temporal de las formas nitrogenadas en los suelos y así poder llegar a conclusiones definitivas.
- Finalmente, se propone una metodología simple de valoración (1 a 4) de la dificultad en el movimiento que experimentará el nitrato cuando se incorpora al suelo. El valor menor indica que la dificultad es mínima (riesgo de percolación alto), en tanto que el mayor que la

dificultad es máxima al transporte (riesgo mínimo). Esta valoración se presenta en la **Tabla N°9.2**.

La condición inicial para aplicar esta Tabla contempla que debe cumplirse que los aporte de fluidos (PP + Riego) deben ser superiores a las pérdidas por evapotranspiración del cultivo (ETc). Además, puede ser ajustada cada cifra en una unidad si se aplican purines (-1) o existe un cultivo cuyas raíces absorben nitratos (+1).

Es importante destacar que, en este estudio, se realizó una calibración parcial de este índice de lixiviación de nitratos, que incluyó solamente experiencias en áreas con aplicación de purines y un solo tipo de suelo, realizándose experiencias en suelos de fracción gruesa (alta permeabilidad). Por lo tanto, este índice debe ser validado considerando otras aplicaciones de fertilizantes y en otros suelos que presenten rangos de conductividad hidráulica más bajos y otras distribuciones de capas (horizontes) para poder recomendar el uso de este índice como una herramienta efectiva para definir zonas de riesgo de lixiviación de nitratos.

**Tabla N°9.2:** Índice de lixiviación de nitratos (si PP +Riego > ETc).

Conductividad hidráulica → (m/día) Suelo/Subsuelo ↓	Muy alta (>8,64)	Alta (0,864- 8,64)	Moderadamente Alta (8,64·10 <sup>-2</sup> - 0,864)	Moderadamente Baja (8,64·10 <sup>-3</sup> - 8,64·10 <sup>-2</sup> )	Baja (8,64·10 <sup>-4</sup> - 8,64·10 <sup>-3</sup> )	Muy baja (<8,64·10 <sup>-4</sup> )
Homogéneo, capa única	1	1-2	2	2-3	2-3	3
Homogéneo, múltiples capas	1	1-2	2	2-3	2-3	3
Heterogéneo, capa única	2	2	3	3	3	4
Heterogéneo, múltiples capas	2	2	3	3	3	4
Roca fragmentada	3	3	3	3	4	4

Dificultad menor = 1  
 Dificultad mayor = 4

## 9.2 SECTOR PICHIDEGUA

### 9.2.1 Hidroquímica

#### a) Marca Química

En la **Figura N° 9.8** se presentan los diagramas Piper asociados a las 5 campañas de monitoreo donde se realizaron análisis químicos completos (al menos de macroelementos) de las muestras de agua. Las campañas se realizaron en las siguientes fechas: abril 2009, abril 2010, octubre 2010, mayo 2011 y octubre 2011, las cuales comprenden períodos secos (previos al inicio de las lluvias) y húmedos (posterior a las lluvias).

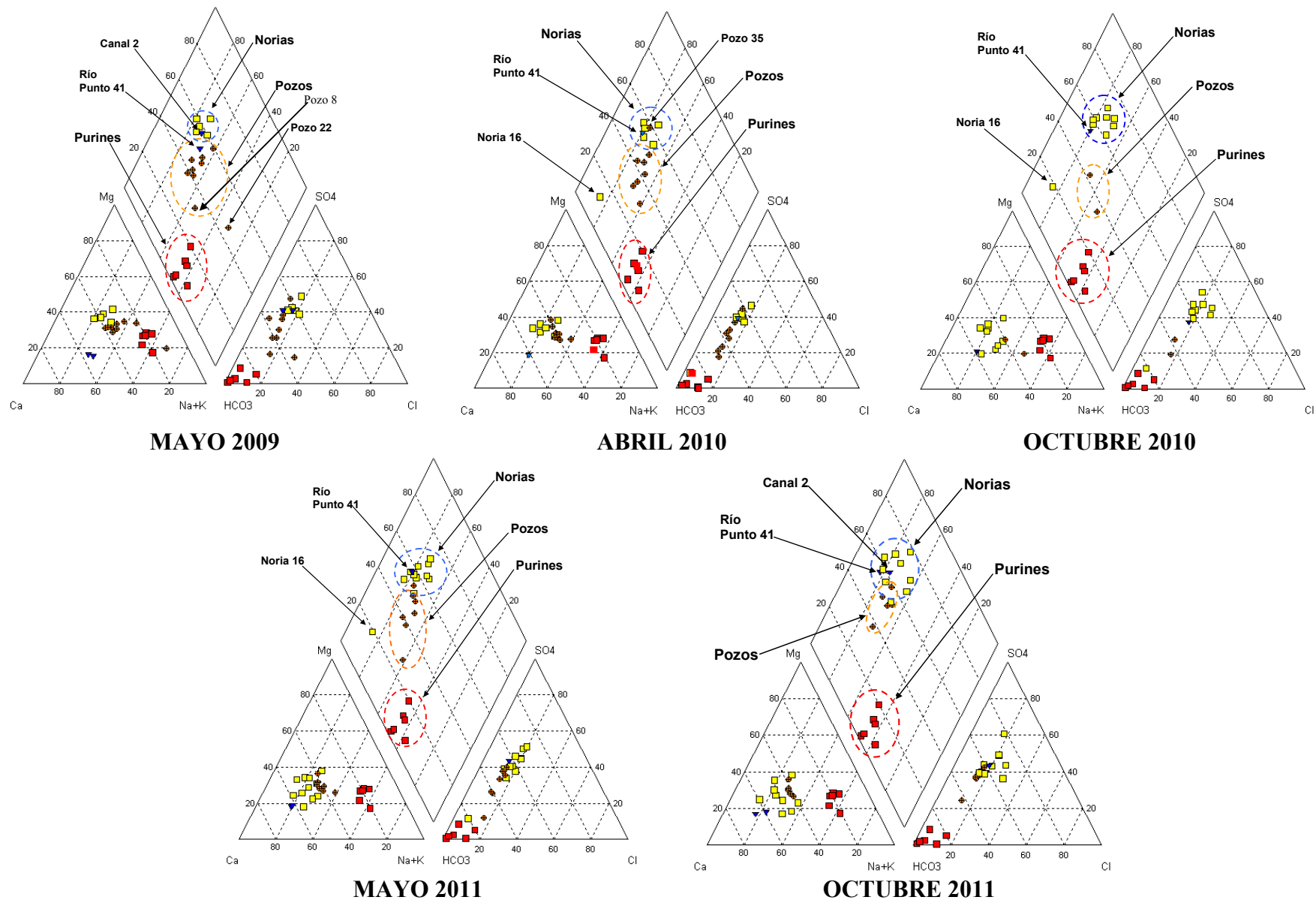
En los diagramas Piper se observa la distribución de los aniones (Cloruro, Bicarbonato y sulfato) y de los cationes (Calcio, Sodio + Potasio y Magnesio) de las muestras tomadas, definiendo una “marca química” de las diferentes aguas. Se hace presente que las muestras de purines incluidas en los diagramas corresponden a la campaña de monitoreo de abril 2009.

Es posible observar las marcas químicas de los purines, de las aguas subterráneas del sistema profundo (pozos) y del sistema somero (norias). Cabe destacar que no se observa una variación temporal importante entre las marcas químicas en pozos y norias, entre los años 2009 y 2011.

La marca química de los purines y de las aguas subterráneas (aguas naturales) son claramente diferentes. Los purines presentan un alto contenido de bicarbonato y de sodio + potasio. Por otro lado, en las aguas naturales de pozos y norias los sulfatos cobran mayor importancia relativa en los aniones, especialmente en norias, en tanto que, respecto de los cationes, se observa que ningún catión es preponderante por sobre los otros, aunque en algunas norias el Calcio toma una mayor importancia relativa. Se observa en algunos pozos (8 y 22) que tienden al tipo de aguas de los purines, pero este comportamiento se debe a que en estas aguas hay desnitrificación, proceso en que se genera bicarbonato y además los valores de sulfatos son bastante bajos (**Anexo E**), lo que sugiere que la reducción de sulfatos también podría estar ocurriendo en esta agua.

En las norias, el contenido relativo de sulfatos y de calcio son más altos comparados con los pozos. La excepción a esta observación se encuentra en la noria 16, que está ubicada en el piedemonte, aguas arriba de las actividades agrícolas del sector. La marca química de las aguas de esta noria está definida por el alto contenido de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y representa aguas de recarga local.

Las aguas de las norias son en general más salinas y químicamente diferente que las aguas de pozos. Esa diferencia puede surgir de los diferentes orígenes de las aguas de recarga: el acuífero somero (norias) es recargado por aguas de riego (Río Tinguiririca), que son del tipo  $\text{Ca-SO}_4$ , mientras que el acuífero profundo es recargado preferentemente por agua de precipitación. Además, con el tiempo los suelos en zonas agrícolas con actividad de riego tienden a salinizarse, por lo que el agua que escurre a través de ellos tiende a ser más salina en comparación con aguas que son recargadas en áreas no afectadas por agricultura.



**Figura N°9.8:** Diagrama Piper de muestras obtenidos en las diferentes campañas de monitoreo realizadas en el sector de Pichidegua (5 campañas).

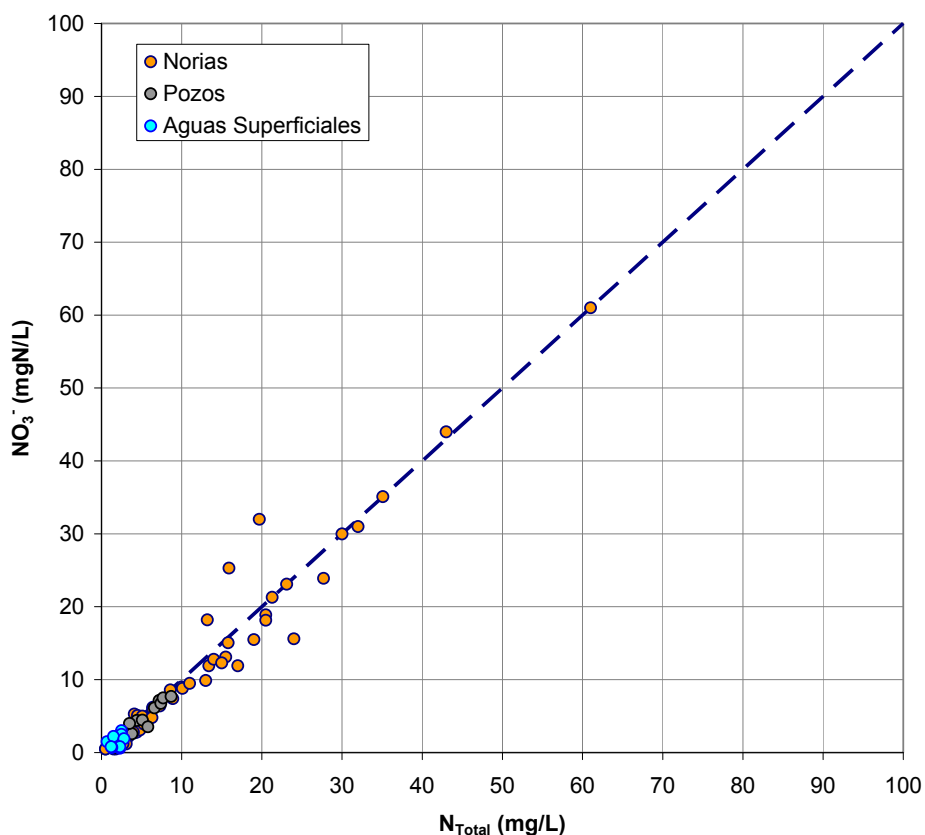


## b) Nitratos vs Otras Especies de Nitrógeno

La comparación entre las concentraciones de nitratos y nitrógeno total permite establecer si son los nitratos la especie dominante dentro de las especies de nitrógeno susceptibles de encontrar en las aguas subterráneas.

En las distintas campañas de monitoreo se efectuaron mediciones de N-Nitrato y Nitrógeno Total en norias, pozos y puntos de aguas superficiales. En **Figura N°9.9** se presentan las mediciones. Se observa que el N-Nitrato es la especie de nitrógeno dominante, lo cual se deduce al observar los datos alineados en torno a la recta identidad ( $N-NO_3^- = N_{Total}$ ).

No obstante lo anterior, se observan algunas desviaciones y que corresponden a dispersión de datos en torno a la recta identidad. Se prevé que esa dispersión puede estar originada en problemas analíticos (de laboratorio), los cuales son particularmente evidentes en los casos en que  $[N-NO_3^-] > [N_{Total}]$ , y en casos en que además de nitratos se presentarían otras especies de nitrógeno en solución ( $[N-NO_3^-] \neq [N_{total}]$ ). Igualmente se destaca que esta figura es representativa y muestra que los nitratos son la especie preponderante de nitrógeno en las aguas muestreadas.



**Figura N°9.9:** Relación  $N-NO_3^-$  vs  $N_{Total}$  obtenida de las mediciones realizadas en las diferentes campañas de monitoreo en el sector de Pichidegua.

### c) Variación Temporal y Espacial de Nitratos en Sector Pichidegua

Las concentraciones de N-Nitratos medidos entre los años 2009 y 2011 en las norias y pozos del sector, son presentadas espacialmente en las **Figuras N°s 9.10** (norias) y **9.11** (pozos). En general, se observa que las variaciones temporales de las concentraciones de N-Nitratos no son importantes en pozos; mientras que en las norias presentan variaciones más apreciables.

#### ♦ Norias

Las concentraciones de N-Nitratos en el sector Este y Sur de Pichidegua son menores que 5 mgN/L, con la excepción de dos norias. La concentración de N-Nitrato en las norias 1 y 18 son consistentemente mayores que 10 mg N/L

En el sector centro y norte de Pichidegua se observa una elevada concentración de N-Nitratos, principalmente en tres norias. La noria 23 presenta concentraciones de N-Nitratos entre 1 y 44 mgN/L, la noria 24 presenta concentraciones entre 9 y 43 mgN/, en tanto que la noria 25 muestra concentraciones de N-Nitratos entre 10 y 15 mg N/L. Destacan los datos en la noria 23, los cuales muestran una gran variación temporal en las concentraciones de N-Nitratos.

Cabe señalar que se espera una mayor variabilidad en la concentración de N-Nitratos en el sistema somero, representado por las norias, por cuanto respondería con mayor rapidez a las actividades en superficie (el nivel de las aguas subterráneas someras se encuentra en general a pocos metros de profundidad en la mayoría de las norias controladas) y el acuífero somero es recargado por agua de riego que tiene un régimen estacional.

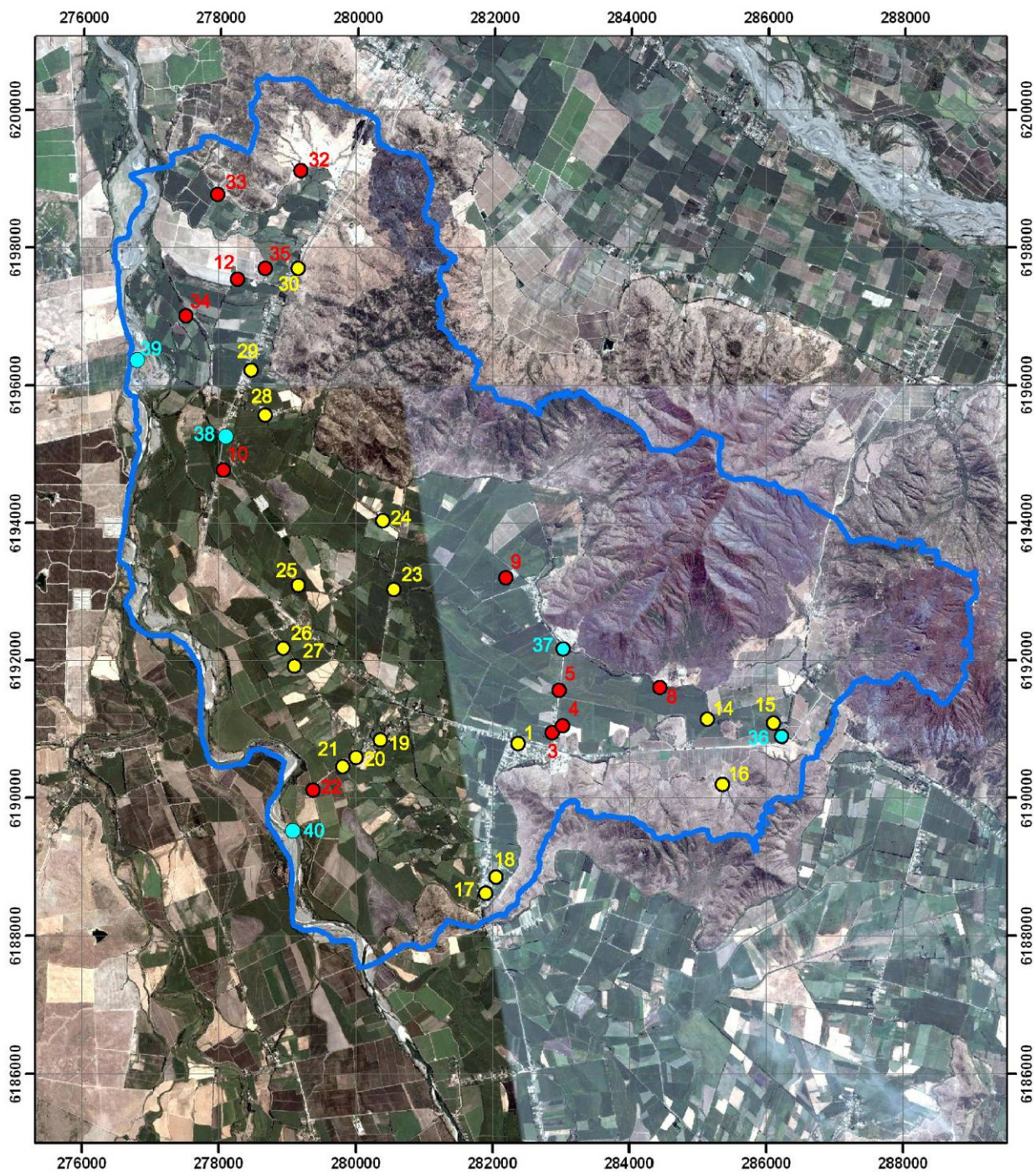
Finalmente, se destaca que las norias con mayor variabilidad en las concentraciones de nitratos, al encontrarse en zonas de riego con uso de fertilizantes inorgánicos, estos corresponderían a la fuente de los nitratos observados en ellas.

#### ♦ Pozos

Las concentraciones de N-Nitratos en todos los pozos son menores al límite para su uso en consumo humano (10 mg N/L). Los pozos con mayores concentraciones son los pozos 35, 10, 3, y 4, los que presentan concentraciones mayores a 5 mg N/L.

En general, las concentraciones de N-Nitrato en las aguas de los pozos no muestran una variación importante en el tiempo.

Basado en las mediciones efectuadas en las campañas de monitoreo se puede decir que las concentraciones de N-Nitratos en el acuífero profundo del sector Pichidegua no representan una restricción para su uso en consumo humano. Esto es particularmente importante para las aguas del pozo APR El Toco, en las cuales se observan concentraciones menores a 5 mg N/L.



Ubicación de los puntos de monitoreo de aguas en el sector Pichidegua. En color amarillo se representan las norias, en color rojo los pozos y en color celeste los puntos de medición de aguas superficiales.



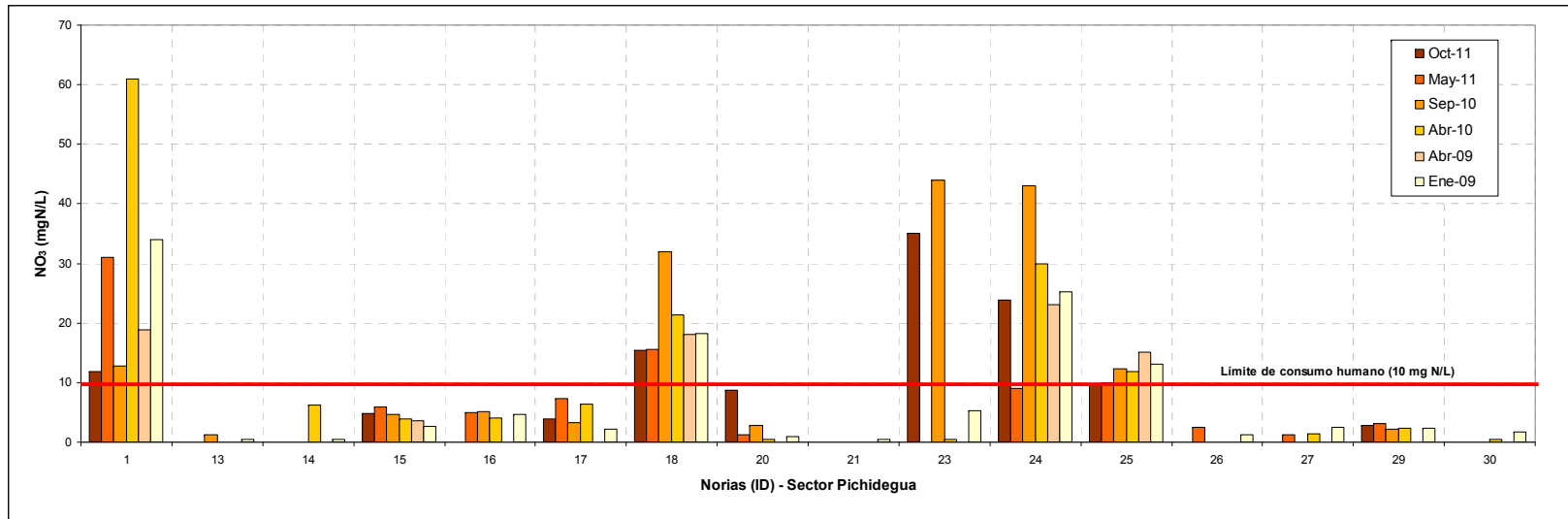


Figura N°9.10: Concentraciones de N-Nitratos medidas entre los años 2009 y 2011 en las **norias** del sector Pichidegua.

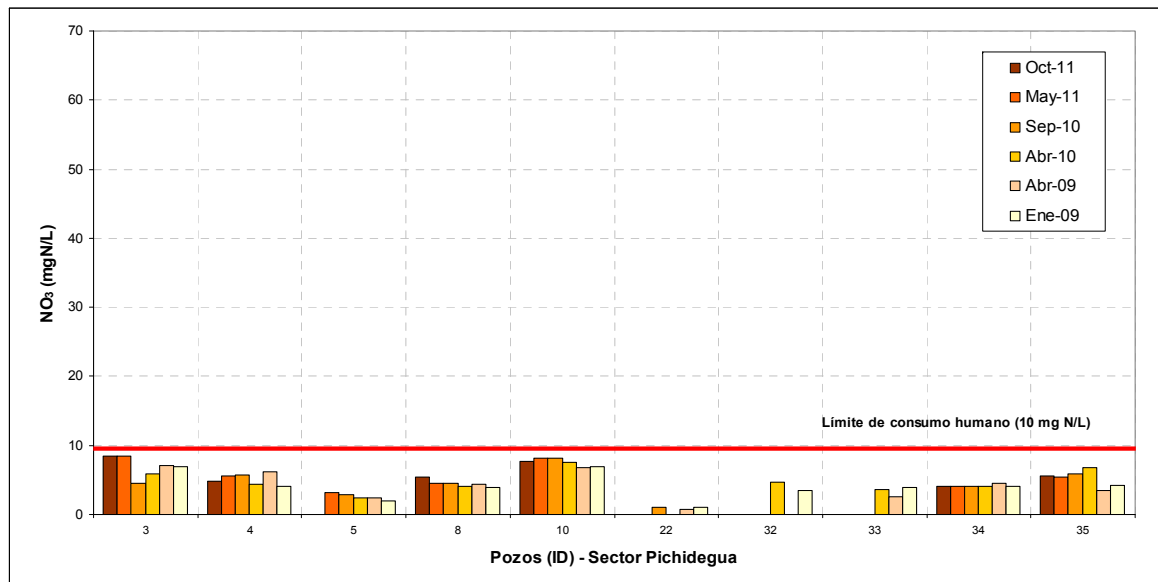


Figura N°9.11: Concentraciones de N-Nitratos medidas entre los años 2009 y 2011 en los **pozos** del sector Pichidegua.



## 9.2.2 Isótopos

Los datos de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  en nitratos colectados en las campañas de los años 2009 y 2010 muestran un gran rango de valores, el que varía entre 5,8 a 39,6 ‰. Excluyendo la medición del pozo 22, de abril de 2009 (con un valor de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  muy enriquecido), las aguas de **pozos** muestran valores de  $\delta^{15}\text{N}$  menores que 10 ‰, en un rango de concentraciones de N-Nitratos menores a 10 mg/L (**Figuras N°9.12 y N°9.13**). Estos valores están dentro del rango de nitratos proveniente de nitrógeno de fertilizantes como la urea y de purines afectados por un mayor o menor grado de volatilización.

Por otro lado, las **norias** tienden a presentar un rango mayor en las mediciones de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ , los que varían entre 4 y 21 ‰, presentando también un mayor rango en concentración de N-Nitratos, con valores entre 4 a 27 mgN/L. Los datos de las norias presentados en las **Figuras N°9.12 y N°9.13** también tienden a mostrar que a medida que la concentración de N-Nitratos disminuye, los valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  tienden a valores más enriquecidos (más positivos). Por el contrario, no se observa una relación entre esos parámetros en el caso de las mediciones en los pozos. Los valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  observados en las aguas de las norias, las que representan el acuífero somero, pueden estar relacionadas a distintas fuentes de nitratos (ver **Figuras N°9.12 y N°9.13**) y/o a cambios en la composición isotópica debido al proceso de desnitrificación.

En el caso de las mediciones de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ , los datos muestran un rango de variación entre 1,4 y 13,5 ‰. Basándose en resultados de estudios de nitrificación en laboratorio (Kumar et. al (1983), Andersson y Hooper (1983) y Hollocher (1984)), los cuales muestran que el oxígeno del nitrato proviene 2/3 de la molécula de agua y 1/3 del oxígeno disuelto (con una composición similar a la del oxígeno atmosférico), se pueden estimar los valores de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  que debería tener el nitrato que se forma por nitrificación en el sector de Pichidegua. Tomando los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  del agua en el acuífero somero y profundo, los que varían entre -6,2 y -11,9 ‰ y asumiendo un valor de  $\delta^{18}\text{O}$  de +23,2 ‰ para el oxígeno atmosférico, se estima que el nitrato debería presentar valores entre -0,2 y 3,1 ‰. Algunos de los valores medidos se encuentran dentro del rango esperado; sin embargo, la mayoría de ellos presentan valores más enriquecidos (más positivos). Parte del enriquecimiento se puede explicar por un enriquecimiento isotópico del agua que participa en la nitrificación, durante su permanencia en el suelo después del riego, parte podría estar asociado a un aporte de fertilizantes del tipo  $\text{KNO}_3$  que se caracterizan por valores muy enriquecidos en  $^{18}\text{O}$  y parte podría estar asociado al proceso de desnitrificación en que el nitrato residual tiende a enriquecerse en  $^{15}\text{N}$  y  $^{18}\text{O}$ . Esta situación se puede evaluar en las **Figuras N°9.12 y N°9.13** en la cual se observa como la composición isotópica cambia a valores más enriquecidos a medida que la concentración de N-Nitratos disminuye (casos de la noria 15 y de los pozos 23 y 22) y en la **Figura N°9.14** donde los dos isótopos ( $^{15}\text{N}$  y  $^{18}\text{O}$ ) tienden a valores más enriquecidos, lo cual nuevamente se observa con mayor claridad en las muestras de la noria 15 y de los pozos 23 y 22.

Evaluando espacialmente los datos isotópicos y de concentración, tomando en cuenta el sistema de flujo, se puede observar que en la cabecera del sistema de flujo, en la zona Sur Este, las norias 15 y 16 se caracterizan por concentraciones de N-Nitratos alrededor de 4 mgN/L; sin embargo, isotópicamente son muy diferentes. Los valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  son

respectivamente de 20,9 ‰ y 11,6 ‰, en el caso de la noria 15 y de 4,0 ‰ y 5,1 ‰, en el caso de la noria 16. En relación a la fuente de nitrógeno, la noria 15 está en una zona donde no se aplican actualmente fertilizantes y/o purines o guano. En el caso de la noria 16, ésta se encuentra en una zona donde se aplica guano. Se postula entonces que los datos isotópicos de la noria 15 se pueden explicar por el proceso de desnitrificación y los datos isotópicos de la noria 16 representarían el nitrato proveniente de guano que no ha sufrido volatilización durante su permanencia en el suelo. Las concentraciones de oxígeno disuelto de 1,4 mg/L en abril 2009 y 3,75 mg/L en abril 2010 en la Noria 15, indican condiciones más anaeróbicas, lo que concuerda con la ocurrencia de desnitrificación. Los datos de isótopos estables en el agua indican que el acuífero somero en la zona de la noria 15 es alimentado en parte por agua de riego proveniente del río. En el caso de la zona de la noria 16, el agua de recarga del acuífero somero es de precipitación local.

En la cabecera de la parte Sur se encuentran las norias 17 y 18. Estas norias también muestran una diferencia significativa en la concentración de N-Nitratos, pero isotópicamente son muy similares. Las dos norias muestran nitratos en el rango de 13 a 14 ‰ en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y 4,5 y 6,9 ‰ en  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ . Estas dos norias están en un área de uso de fertilizantes sintéticos; luego, los valores isotópicos tendrían que estar asociados a volatilización de la urea y no se puede descartar la influencia de desnitrificación. Parte de la recarga al acuífero somero en el área de las norias 17 y 18 proviene del agua de riego y el resto es precipitación local.

En la zona central del área de estudio existen varias norias (24, 25, 26 y 27), las que se encuentran en una zona de uso de fertilizantes inorgánicos. En las aguas captadas por estas norias se observa un gran rango de variación en concentración de N-Nitratos, con valores entre 2,4 a 27,6 mgN/L. Esos nitratos muestran valores entre 10 y 18,8 ‰ en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y entre 3,7 a 6,9 ‰ en  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ . Los valores más enriquecidos se pueden explicar por el efecto de desnitrificación y los valores de 10 ( $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ ) y 3,7 ‰ ( $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ ) son del N-Nitrato de la noria 24, el que presenta un valor de 27,8 mgN/l, que es uno de los más altos medidos en el área de estudio. La noria 24 está en una zona de uso de fertilizantes, pero cercano a la noria hay un pequeño galpón de pollos y un pequeño canal directamente al lado de ella, siendo ésta la fuente más probable de N-Nitrato. Los valores de isótopos estables en el agua muestra que la mayor parte de la recarga al acuífero somero en la zona central proviene del agua de riego.

En la parte terminal del sistema de flujo, se encuentran otras dos norias, 29 y 30, las cuales también están en zonas de uso de fertilizantes sintéticos. El N-Nitrato en esta zona también se caracterizan por concentraciones bajas, en el orden de 0,5 (noria 30) a 2,3 (noria 29) mgN/L, y valores de 9,1 ‰ (noria 30) y 11,5 ‰ (noria 29) en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y de 6,6‰ (Noria 30) a 12,4 ‰ (noria 29) en  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ . Este último valor de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  es bastante alto en comparación con el valor de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ . Una posible explicación sería un aporte de fertilizantes inorgánico en la forma de Nitrato de Potasio de origen chileno, el cual se caracteriza por valores muy enriquecidos de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ , entre 40 a 60 ‰. Es importante destacar que los valores de isótopos estables en agua mostraron que el agua de riego es la fuente principal de agua del acuífero somero. Luego, el nitrato es transportado al acuífero principalmente durante el período de riego.

En relación al acuífero profundo, los pozos 3, 4, 5 y 8, localizados en la zona cercana a la cabecera del sistema de flujo (sector sur oriente), se caracterizan por concentraciones de N-

Nitratos entre 2,4 y 6 mgN/l y valores entre 3,5 y 8,0 ‰ para  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y entre 4 y 5,5 ‰ para  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ . Estos pozos están en zonas de uso de fertilizante inorgánicos, de purines y de guano, sin observarse diferencias significativas en su composición isotópica. Los valores de isótopos estables en el agua mostraron que esta parte del acuífero, cercana a la zona de recarga, está alimentada principalmente por agua de precipitación local.

En el caso del sistema de flujo en el sector del río Tinguiririca, sólo se contó con datos de un pozo (22), el que presenta concentraciones bajísimas de N-Nitrato (1 mgN/L) y valores de 39,6 y 13,2 ‰ para  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ , respectivamente. Estos son los valores más enriquecidos obtenidos en el área de estudio, por lo que se postula que responderían al proceso de desnitrificación, que atenúa la concentración de nitratos y enriquece isotópicamente al nitrato residual. Sin embargo, este pozo muestra un valor de oxígeno disuelto de 8,4 mg/L, el cual representa aguas oxigenadas, donde no es posible que ocurra desnitrificación. Esta parte del acuífero está alimentada principalmente por agua de precipitación. Es importante destacar que el agua de los pozos es un agua de mezcla que proviene de las rejillas colocadas a distintas profundidades. Luego, a veces es posible encontrar oxígeno en el agua ya que una parte del acuífero que esta aportando al pozo tiene oxígeno y otra parte del acuífero puede estar en condiciones anaeróbicas, y es en esas unidades donde se produce la desnitrificación. Desafortunadamente, no fue posible realizar un muestreo del pozo 22 en abril de 2010, por lo que no se puede estudiar con mayor detalle esta situación.

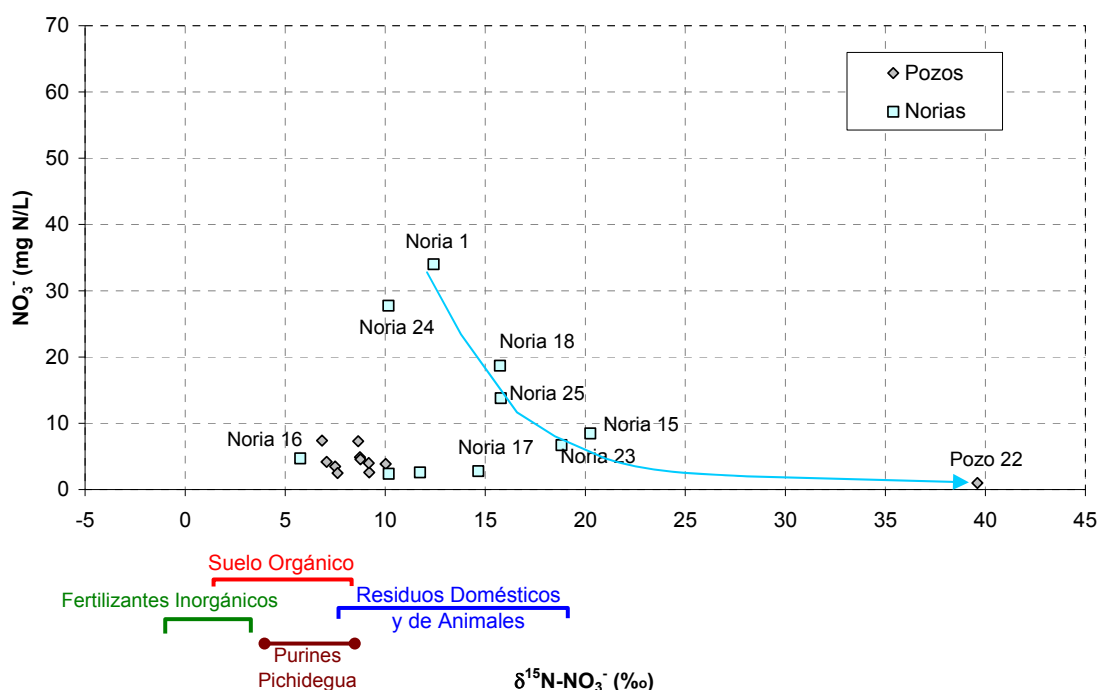
Hacia la parte terminal del sistema de flujo se encuentra el pozo 10, el que se caracteriza por una concentración de N-Nitrato de 7,5 mgN/L y de 5,9 a 6,8 ‰ en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y de 1,6 ‰ para  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ . Este último valor es uno de los más bajos en el área de estudio. Este pozo está ubicado en una zona de aplicación de purines y guano, y los valores de isótopos estables en el agua indican que esta parte del acuífero es alimentada por agua de riego proveniente del río. Es posible que en esta zona hayan materiales de alta permeabilidad y la recarga sea relativamente rápida en la zona de riego, no siendo posible que el agua sea afectada por evaporación antes de infiltrarse. Los valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}$  pueden representar N-Nitratos de purines y guano que no ha sufrido volatilización en el suelo o fertilizantes como la urea que ha sido afectada por volatilización y que entró al acuífero profundo aguas arriba de la zona de la aplicación de purines. Luego, los isótopos del  $^{15}\text{N}$  no son muy sensibles para diferenciar nitratos de fertilizantes en comparación a purines.

También en la parte terminal del área de estudio, en que la mayor parte del área está influenciada por uso de fertilizantes sintéticos, es posible encontrar a los pozos 32, 33, 34 y 35, los que se caracterizan por valores de N-Nitratos entre 3,6 a 6,8 mgN/L. Los nitratos de esas aguas se caracterizan por valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  entre 7,5 a 10 ‰, contándose solamente con un valor de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  de 4,2 ‰, medido en una muestra de agua obtenida desde el pozo 34. Los valores de isótopos estables en agua indican que parte del agua que alimenta al acuífero en la zona proviene del agua de riego, proveniente del río. En la zona del pozo 34, el acuífero es alimentado solamente por precipitación local y el nitrato en este pozo se caracteriza por valores de 6,9 y 4,2 en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ , respectivamente.

Resumiendo y de acuerdo a lo anterior, no se observan diferencia significativas entre la composición isotópica de los nitratos en aguas del acuífero profundo en áreas con uso de

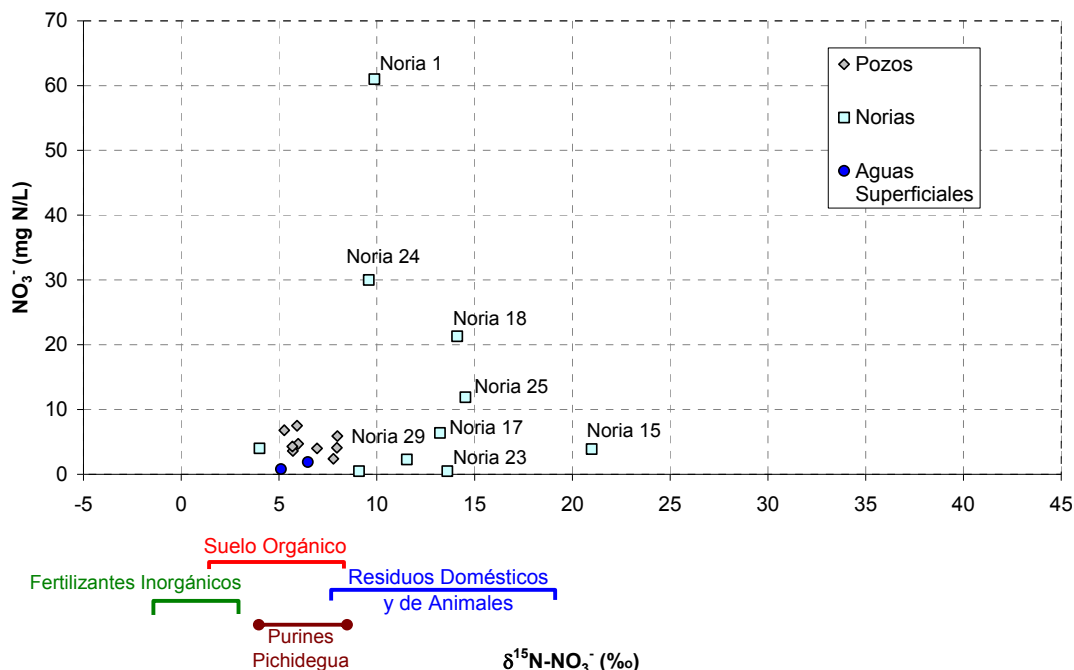
fertilizantes inorgánicos en comparación a áreas con aplicación de purines y guano. En algunos sectores con aplicación de fertilizantes sintéticos (urea), se observaron marcas enriquecidas en  $\delta^{15}\text{N}$ , las cuales probablemente son atribuibles a un fraccionamiento isotópico por volatilización. Este factor explicaría en parte los valores enriquecidos en las mediciones de  $^{15}\text{N}$  medidos en las norias, las cuales en su mayoría están en zonas bajo la influencia de aplicación de fertilizantes inorgánicos. Sin embargo, también se observó que las aguas de las norias pueden estar afectadas por actividades antropogénicas como corrales de animales cerca de ellas, con lo cual ellas representarían una situación puntual y no el nivel de nitratos a escala más regional del acuífero somero.

Los datos isotópicos también muestran que la desnitrificación es un proceso que está participando en la atenuación de nitratos en el acuífero somero y profundo. El papel del proceso de desnitrificación en la atenuación de nitrato en el área de estudio requiere de un estudio más detallado que incluye la instalación de piezómetros a distintas profundidades en el acuífero somero y profundo. Es importante señalar que tanto en las norias como los pozos están colectando una mezcla de aguas de distintas capas del acuífero que pueden estar en distintas condiciones de óxido-reducción.

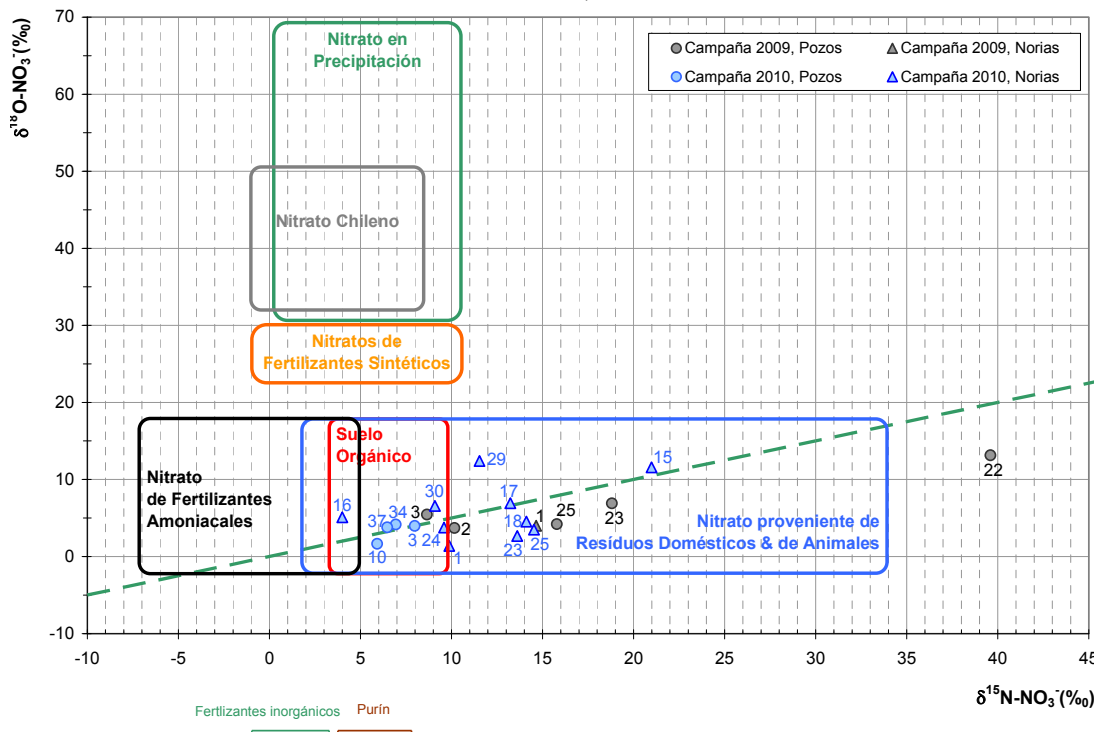


**Figura N°9.12:**  $\text{NO}_3^-$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  de  $\text{NO}_3^-$  en muestras obtenidas de pozos y norias en 2009, sector Pichidegua. A modo de referencia, se presentan el rango de  $\delta^{15}\text{N}$  de  $\text{NH}_4^+$  obtenidos en las muestras de purines, las muestras de fertilizantes inorgánicos y rangos de marcas isotópicas esperadas para diferentes fuentes posibles de Nitratos (Aravena et al., 2005; Silva et al., 2002; Clark and Fritz, 1997).





**Figura N°9.13:**  $\text{NO}_3^-$  vs  $\delta^{15}\text{N}$  de  $\text{NO}_3^-$  en muestras obtenidas de pozos y norias en 2010, sector Pichidegua. A modo de referencia, se presentan el rango de  $\delta^{15}\text{N}$  de  $\text{NH}_4^+$  obtenidos en las muestras de purines, las muestras de fertilizantes inorgánicos y rangos de marcas isotópicas esperadas para diferentes fuentes posibles de Nitratos (Aravena et al., 2005; Silva et al., 2002; Clark and Fritz, 1997).



**Figura N°9.14:**  $\delta^{15}\text{N}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de  $\text{NO}_3^-$  en muestras obtenidas de pozos y norias, sector Pichidegua (campañas 2009 y 2010). A modo de referencia, se presentan el rango de  $\delta^{15}\text{N}$  de  $\text{NH}_4^+$  obtenidos en las muestras de purines, la marca de fertilizantes amoniacales, y rangos de marcas isotópicas esperadas para diferentes fuentes (fertilizantes de nitrato de amonio, suelo orgánico, residuos domésticos y de animales) posibles de Nitratos (Aravena et al., 2005; Silva et al., 2002; Clark and Fritz, 1997).

### **9.2.3 Fuentes de Nitrógeno y Zonas de Impactos Potenciales**

La **Figura N°9.15** presenta los pozos y norias, junto con las áreas de aplicación de purines/fertilizantes en el área del proyecto. La **Figura N°9.16** presenta la geología de superficie junto con la ubicación de los pozos, las norias, puntos de muestreo de aguas superficiales, los cultivos, y los fertilizantes aplicados. Se observan:

- En la zona de influencia de aplicación de fertilizantes inorgánicos de los cultivos (I5 – I13, N9, N10, I9, e I10), se ubican las Norias 13, 14, 15 y 16. Sus aguas presentan relativamente bajas concentraciones de N-Nitratos (entre <0,5 y 6,2 mg N/L). Los valores de 5,7 ‰ en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  (noria 16) representaría la composición isotópica de guano, en una zona con recarga de precipitación local, y el valor de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  alrededor de 20 ‰ en la noria 15 indicarían que desnitrificación en un proceso que está participando en la atenuación de nitratos en esta zona.
- Los Pozos 3, 4, 5, 8, junto con la Noria 1, monitorean las aguas en la zona de influencia de la aplicación de purines y guanos en los cultivos P10 – P15. Sin embargo, esta área también puede estar bajo la influencia de los N-Nitrato de las zonas con fertilizantes inorgánicos. Las aguas de los pozos profundos tienen concentraciones de N-Nitratos entre 1,9 y 8,5 mg-N/L, en tanto que la Noria 1 presenta concentraciones de  $28 \pm 18$  mgN/L. Los valores de 9,9‰ (N-Nitrato= 61 mgN/L) y 12,4‰ (N-Nitrato= 34 mgN/L) en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  en esta noria representaría la influencia de los purines y guano en una zona que esta recargada principalmente por agua de riego proveniente del Río Tinguiririca. El valor isotópicamente más enriquecido de este nitrato en comparación a los purines y guanos frescos indicaría que la urea en estas fuentes está afectada por volatilización durante su permanencia en la zona de riego. La gran diferencia en la concentración de N-Nitratos medido en esta noria está indicando que hay una fuente puntual de nitrógeno cercana a la noria, la cual está aportando estacionalmente diferentes concentraciones de N-Nitrato.
- Los valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  entre 7 y 9 ‰ en los nitratos en el agua subterránea del acuífero profundo, están un poco más enriquecidos que los purines y guano y se explicarían por algún grado de volatilización de las fuentes en la zona de cultivos. Esta parte del acuífero está recargada alrededor de un 30 % por agua de riego. Pero esos valores en parte pueden estar también asociados a urea de fertilizantes que ha sufrido volatilización durante su permanencia en el suelo y entró al sistema profundo en las zonas de aguas arriba de los pozos 3, 4, y 5.
- Cinco norias (Noria 24, Noria 23, Noria 25, Noria 27, y Noria 26), que se ubican en la mitad de la cuenca, se ubican en una zona de uso de fertilizantes inorgánicos.

Las aguas obtenidas de la Noria 24 tienen una concentración de N-Nitrato de  $25,7 \pm 11$  mgN/L, siendo uno de los puntos con los valores más alto encontrado en la cuenca. Considerando el sistema de flujo del agua subterránea, el N-Nitrato en esta noria podría estar asociado a la aplicación de purines en los cultivos P10 y P11. También en la zona hay un pequeño galpón de pollos y un pequeño canal directamente al lado de la noria,

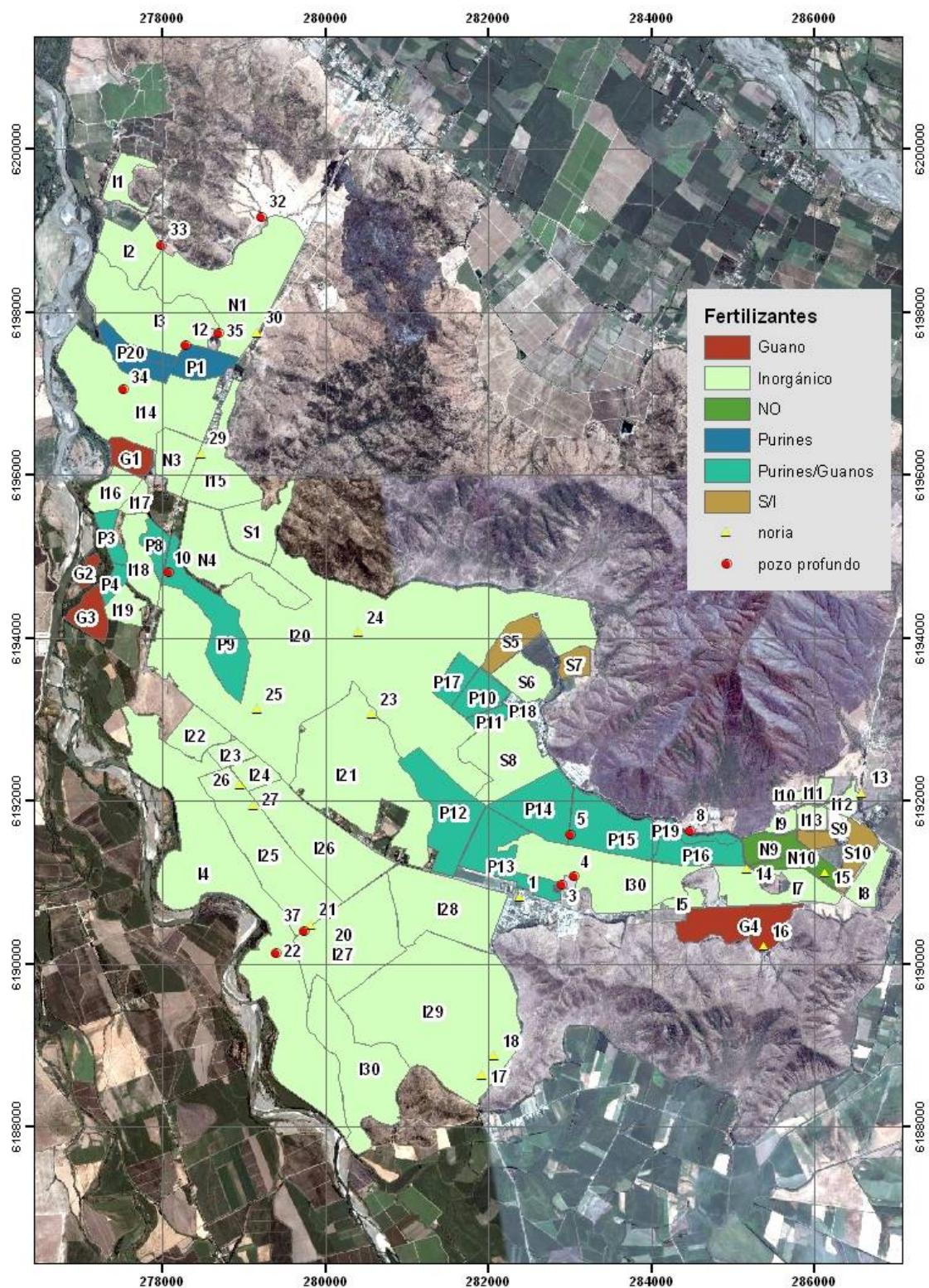
siendo éstas las fuentes más probables de N-Nitrato en esta noria. Los valores de 10,1 y 3,7 ‰ para  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ , respectivamente, indicaría que el N-Nitrato podría ser de origen animal en una zona donde la mayor recarga proviene de agua de riego captada en el río.

La Noria 25 también tiene concentraciones de N-Nitratos relativamente altos ( $12 \pm 2,1$  mgN/L). De acuerdo al sistema de flujo de aguas subterráneas, esta noria no se ubica en la zona de influencia de la aplicación de purines en la zona P9 (zona ubicada aguas abajo). Esta noria está ubicada en un prado (N8) donde existen residuos de vacunos, siendo ésta la fuente de N-Nitratos más probable. El valor de 15,8 ‰ confirma que el N-Nitrato es de origen animal y que ha sido afectado en parte por volatilización en el área de riego en una zona en que la mayor parte de la recarga se origina en agua de riego proveniente del río. No se puede descartar el rol de la desnitrificación en esta zona.

Las concentraciones de N-Nitratos en la Noria 23 presenta altos valores ( $21,2 \pm 21,6$  mgN/L), con variabilidad en el tiempo. Por otro lado, las norias 27 ( $1,7 \pm 0,7$  mgN/L) y 26 ( $1,9 \pm 0,8$  mgN/L) presentan concentraciones relativamente bajas. El N-Nitrato de la Noria 23 es caracterizado por valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ , de 18,8 y 6,9 ‰, respectivamente, lo que indicaría la ocurrencia de desnitrificación en esta parte del acuífero somero.

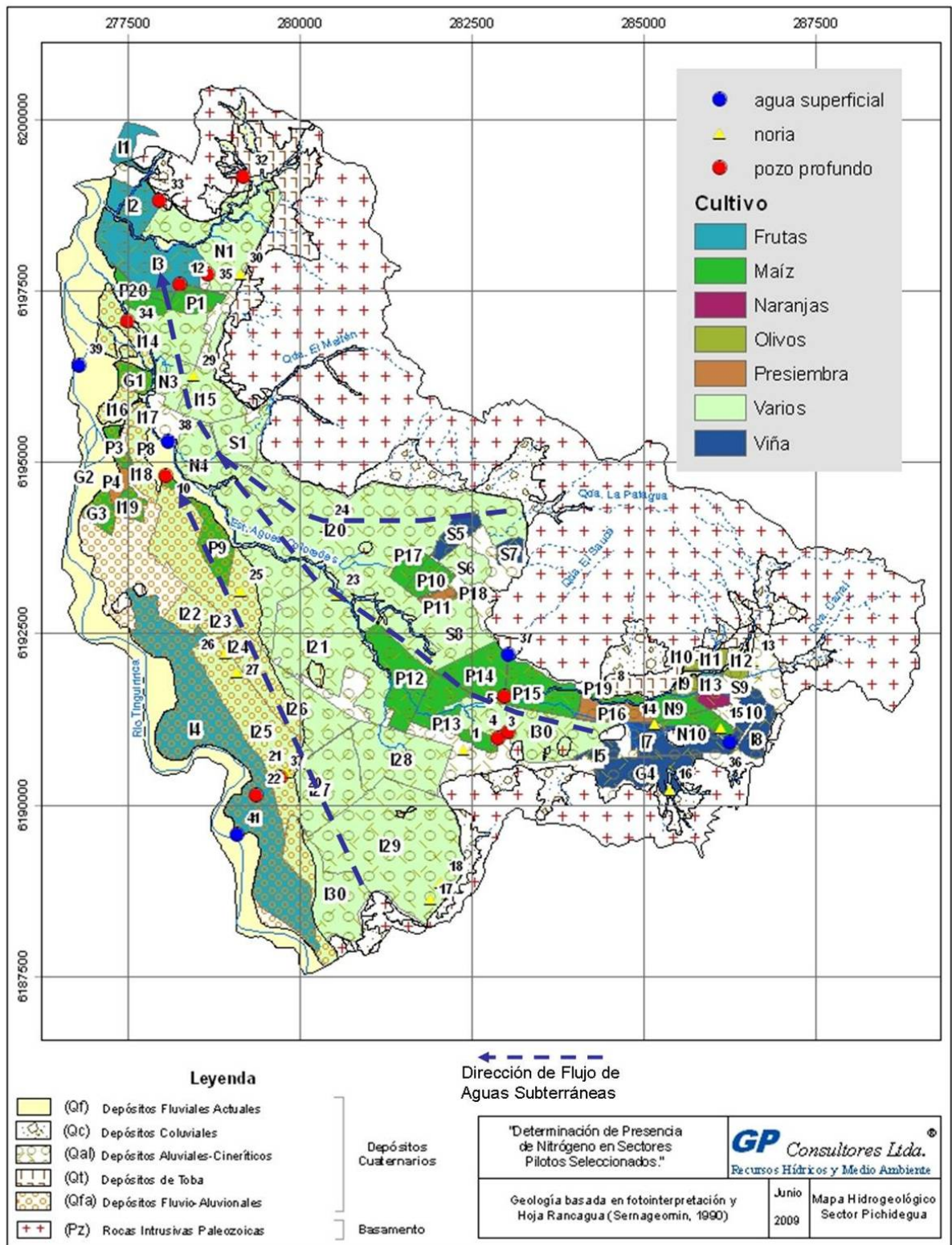
- El único pozo que se ubica en la zona de aplicación de purines y guanos del “plantel 5” (P2 – P9) es el pozo 10, cuyas aguas presentan relativamente bajas concentraciones de N-Nitrato ( $7,5 \pm 0,6$  mgN/L). Los valores de 5,9 y 6,8 ‰ en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  representarían la influencia de los purines y guanos en esta zona, pero podrían también representar nitratos provenientes de urea que ha sufrido volatilización durante su permanencia en el suelo antes del riego y que entraron al acuífero profundo aguas arriba del área de la aplicación de purines.
- En la zona de influencia de la aplicación de fertilizantes por los cultivos I1 – I3 y donde se también se aplican purines (P1), se ubican los siguientes puntos de monitoreo: Pozo 35, Noria 30 y Pozo 34. Las aguas de esas captaciones tienen relativamente bajas concentraciones de N-Nitrato (entre  $<0,5$  y  $6,8$  mgN/L). Las aguas de los pozos ubicados en las áreas de recarga de esta zona tiene concentraciones de N-Nitrato de  $4,1 \pm 0,8$  mgN/L (Pozo 32) y  $3,4 \pm 0,7$  mgN/L (Pozo 33), concentraciones que podrían representar niveles naturales de mineralización de suelos orgánicos en zonas agrícolas. Los datos de isótopos estables del agua muestran que la parte del acuífero donde se ubica el Pozo 32, es recargado por precipitación local y el N-Nitrato se caracteriza por un valor de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  de 7,5 ‰, que puede representar el N-Nitrato de mineralización de nitrógeno de suelos acumulado en prácticas agrícolas históricas.





**Figura N°9.15:** Distribución de Pozos y Norias en el Área Oriente del Sector de Estudio, e Identificación de Tipo de Fertilizantes utilizados en sector Pichidegua (P: Purín; I: Fertilizante Inorgánico; N: Ninguna aplicación; S: Sin Información. A estos códigos les siguen números que sólo indican un orden correlativo).





**Figura N°9.16:** Geología superficial y ubicación de pozos, las norias, puntos de muestreo de aguas superficiales, los cultivos, y los fertilizantes aplicados (P: Purín; I: Fertilizante Inorgánico; N: Ninguna aplicación; S: Sin Información. A estos códigos les siguen números que sólo indican un orden correlativo).

#### 9.2.4 Estudio Complementario en Perfiles de Suelo

Las mediciones realizadas en el período del proyecto (campañas de medición en: abril 2009, abril 2010, octubre 2010, abril 2011 y septiembre 2011) en las aguas subterráneas el sector Pichidegua, las cuales comprenden períodos secos (previos al inicio de las lluvias) y períodos húmedos (posterior a las lluvias), muestran bajas concentraciones de N-Nitratos en norias (acuífero somero) y pozos (acuífero profundo), con algunas excepciones asociadas a situaciones localizadas, en focos específicos de la cuenca. Por lo anterior, no se puede hablar de una pluma regional de nitratos en este sector piloto del proyecto.

Sin embargo, en la superficie del sector existen fuentes importantes de Nitrógeno, tales como agricultura con aplicación de fertilizantes y plantales de cerdos con aplicación de purines al suelo.

Para mejorar el entendimiento del porqué esas cargas de nitrógeno en la superficie no se expresan en la calidad de las aguas subterráneas, en el último año del proyecto se realizaron mediciones en perfiles verticales del suelo para evaluar pérdidas potenciales de formas nitrogenadas ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NH}_4^+$ ). El estudio complementario de suelo fue desarrollado por la Universidad de Chile, e incluyó un monitoreo continuo en el periodo Abril a Octubre de 2011. El estudio completo se adjunta en **Anexo C**.

El sector seleccionado para efectuar las mediciones corresponde a suelos de textura gruesa (escenario conservador), cultivados con maíz y sometidos a aplicaciones de purín de cerdo la temporada anterior.

Las tareas desarrolladas contemplaron los siguientes puntos:

- ◆ Evaluar continuamente los niveles de  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_4$  en los suelos hasta 1 m de profundidad.
- ◆ Determinar las tasas de mineralización neta de N.
- ◆ Establecer un balance hídrico en los suelos.
- ◆ Establecer un índice de riesgo de lixiviación de N- $\text{NO}_3$  y validarlo para las condiciones estudiadas.
- ◆ Evaluar los niveles de  $\text{NO}_3$  y  $\text{NH}_4$  en los suelos al final del estudio, hasta 3 m de profundidad.

Se evaluó (ver **Tabla N°9.3**) una situación con aplicación de purín de cerdo -en la temporada anterior- en pradera (PCE) y otra, como punto de control, sin aplicación de enmienda (PSE).

La información proporcionada por los propietarios indicó que cada unidad de muestreo elegida presenta un uso y manejo del suelo similar, particularmente en lo que se refiere a tipo de cultivos, dosis de fertilizantes y de purín de cerdo.

**Tabla N°9.3:** Descripción de las condiciones o tratamientos evaluados en sector Pichidegua.

Tratamientos	Serie de suelos	Vegetación actual	Aplicación enmienda	Última labor
PSE	PDG	Barbecho	Ninguna	Cosecha
PCE	PDG	Barbecho	Purín de cerdo	Incorporación de rastrojos

Las conclusiones obtenidas en los Balances de Nitrógeno efectuados en esas Parcelas Experimentales, muestran que:

- Los niveles de N-NO<sub>3</sub> entre 0-1 m fueron más altos en el caso con de tratamiento con aplicación de purines (PCE), respecto del control sin enmienda (PSE). La lixiviación de N-NO<sub>3</sub> siguió la misma tendencia. Lo anterior se relaciona directamente a las mayores adiciones de N en el primer caso por las aplicaciones de purín de cerdo durante el período en estudio. Sin embargo, es importante destacar que, a pesar que el tratamiento PCE recibió 2 aplicaciones de purín de cerdo durante el invierno en un suelo en barbecho, gran parte del N aportado (90%) quedó retenido en el primer metro de suelo.
- En todos los tratamientos evaluados se encontró que, en el período en estudio, los procesos de inmovilización de N dominaron en la superficie del suelo por sobre la mineralización de N. Los factores limitantes para la mineralización fueron las relaciones C/N iniciales altas y temperatura del suelo bajas (<10°C).
- El balance hídrico mostró en el caso PSE un valor negativo, con precipitaciones bajo los promedios anuales y sin generación de percolación profunda. Por otro lado, en el tratamiento con enmienda (PCE), que recibió un aporte extra de agua por 2 aplicaciones de purín de cerdo durante los meses invernales, la situación fue inversa (balance positivo).
- El estudio de los niveles de N-NO<sub>3</sub> en estratos profundos (intervalo de profundidad de 0-3 m) realizado al final del estudio, mostró que existen zonas dentro del suelo donde hay cambios texturales abruptos que generan discontinuidades en el tamaño que poros que afectarían el movimiento de agua en profundidad (percolación profunda) y en consecuencia la lixiviación de N-NO<sub>3</sub> hacia napas subterráneas, donde este último proceso se vería restringido y donde los N-NO<sub>3</sub> se acumularían sobre o dentro estas zonas de movimiento de agua lento.
- Considerando las condiciones climáticas de la zona, las características de los suelos analizados y la duración del estudio (Abril-Octubre), los resultados de este estudio sugieren que los nitratos se estarían acumulando dentro de los 3 primeros metros de profundidad y el riesgo de lixiviación hacia napas más profundas sería bajo. Sin embargo, es necesario realizar estudios de mayor detalle para evaluar los procesos de atenuación del nitrógeno en profundidad y poder evidenciar la variabilidad temporal de las formas nitrogenadas en los suelos y así poder llegar a conclusiones definitivas.

## 10. RESUMEN Y CONCLUSIONES

---

Se han seleccionado dos sitios o sectores pilotos donde desarrollar el proyecto. En la selección de esos sectores se empleó un análisis cualitativo crítico de la información disponible, según tres escalas geográficas:

Nivel regional.  
Nivel comunal, y  
Nivel de sectores.

Basado en el análisis de la información existente y condicionado por el presupuesto disponible, se seleccionaron los siguientes dos sectores:

- a) Sector San Pedro (Quebrada Los Maquis en comuna San Pedro de la Región Metropolitana de Santiago), y
- b) Sector Pichidegua (río Tinguiririca en comuna Pichidegua de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins).

### **Reconocimiento Inicial del Sector San Pedro**

- ◆ Existe un número importante de pozos/norias que permiten efectuar muestreos y mediciones *in situ* de las aguas subterráneas y ellos están bien distribuidos en la cuenca.
- ◆ Rango de concentraciones de nitratos: entre 2 y 27 mg-N/L.
- ◆ Las actividades agrícolas en este sector son representativas de las actividades existentes en la Región Metropolitana
- ◆ Las fuentes potenciales de nitrógeno son reconocibles.
- ◆ Se cumplen los requisitos para el proyecto, por lo tanto, es posible evaluar la carga de nitrógeno de fuentes potenciales y efectuar balances de nitrógeno

### **Reconocimiento Inicial del Sector Pichidegua**

- ◆ La cantidad y distribución de pozos es adecuada para el proyecto, pero no existe mucha información sobre su litología, profundidad, datos de construcción, etc.
- ◆ Existe mucha información disponible sobre el tratamiento y aplicación de purines y guanos desde los planteles de cerdos.
- ◆ Intensa actividad agrícola en este sector.
- ◆ Las actividades agrícolas en este sector son representativas de las actividades existentes en la Región del Libertador Bernardo O'Higgins
- ◆ Sector adecuado para el desarrollo del proyecto.



Las regiones Metropolitana de Santiago y VI Región del Libertador Bernardo O`Higgins, donde se ubican los sectores pilotos seleccionados, concentran en conjunto más del 80% de los criaderos de cerdo del país.

## 10.1 SECTOR SAN PEDRO

A continuación se presenta una síntesis de los principales resultados del proyecto obtenidos para el sector San Pedro.

### a) Fuentes Potenciales de Nitratos

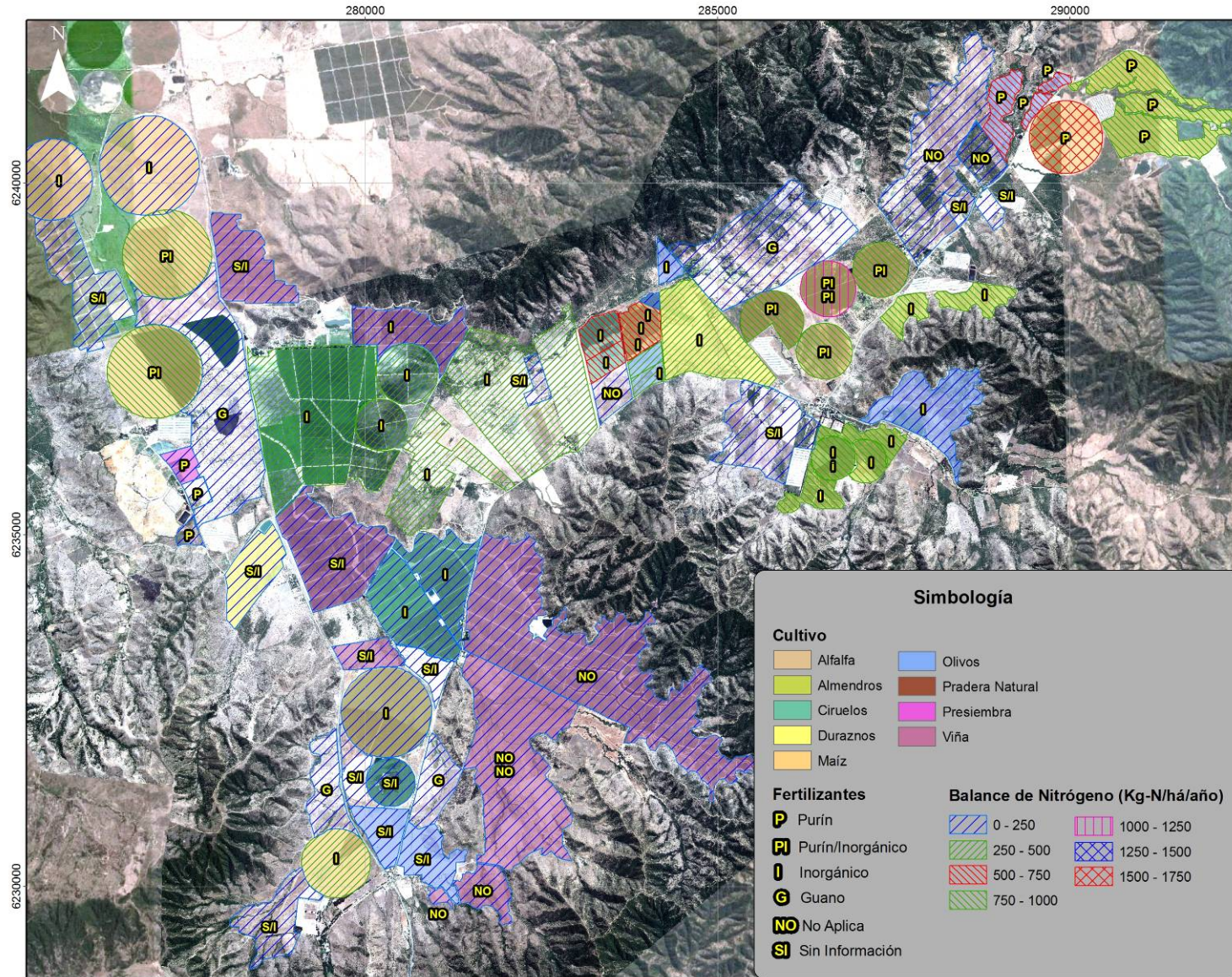
Los purines son los que aportan una mayor cantidad de nitrógeno a la superficie del terreno en este sector (68%), seguido por los fertilizantes inorgánicos (32%). El aporte de los sólidos (guanos) es muy inferior (0,1%) respecto de las otras fuentes existentes. Esa evaluación es efectuada considerando la magnitud de las aplicaciones de fertilizantes, su caracterización química (principalmente referida a la concentración de nitrógeno) y la extensión areal que abarcan las distintas aplicaciones.

En **Tabla N°10.1** se resume la comparación entre las diferentes fuentes potenciales existentes en el sector y en **Figura N°10.1** se muestra su distribución espacial

**Tabla N°10.1:** Comparación de los Aportes de Nitrógeno de Fuentes Identificadas en el sector San Pedro – temporada 2008/09.

Tipo de Fertilizante Aplicado	Superficie Aplicación [ha]	% Superficie c/r al Área Total del Sector	Aporte de Nitrógeno (Kg N/año)	% Nitrógeno c/r al Total Aplicado
Inorgánicos	1.039,8	24	244.062	31,8
Purines	680,5	16	523.600	68,1
Guanos	649,1	15	884	0,1
Zonas Sin Aplicación	1.096,2	26	-	0
Zonas Sin Información (*)	801,4	19	Sin Información	Sin Información
Total	4.267,0	100	768.546	100

(\*) No se contó con la colaboración y entrega de la información por parte de los dueños de los predios.



**Figura N°10.1:** Cultivos y fertilizantes aplicados en sector San Pedro.



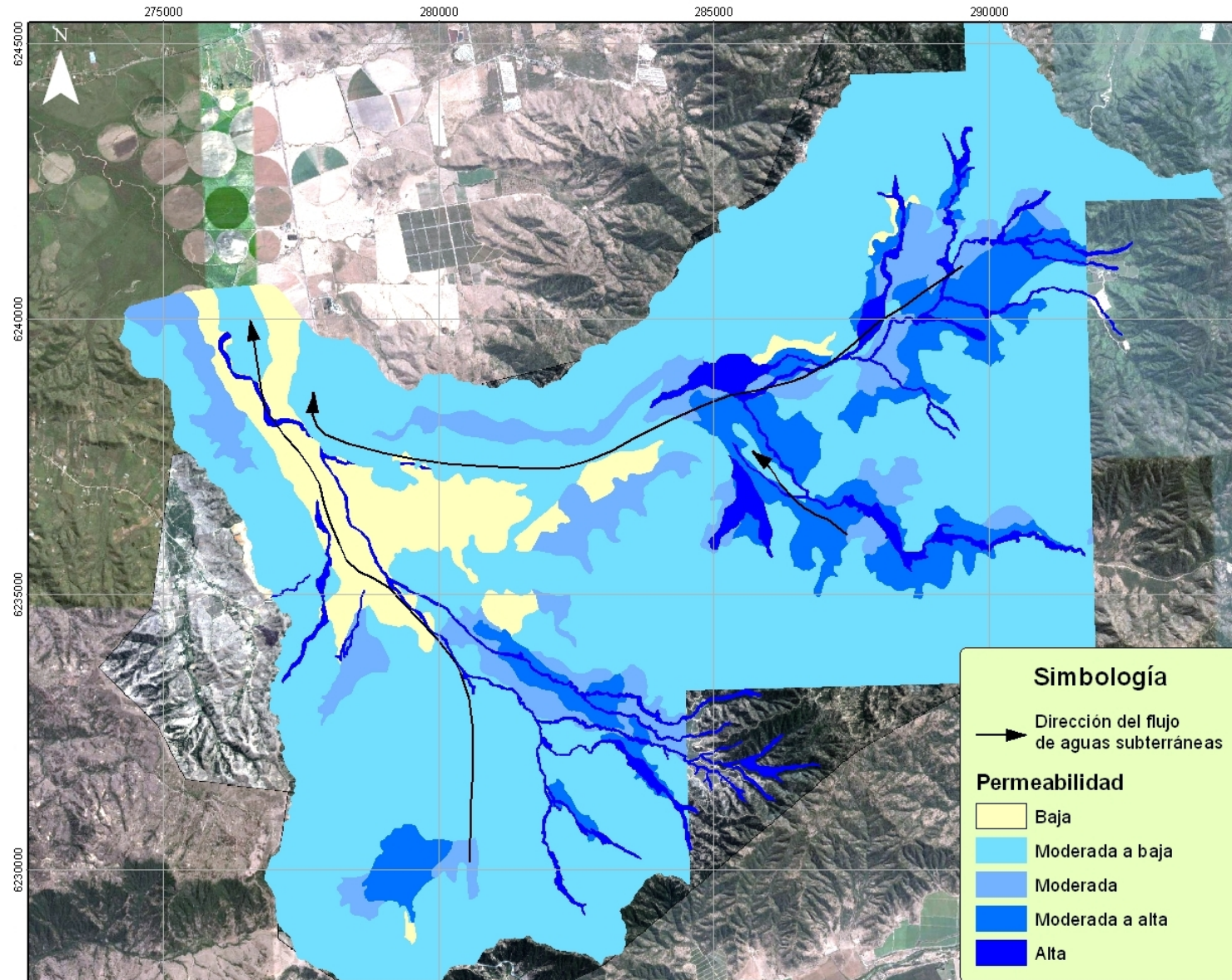


Figura N°10.2: Permeabilidad del suelo (superficial, primeros metros del relleno sedimentario).

## **b) Caracterización del Sistema Hidrogeológico**

En superficie, los suelos presentan en general permeabilidades de moderada a baja (ver **Figura N°10.2**). Sólo en los cauces naturales (que conducen aguas lluvias) se observan altas permeabilidades hidráulicas.

En subsuperficie se observan 2 unidades hidrogeológicas principales. La superficial, que presenta continuidad en todo el valle, está conformada por un estrato arcilloso y limo-arcilloso (representativo de un acuitardo). Bajo ella se encuentra el acuífero propiamente tal, conformado por arena gruesa y grava fina con escasa presencia de arcilla, la cual se encuentra interdigitando con estratos arcillo-limosos y arcillo-arenoso.

Respecto a las aguas subterráneas, en las norias se observa una profundidad de la napa freática de entre 10,8 a 17,9 metros de profundidad, lo cual es representativo del sistema somero ubicado en la unidad hidrogeológica superficial (estrato arcilloso, limo-arcilloso). En el sistema profundo, acuífero propiamente tal, los pozos muestran que el nivel saturado de las aguas subterráneas se ubica entre 11,2 a 26,4 metros de profundidad. Se observa que las norias poseen niveles del agua subterránea más cercanos a la superficie del terreno que en los pozos profundos en áreas cercanas. Lo anterior muestra que existen dos sistemas distintos: uno somero y uno profundo.

La recarga de agua del sistema somero proviene de las lluvias y de la percolación de los excedentes del regadío. Las aguas del sistema profundo provienen de la infiltración de las aguas lluvias en el *pie de monte* (por los depósitos coluviales).

De acuerdo a los gradientes hidráulicos en vertical, existe una posibilidad de percolación de aguas desde el sistema superior/somero al profundo; no obstante su magnitud está restringida por la baja permeabilidad del estrato arcilloso superficial.

En **Figuras N°10.3(a) y (b)** se presenta el esquema conceptual de funcionamiento del sistema hidrogeológico del sector San Pedro.

Las mediciones de isótopos estables del agua ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ), valores de  $\delta^{18}\text{O}$  entre -5,8 y -7,2‰ y de  $\delta^2\text{H}$  entre -40,0 y -50,0‰, muestran que las aguas subterráneas provienen de una altitud aproximada de 500 m.snm (similar a la de la cuenca), lo cual identifica que ellas se originan por la percolación de las precipitaciones que caen directamente en la cuenca.

Por otra parte, las mediciones de Tritio en las aguas subterráneas del sector presentan valores inferiores al límite de detección analítico del laboratorio ( $>0,8$  UT). Considerando que se espera que las lluvias en el sector presenten valores de Tritio superiores a 1,3 UT (valor medido en un pozo ubicado en cabecera, el cual correspondería a mezcla entre aguas recientes con las del acuífero), las mediciones de Tritio muestran que las aguas subterráneas del sector tienen un largo tiempo de residencia en el sistema (probablemente mayor a 15 años). Este comportamiento puede estar relacionado con el hecho que la mayor parte de la recarga se produce en la cabecera de la cuenca, donde están presente los materiales de mayor permeabilidad.



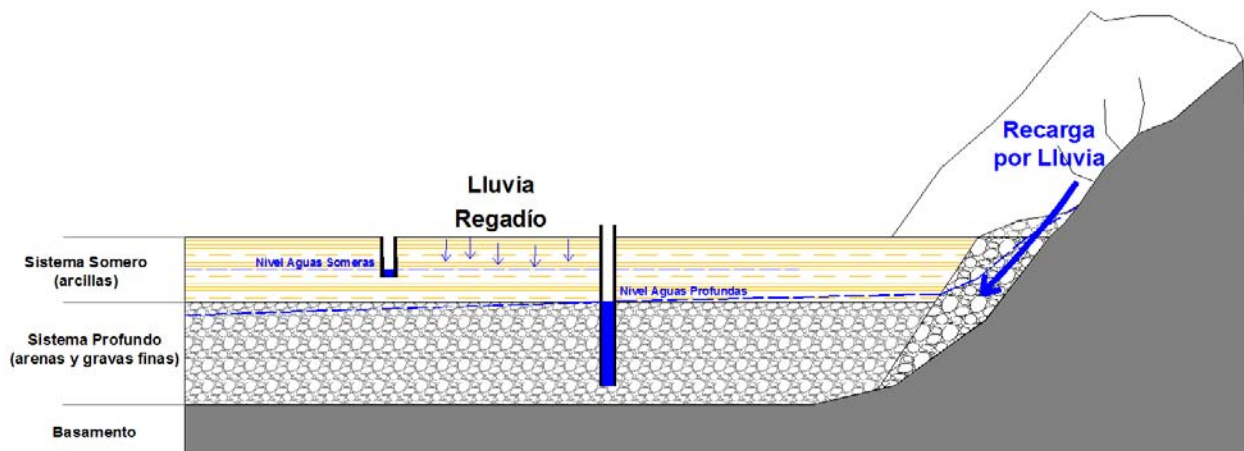


Figura N°10.3(a): Perfil longitudinal representativo esquemático del sistema hidrogeológico del sector San Pedro.

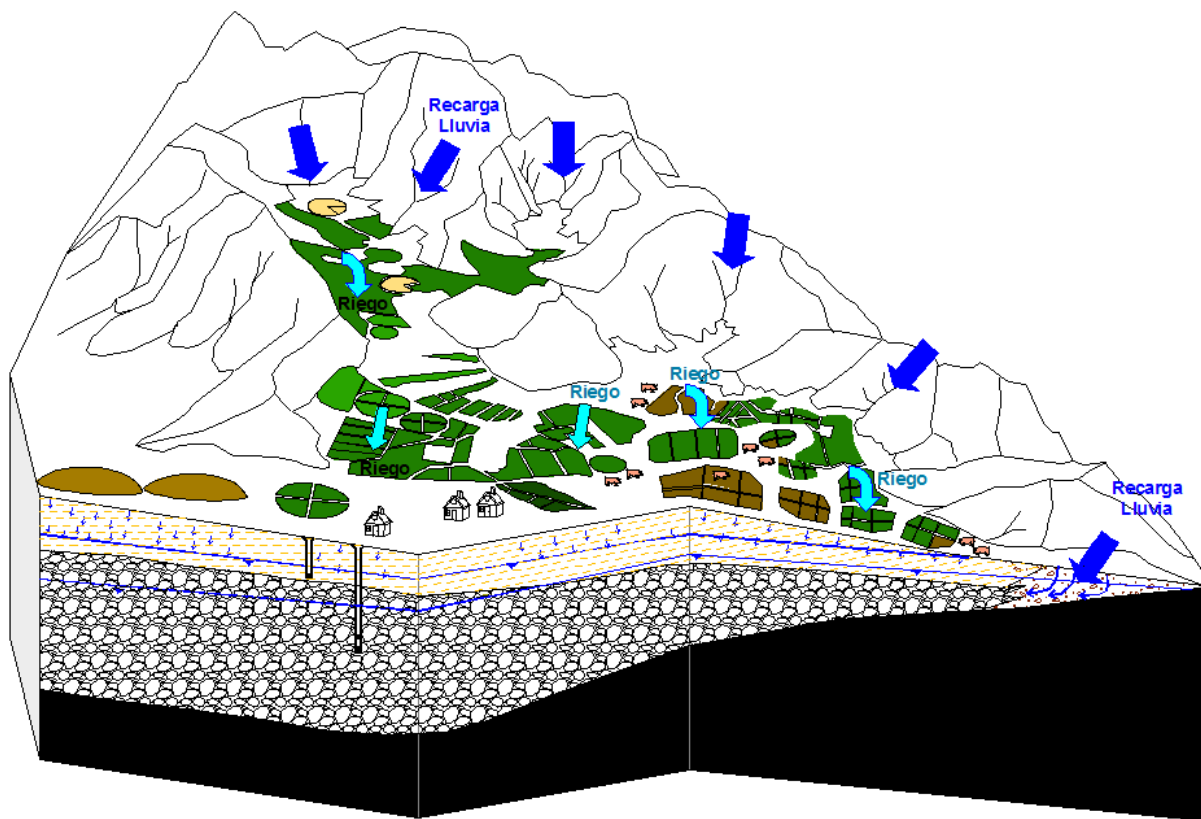


Figura N°10.3(b): Esquema conceptual del sistema hidrogeológico del sector San Pedro.

### c) Nitratos en las Aguas Subterráneas

Las mediciones conjuntas de Nitrógeno Total y N-Nitratos, confirman que los N-Nitratos son la especie del nitrógeno preponderante en el sistema acuífero (superficial y profundo).

La calidad de las aguas subterráneas en el período del proyecto (entre los años 2009 y 2011), específicamente con respecto a N-Nitratos, no muestran cambios, salvo en algunos casos puntuales, lo cuales están asociados a condiciones específicas en algunos pozos y norias. Los monitoreos efectuados han considerado el muestreo estacional, abarcando períodos secos (previos a las lluvias) y húmedos (posterior a las lluvias), lo que permite también concluir que estacionalmente las concentraciones de N-nitrato no cambian significativamente, excepto en algunos sectores en el sistema somero representado por norias.

En **Figura N°10.4** se observa que la mayoría de los pozos que captan aguas del sistema acuífero profundo, se caracterizan por concentraciones de N-Nitrato menores a 10 mg-N/L (valor límite en agua potable). Los pocos valores de nitratos superiores a 10 mg-N/L, corresponden a focos específicos de la cuenca, por lo que no se puede hablar de una pluma regional de nitratos. Esos focos quedan definidos por los pozos 14, 16, 20, 40, 43, 46 y 47 (ver **Figura N°10.6**).

En **Figura N°10.5** se observa que la concentración de N-Nitratos medidos en el sistema acuífero somero, representado por las norias, es menor al límite de 10 mg N/l, salvo casos aislados en ciertas campañas y en puntos específicos (ver **Figura N°10.6**). Se hace presente que el número reducido de norias se explica por la existencia de un nivel freático profundo y que un gran número de norias se secan durante el período sin lluvias.

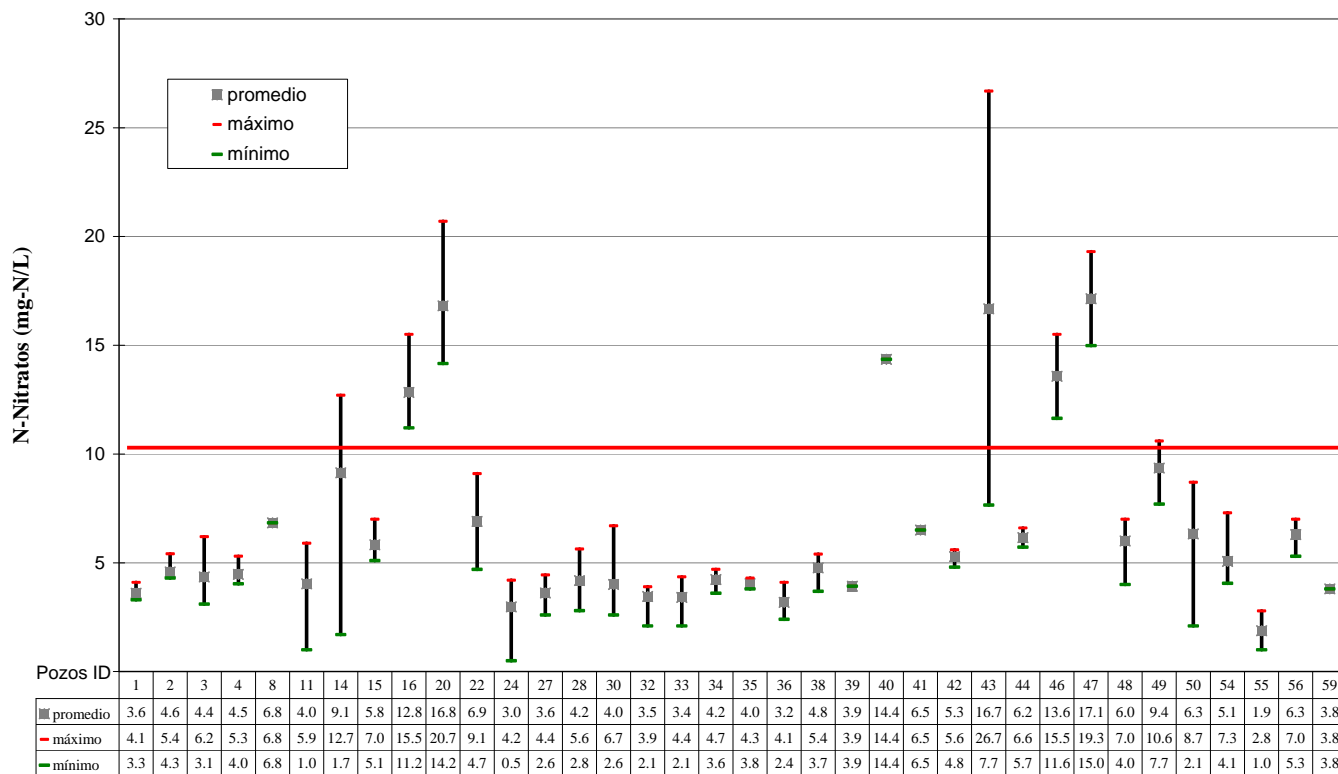


Figura N°10.4: Concentrações promedio de N-Nitratos (mg-N/L), valores mínimos y máximos medidos en pozos en el período 2009, 2010 y 2011 (sistema acuífero profundo).

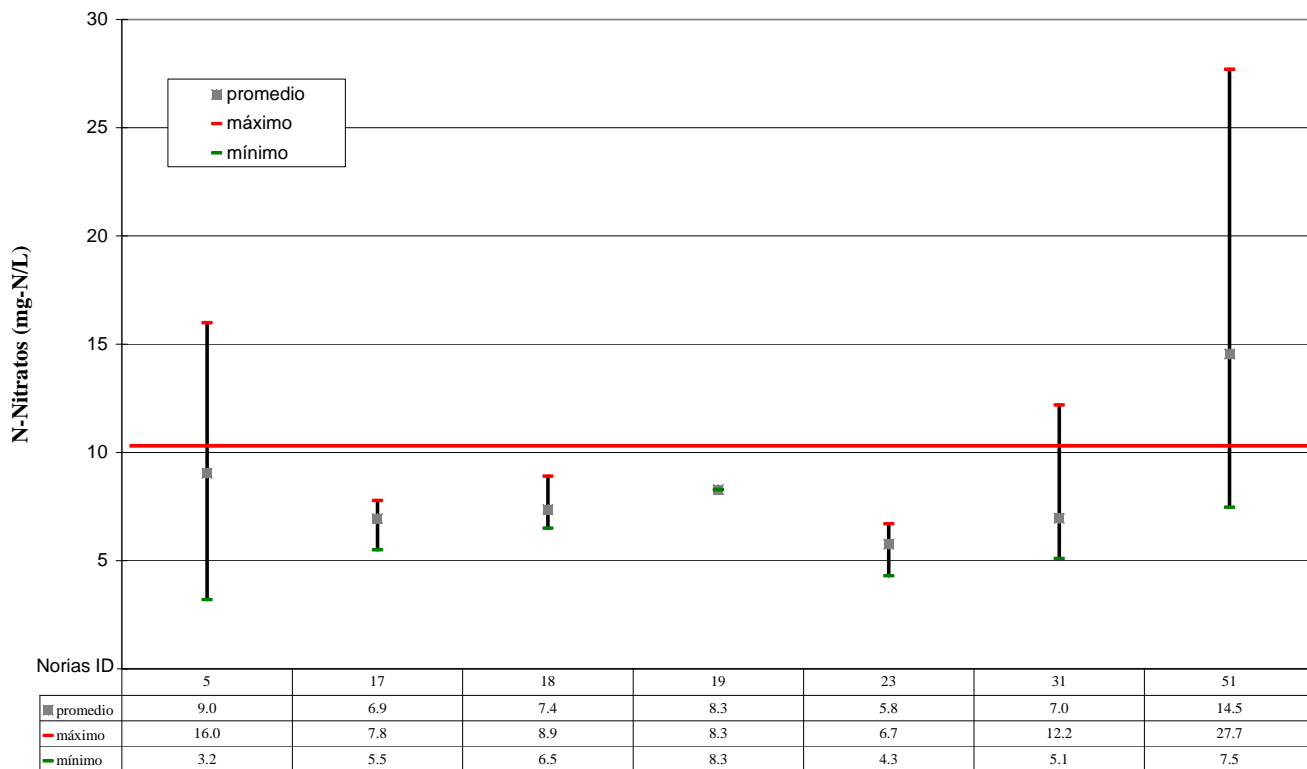
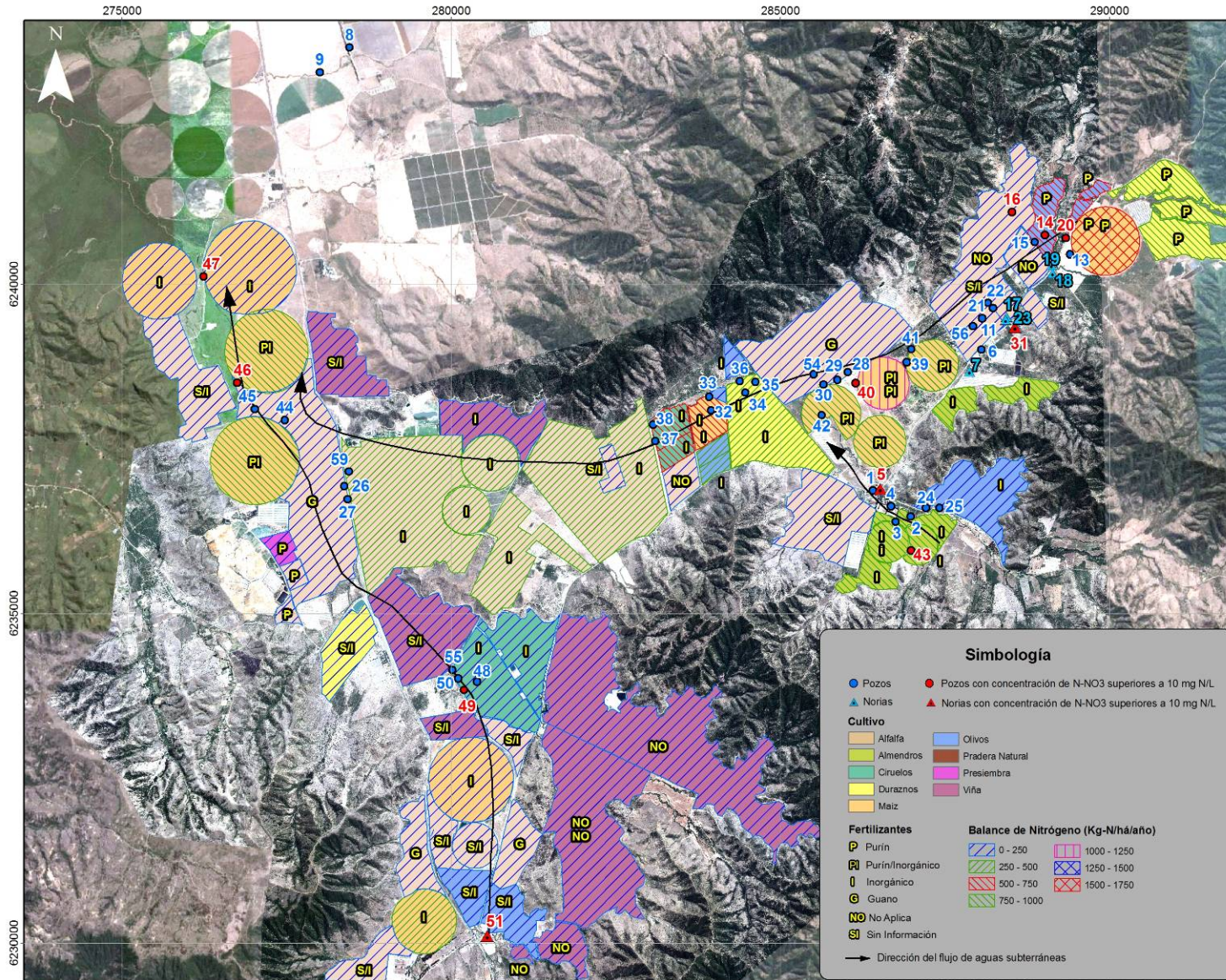


Figura N°10.5: Concentrações promedio de N-Nitratos (mg-N/L), valores mínimos y máximos medidos en norias en el período 2009, 2010 y 2011 (sistema acuífero somero).





**Figura N°10.6:** Pozos y Norias monitoreados durante el proyecto, y su entorno. Los números identifican a los pozos y norias; en rojo se destacan las norias/pozos que presentaron concentraciones de N-Nitratos superiores a 10 mg-N/L



#### **d) Niveles de N-NO<sub>3</sub> en la Columna de Suelo**

En la superficie del sector existen fuentes importantes de Nitrógeno. Sin embargo, las concentraciones de N-Nitratos en aguas de norias (acuífero somero) y de pozos (acuífero profundo) no presentan variaciones temporales importantes (estacionales e hiperanuales).

Para mejorar la comprensión de porqué esas cargas de nitrógeno en la superficie no se expresan en la calidad de las aguas subterráneas, en el último año del proyecto se realizaron mediciones en perfiles verticales del suelo para evaluar pérdidas potenciales de formas nitrogenadas (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>).

El estudio de los niveles de N-NO<sub>3</sub> en la columna de suelo (intervalo de profundidad de 0-3 m), muestra que existen zonas dentro del suelo donde hay cambios texturales abruptos que generan discontinuidades en el tamaño que poros, que afectan el movimiento del agua en profundidad (percolación profunda) y, en consecuencia, la lixiviación de N-NO<sub>3</sub> hacia la zona saturada. Luego, este último proceso está restringido y los N-NO<sub>3</sub> se acumulan sobre o dentro estas zonas de movimiento de agua lento (dentro de los primeros 3 metros de profundidad).

Los suelos, debido al alto contenido de arcillas, tiene una alta capacidad de absorción (inmovilización) del nitrógeno, probablemente como amonio, lo cual impide el transporte de amonio y su transformación en nitrato a niveles más profundos en el suelo. Por otro lado, dado el espesor de las capas de arcilla y su baja permeabilidad, es posible que el nitrato sea atenuado por el proceso de desnitrificación, que es la transformación de nitrato en nitrógeno gas.

#### **e) Marca Química**

La “marca química” de los purines y la “marca química” de las aguas subterráneas naturales, son claramente diferentes. No obstante, esa diferencia se pierde en el agua de riego debido a que ella corresponde a una mezcla de purines con aguas subterráneas proveniente de bombeos. Sin embargo y debido a la gran concentración de nitrógeno en los purines, el agua de aplicación de purines mantiene una concentración apreciable de N-Nitrato (28 mg-N/L), muy superior al de las aguas naturales (<10 mg-N/L).

Luego, los trazadores químicos, con la excepción del N-Nitrato, no son buenos indicadores para evaluar el aporte de nitrato de purines al agua subterránea en el sector de San Pedro.

#### **f) Marca Isotópica**

Los purines de cerdo, por ser almacenados en lagunas previo a su disposición en sectores de cultivos, presentan una marca isotópica ( $\delta^{15}\text{N}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , ambos de NO<sub>3</sub>) más enriquecida que las otras potenciales fuentes de nitratos.

La relación  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  versus  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  muestra que el proceso de desnitrificación no es significativo en la atenuación de N-Nitratos en este sector, lo cual se refuerza por los resultados obtenidos de las mediciones de Oxígeno Disuelto, con valores superiores a 2 mg/l en los pozos y norias, lo que indica que no existen condiciones reductoras que propicien el proceso de

desnitrificación. Por lo tanto, las aguas subterráneas que presenten altas concentraciones de N-Nitratos y valores más enriquecidos en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ , están mostrando influencia de una fuente enriquecida en  $^{15}\text{N}$  y en nitratos.

Por los datos de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ , se puede concluir que el N-Nitrato presente es formado por nitrificación de amonio y no hay una influencia directa de fertilizantes inorgánicos tipo nitrato de sodio, los cuales presentan valores de  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$  mucho más enriquecidos. El amonio puede provenir de fertilizantes como urea, de purines, de guano y de aguas servidas.

### g) Seguimiento de las “Marcas Isotópica y Química” en las Aguas Subterráneas

El seguimiento de las “marcas” (de las potenciales fuentes de N-Nitratos) en las aguas subterráneas se efectúa en la dirección del flujo principal. Para facilitar el seguimiento de la interpretación efectuada, el Sector San Pedro es subdividido en:

- Microcuenca Este, donde el flujo principal es de Este a Oeste.
- Microcuenca Sur. El flujo de las aguas subterráneas es de Sur a Norte.
- Confluencia de las microcuencas anteriores y salida del Sector (flujo de Sur a Norte).

#### ◆ Microcuenca Este:

**Sector Nor-Este** (cabecera de la microcuenca):

- En la cabecera de la microcuenca, los pozos 14, 20 y la noria 19 (ver **Figura N°10.6**), presentan los valores más enriquecidos en  $^{15}\text{N}$  en la cuenca (+13,6 y +15,2 ‰). Los pozos presentan concentraciones promedios de N-Nitratos entre 9 y 17 mg-N/L y la noria en torno a 8 mg-N/L. Esos valores pueden ser explicados por el aporte de una fuente enriquecida en  $^{15}\text{N}$  y en nitratos. Entre las fuentes posibles, se encuentran residuos domésticos ( $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ : 7 a 20 ‰) y purines a la salida a riego ( $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ : 11 a 23‰).

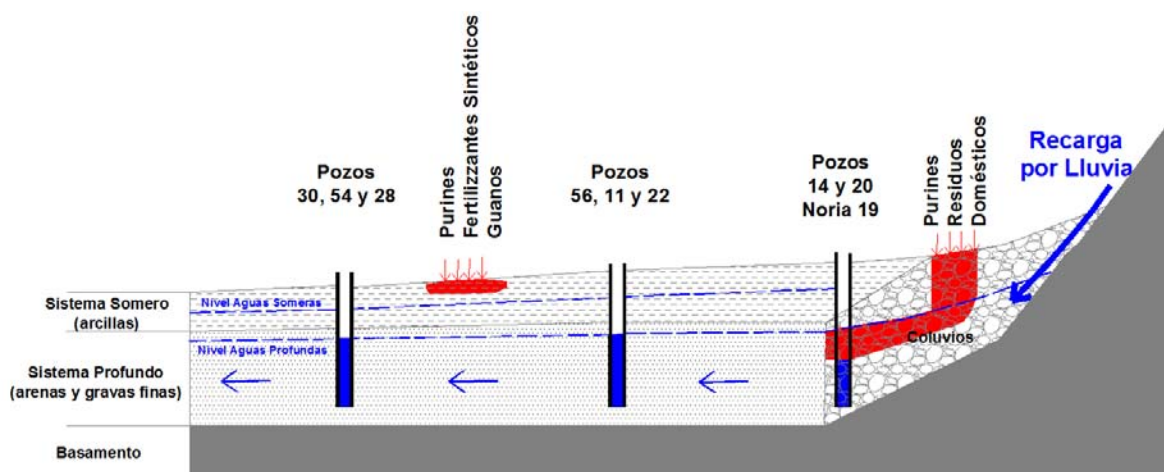
Los pozos 14 y 20 se ubican cercanos a un área de aplicación de purines y lejos de otras fuentes potenciales de nitrógeno como residuos domésticos. Además, la zona de aplicación de purines corresponde a una zona de sedimentos coluviales, donde la tasa de infiltración es alta y mucho mayor que en la capa de arcilla que protege el resto del acuífero en la cuenca.

Es importante destacar que en la zona de cabecera también hay aguas (pozo 52) que se caracterizan por concentraciones de N-Nitratos del orden de 5 mgN/L y valores de 9,0 ‰ en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ . La muestra 52 representa una mezcla de agua que son bombeadas de los pozos 5, 6 y 7 en el Fundo Sta. Beatriz. Este comportamiento tiene que estar asociado a la complejidad geológica del acuífero y a la ubicación (profundidad) de las rejillas de los pozos (que es por donde ingresa el agua al pozo). Estos nitratos también pueden estar asociados a actividad agrícola histórica con anterioridad a la actividad porcina en la zona.

- En este mismo sector y siguiendo la dirección del flujo de las aguas subterráneas, aguas abajo se encuentran los pozos 56, 11, y 22 (ver **Figura N°10.6**), los cuales presentan concentraciones de N-Nitratos en torno a 5 mg N/L. No existen datos isotópicos

disponibles para estas aguas. No obstante, es posible observar que no llegan a estos pozos las concentraciones relativamente altas de N-Nitrato medidas en la cabecera de la microcuenca (y que pueden ser asociadas a la actividad de riego con purines). Entonces, el efecto observado en las proximidades de los pozos 14 y 20 (cabecera de la microcuenca) no tienen efecto a una escala más regional (no se observan en los pozos 56, 11 y 22 ubicados aguas abajo de los pozos 14 y 20).

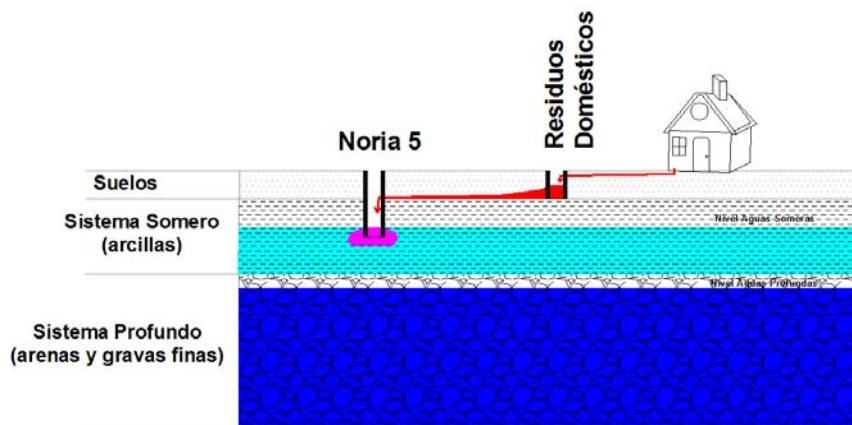
- Continuando hacia aguas abajo en la dirección del flujo subterráneo, se observa que la zona del valle representada por los pozos 30, 54 y 28 (ver **Figura N°10.6**), se caracteriza por valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  alrededor de 7,7 ‰, asociadas a concentraciones de N-nitratos entre 4 y 5,6 mgN/L. Estos pozos están localizados en áreas con aplicación de guanos y contiguos a zonas de riego con aplicación purines/fertilizantes sintéticos. Los valores N-nitrato evidencian que el aporte de nitrógeno hacia al acuífero es bajo. Se presume que lo anterior se origina por el control que produce la capa de arcilla que se desarrolla en la parte central de la cuenca, la cual protege al acuífero profundo allí existente. Por otro lado, los valores isotópicos están dentro de un rango acorde con la aplicación de guanos en el área y de fertilizantes inorgánicos afectados por volatilización, descartándose la influencia de purines.



**Figura N°10.7:** Esquema conceptual de los procesos observados en el Sector Nor-Este de la Microcuenca Este del Sector Piloto de San Pedro. En el sector de cabecera, donde se presentan sedimentos coluviales (más gruesos que en el resto del área), se observa efecto de las fuentes superficiales de Nitrógeno en la calidad de las aguas subterráneas. En el resto del área, la capa de arcillas protege al acuífero profundo.

#### Aporte Sur-Este:

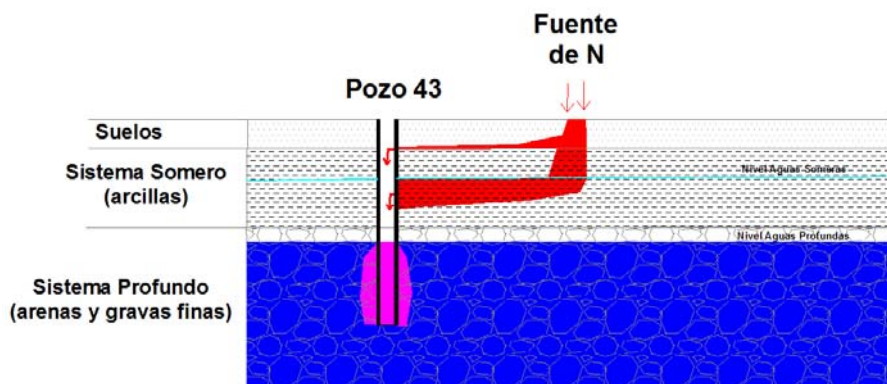
- La noria 5 (ver **Figura N°10.6**), localizada hacia el SurEste de los pozos anteriores, presenta concentraciones altas de N-Nitratos (entre 8,9 a 15,9 mg-N/L) y valores enriquecidos en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  (entre 12,8 y 14,5 ‰). Algunas líneas de evidencia indican que la fuente de nitrógeno en esta noria estaría asociada a residuos domésticos: la noria está ubicada en la pequeña estancia Santa Rosa (al lado de un almacén y un colegio), estas aguas tienen relativamente altas concentraciones de sulfatos y cloruros y las zonas de aplicación de purines y/o fertilizantes inorgánicos se encuentran relativamente lejos de la noria y es muy poco probable que el nitrato haya viajado lateralmente por la capa de arcilla.



**Figura N°10.8:** Esquema conceptual de los procesos observados en la Noria-5. La fuente de nitrógeno en esta noria estaría asociada a residuos domésticos.

- Aguas arriba de la noria-5, en este sector Sur-Este, fueron monitoreados los pozos 3, 2, 1 y 4 (ver **Figura N°10.6**). Sus aguas se caracterizan por valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  en un rango de 5,8 y 8,2 ‰ y concentraciones bajas de N-nitratos, entre 3,1 y 4,3 mgN/L. Estos pozos se ubican en una zona donde se utiliza fertilizante inorgánico.
- En este mismo sector y aguas arriba de los pozos anteriores (3, 2, 1 y 4), se ubica el pozo 43 (ver **Figura N°10.6**), el cual presenta valores relativamente enriquecidos de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  (= 10,8 ‰). El agua de este pozo se caracteriza por altas concentraciones de N-Nitratos, fluctuando entre 7,7 y 26 mgN/L en las distintas mediciones efectuadas. No es posible que los purines sean la fuente de nitrato de este pozo, pues no hay aplicaciones de ellos actualmente y no han sido aplicados históricamente en este sector. Luego, el enriquecimiento en los valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  puede estar asociado a una volatilización de urea entre su aplicación y su infiltración en el suelo o a una fuente que no ha sido identificada. Presenta variaciones en las concentraciones de N-nitrato, las cuales responderían a cambios en las actividades en la superficie, específicamente a la aplicación estacional de fertilizantes inorgánicos. Los valores fluctuantes de N-nitratos y la presencia de Tritio en esta agua sugieren la existencia de una comunicación entre la parte superficial correspondiente a un área de cultivos (que se debería caracterizar por concentraciones altas de N-nitrato) y el acuífero a través del pozo, debido a una mala construcción del mismo.





**Figura N°10.9:** Esquema conceptual de los procesos observados en el Pozo 43. Los valores fluctuantes de N-Nitratos (entre 7,7 y 26 mgN/L) y la presencia de Tritio en estas aguas, sugiere la existencia de comunicación con la superficie debido a una mala construcción del pozo.

### Confluencia de los Sectores Nor-Este con el Aporte Sur-Este:

- Siguiendo el sistema de flujo del agua subterránea, se monitorearon una serie de pozos (pozos 32, 33, 34, 35, 36, 37 y 38) ubicados en el valle y aguas abajo (en la dirección del flujo subterráneo) de todos los pozos antes mencionados (ver **Figura N°10.6**), correspondiente al sector de confluencia de los flujos de aguas subterráneas provenientes del sector de cabecera con los aportes del sector Sur-Este. Las aguas en estos pozos se caracterizan por valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  entre 5,6 y 8,7 ‰ y bajas concentraciones de N-Nitratos (entre 3,7 y 4,8 mg-N/l). Estos pozos están localizados en zonas de cultivos con aplicación de fertilizantes sintéticos; luego, los valores isotópicos obtenidos en esta zona representarían los nitratos asociados al uso de fertilizantes sintéticos como la urea, que por el proceso de volatilización en la zona de riego enriquece su contenido de  $^{15}\text{N}$  en comparación al de la urea original.

### • Microcuenca Sur:

- En la cabecera de la Microcuenca Sur se ubica la noria 51 (ver **Figura N°10.6**), cuyas aguas se caracterizan por una concentración relativamente alta de N-nitrato (8 mgN/L) y una composición isotópica  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  de 10,6 ‰. La marca isotópica relativamente enriquecida muestra que la fuente probable de N-nitrato corresponde a residuos domésticos (considerando que está ubicada en una pequeña estancia de la zona, ver **Figura N°10.8**). Asimismo, se observa que los suelos del sector de la noria presentan permeabilidad de moderada a alta, lo cual facilita los escurrimientos hacia ella.

Aguas abajo de la noria 51, siguiendo la dirección del flujo de las aguas subterráneas que en este sector es de Sur a Norte, se han monitoreado varios pozos (48, 49, 50 y 55 - Sta. Raquel-, ver **Figura N°10.6**). Sus aguas se caracterizan por concentraciones de N-nitratos entre 1,9 a 10 mgN/L, con un rango de valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  entre 5,9 y 7,6 ‰. Se infiere que la fuente principal de nitratos correspondería a fertilizantes inorgánicos que se usan preferentemente en esta zona. Estos pozos se ubican en zonas con suelos de moderada a alta permeabilidad.

### ◆ **Confluencia Microcuencas Este y Sur:**

- En la zona de confluencia de los sistemas de flujos de aguas subterráneas provenientes de las microcuencas Este y Sur, se encuentran los pozos 26, 27 y 59 (ver **Figura N°10.6**). Los pozos 27 y 59 se caracterizan por presentar bajas concentraciones de N-nitratos (3,8-4,4 mgN/L) y un valor de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  entre 9,4 a 10,0 ‰. En esta zona la fuente principal de nitratos es la aplicación de fertilizantes sintéticos más un aporte de nitratos que llegarían con los flujos de aguas subterráneas de las microcuencas ubicadas aguas arriba de estos pozos.
- Finalmente, a la salida del Sector en estudio existen 2 pozos con concentraciones de N-nitratos mayores que 10 mgN/L (pozos 46 y 47, ver **Figura N°10.6**). En estos pozos no se pudo tomar muestras para análisis isotópicos; sin embargo, dada su ubicación cercana a zonas con aplicación de purines, sumado a que las altas concentración de N-nitratos en estos pozos se contraponen con los contenidos de N-nitrato observados en aguas subterráneas localizadas aguas arriba de esta zona (cuyas concentraciones son más bajas), indicaría que la fuente de nitrógeno más probable son los purines aplicados en el área. Se observa que en esta zona los suelos presentan moderada a alta permeabilidad, lo cual explicaría la existencia de flujos hacia estos pozos.

### **h) Visión General del Sector San Pedro**

No obstante el intenso aprovechamiento de la superficie del terreno con fuentes nitrogenadas, las mediciones de N-Nitratos en el sistema profundo de aguas subterráneas muestra que su nivel basal es de aproximadamente 5 mgN/L, con concentraciones normalmente bajo 10 mgN/L. Las aguas de este sistema profundo son las aprovechadas en la cuenca. Sólo en casos específicos se observan concentraciones mayores:

- Pozos 14, 16 y 20, en Microcuenca Este, originado por la existencia de fuentes de nitrógeno en el sector de recarga del sistema acuífero, donde el relleno sedimentario presenta una granulometría más gruesa (sedimentos coluviales, que favorecen el flujo vertical de aguas),
- Pozo 43, también en la Microcuenca Este, sector de aportes Sur-Este. Los datos sugieren que existe flujo de aguas desde la superficie hacia el acuífero, lo cual se produce por el pozo debido a una deficiente construcción (sellado) del mismo.
- Pozos 46 y 47, en el sector de salida del Sector Piloto en estudio. La fuente de nitrógeno más probable son los purines y fertilizantes inorgánicos aplicados en el sector de estos pozos, ya que no se observan concentraciones importantes de N-Nitratos provenientes desde aguas arriba con el flujo de aguas subterráneas. En este sector de salida, los suelos (superficial, primeros metros del relleno) presentan moderada a alta permeabilidad, lo cual favorece la existencia de flujos desde la superficie hacia esos pozos.

El bajo efecto de las actividades en superficie sobre la calidad de las aguas subterráneas profundas se explica por la existencia de una unidad hidrogeológica (superficial) compuesta principalmente por arcillas, de muy baja permeabilidad hidráulica, la cual prácticamente tiende a aislar al sistema acuífero profundo de las actividades en superficie. Esa *capa* tiene un espesor

que varía entre 4 y 45 metros en el sector en evaluación, según el valle asociado a cada estero principal. El estudio de suelos, que muestra una baja a nula concentración de nitratos a una profundidad de 3 metros, confirma el rol de las *capas* de baja permeabilidad en la atenuación del transporte de nitrógeno hacia el acuífero. La “protección” de las *capas* de baja permeabilidad al sistema profundo, también es confirmada con las mediciones de Tritio, las cuales muestran que sus aguas han perdido contacto con la superficie desde un largo período de tiempo (más de 15 años). La recarga de las aguas del sistema profundo se produce en la cabecera de la cuenca, donde están presente los materiales de mayor permeabilidad; en el resto del área, el acuífero profundo está cubierto por capas de arcilla de baja permeabilidad.

Las mediciones de nivel de las aguas subterráneas muestran que además existe un sistema superficial, el cual se desarrolla en la unidad de baja permeabilidad y cuya recarga de agua son las precipitaciones y el agua de riego. En el período estival sus niveles descienden, lo cual deja a las norias sin agua. Por ese motivo, existen (se identificaron) pocas norias en el sector cuyas aguas sean aprovechadas. De las 7 norias monitoreadas, en 5 de ellas las aguas muestran concentraciones de N-Nitratos entre 5 y 10 mgN/L. En 2 de ellas, norias 5 y 51, se observan concentraciones mayores a 10 mgN/L. En ambos casos la marca isotópica relativamente enriquecida muestra que la fuente probable de N-nitrato corresponde a residuos domésticos. Ambas están ubicadas en pequeñas estancias y en suelos (superficial, primeros metros del relleno) que presentan permeabilidad de moderada a alta, lo cual facilita los escurrimientos horizontales hacia ellas.

## 10.2 SECTOR PICHIDEGUA

A continuación se presenta una síntesis de los principales resultados del proyecto obtenidos para el sector Pichidegua.

### a) Fuentes Potenciales de Nitratos

En **Tabla N°10.2** se resume la comparación entre las diferentes fuentes potenciales existentes en el sector y en **Figura N°10.10** se muestra su distribución espacial

La aplicación de fertilizantes sintéticos en la superficie del terreno es la principal fuente potencial de N-Nitratos en este sector (84%), seguido por la aplicación de purines (14%). El aporte de Nitrógeno asociado a los sólidos (2%) es muy inferior respecto de las otras fuentes existentes en este sector del proyecto.

**Tabla N°10.2:** Comparación de los Aportes de Nitrógeno de Fuentes Potenciales Identificadas en el sector Pichidegua – temporada 2008/09.

Tipo de Fertilizante Aplicado	Superficie Aplicación (há)	% Superficie c/r al Área Total del Sector	Aporte de Nitrógeno (Kg-N/año)	% Nitrógeno c/r al Total Aplicado
Inorgánicos	2.923	81,3	1.191.645	84
Purines	463,7	12,9	192.377	14
Guanos	51,5	1,4	32.767	2
Zonas Sin Aplicación	40	1,1	-	
Zonas Sin Información (*)	119	3,3	Sin Información	
Total	3.597,2	100	1.416.789	100

(\*) No se contó con la colaboración y entrega de la información por parte de los dueños de los predios.



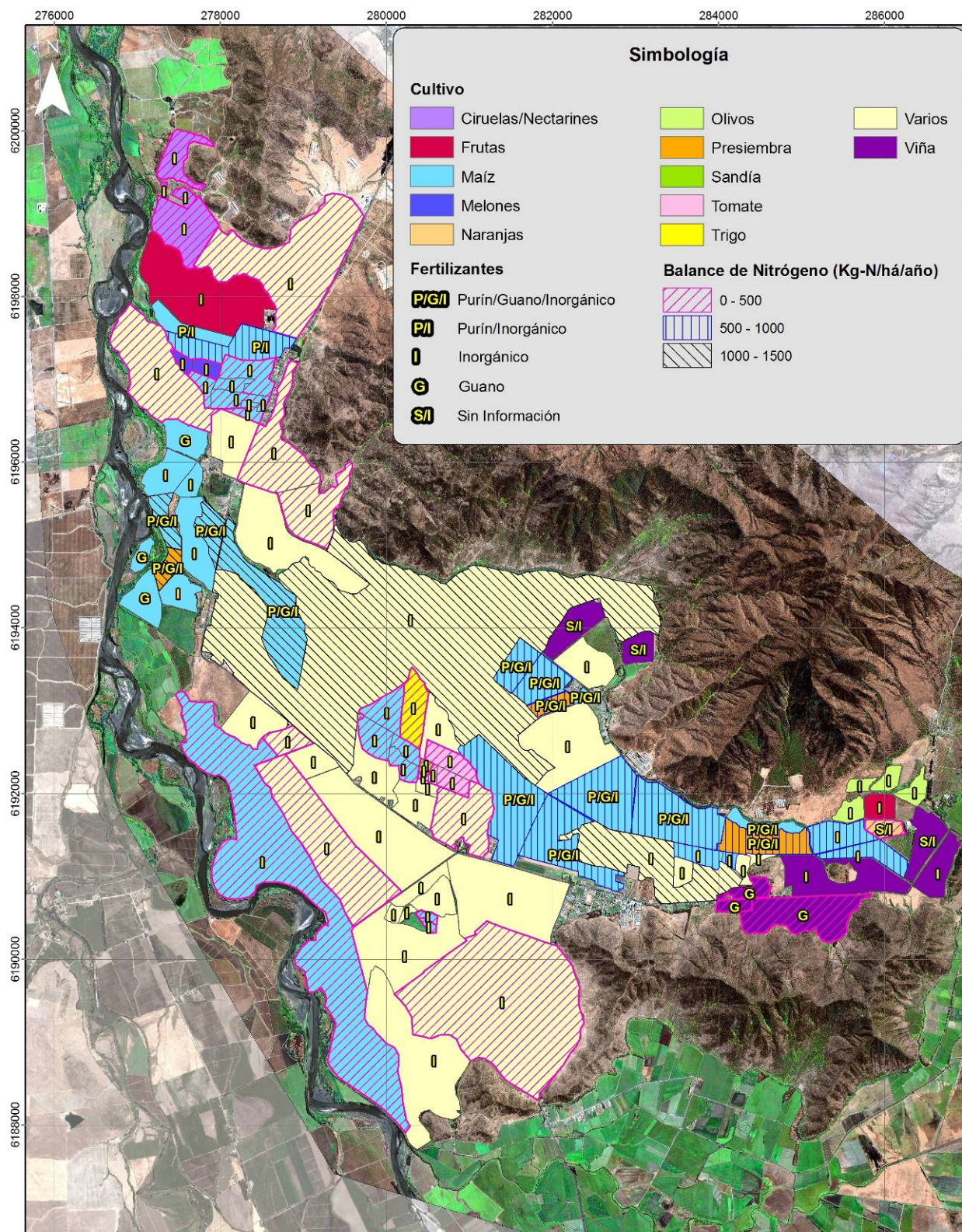


Figura N°10.10: Cultivos y fertilizantes aplicados en sector Pichidegua



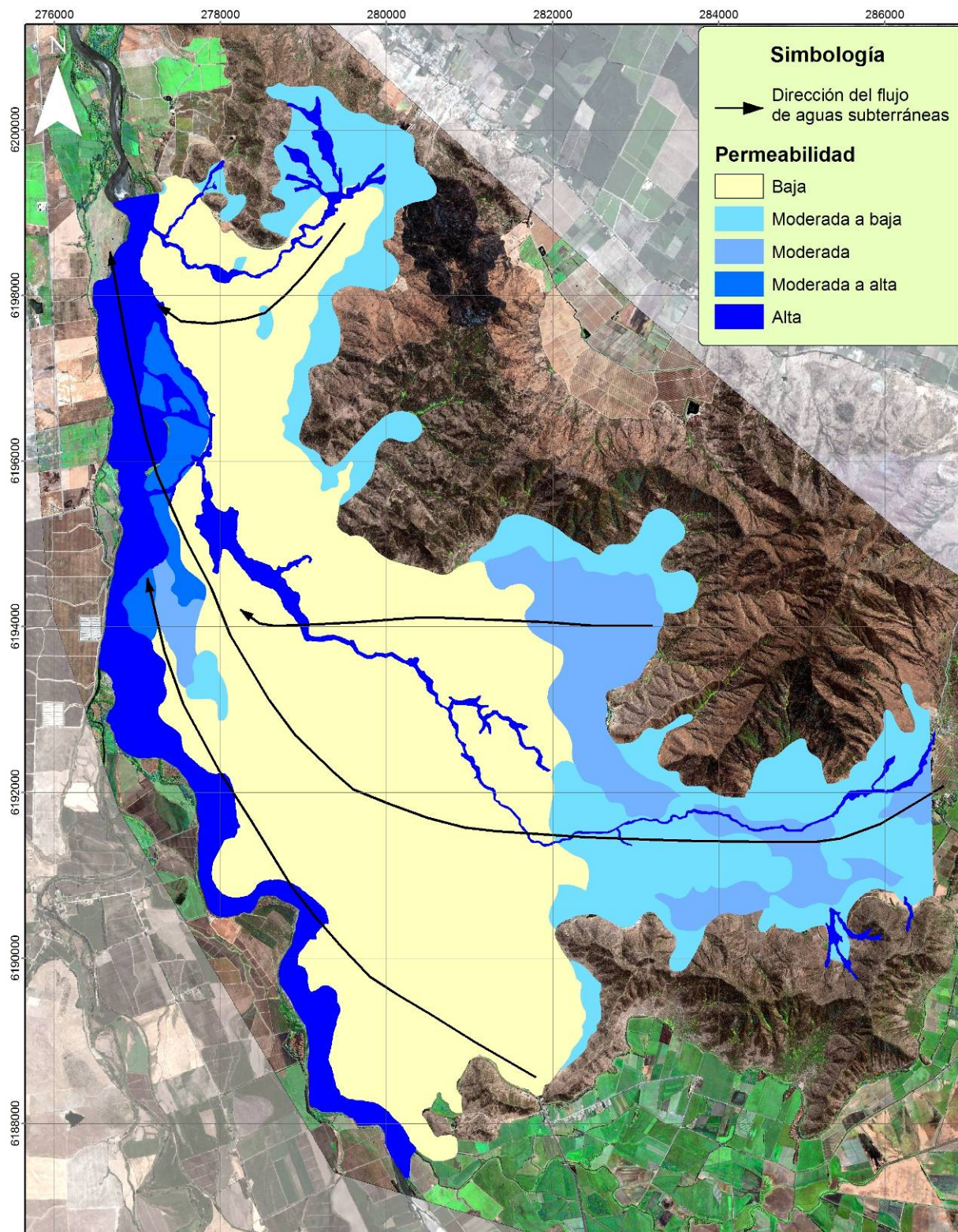


Figura N°10.11: Permeabilidad del suelo (superficial, primeros metros del relleno sedimentario).

## **b) Caracterización del Sistema Hidrogeológico**

En superficie, los suelos presentan en general permeabilidades de baja a moderada (ver **Figura N°10.11**). Sólo en los cauces superficiales naturales se observan altas permeabilidades hidráulicas.

En subsuperficie se observan dos sectores hidrogeológicos (ver **Figura N°10.13a**): **(a)** en el valle del río Tinguiririca (borde Oeste del área en estudio) se desarrolla un acuífero del tipo libre, en una Unidad Hidrogeológica conformada por los depósitos fluvio-aluvionales asociados a cauces antiguos del río Tinguiririca, y **(b)** hacia el sector de la rinconada (sector Centro y Este del área en estudio) se presenta un acuífero profundo confinado desarrollado en la Unidad Hidrogeológica conformada por arena fina limosa (el cual corresponde al acuífero propiamente tal), en donde la unidad confinante (acuitardo) correspondería a un estrato de ceniza ahí existente.

Respecto a las aguas subterráneas, se observa que la profundidad de la napa freática se ubica entre 0,6 a 9,2 m de profundidad en las norias (sistema somero) y entre 0,8 a 7,6 m de profundidad en los pozos (sistema profundo). De acuerdo a los gradientes hidráulicos verticales, existe una posibilidad de traspaso de agua del sistema somero al profundo, pero su magnitud está limitada por las bajas permeabilidades del estrato de cenizas. En la **Figura N°10.12** se presentan las direcciones de flujo por el sistema acuífero de mayor permeabilidad. Se observa que el flujo principal de las aguas subterráneas presenta una dirección paralela al río Tinguiririca, incorporándose a ese flujo los aportes de agua provenientes desde las quebradas del sector Este del Sector Piloto en estudio.

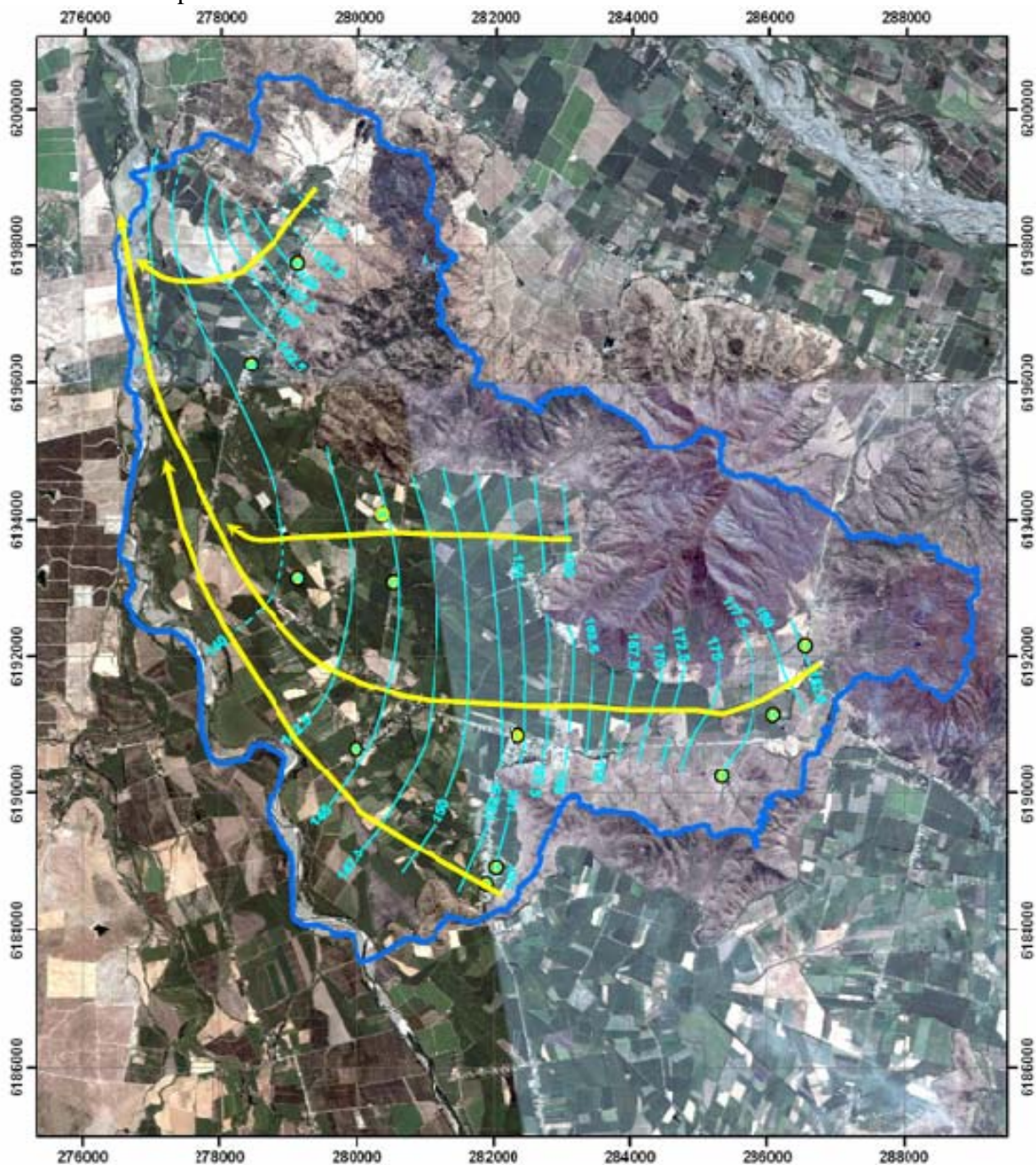
Las mediciones de isótopos estables del agua ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) muestran que el origen de las aguas subterráneas del acuífero profundo es diferente a las del sistema somero (acuitardo). El origen de estas aguas está asociado a:

- Aguas de recarga local (aguas provenientes de precipitaciones en el mismo sector del proyecto, más enriquecidas, más positivas, en los isótopos estables del agua), las cuales se observan en el acuífero profundo (identificadas en los pozos). Estas aguas provienen de la infiltración de las aguas lluvias en el *pié de monte* (ingresan al sistema subterráneo por los depósitos coluviales).
- Aguas provenientes de percolación de los excedentes de regadío (cuya fuente son las aguas del río Tinguiririca conducidas por canales de regadío, las cuales son más empobrecidas en los isótopos estables del agua, más negativas, provenientes de altitudes mayores), las cuales se observan (recargan) en el sistema somero (en las norias).
- Se observan además pozos y norias cuyas aguas presentan marcas isotópicas intermedias, las cuales corresponden a mezclas de agua de recarga local y de percolación de los excesos de regadío (cuya fuente de abastecimiento son aguas del río Tinguiririca).

En **Figura N°10.13 (a)** y **(b)** se resume esquemáticamente el modelo conceptual de funcionamiento del sistema hidrogeológico del sector Pichidegua.



Las mediciones de Tritio en las aguas subterráneas del sector, muestran valores inferiores a 0,8 UT (menores al límite de detección analítico del laboratorio), indicando que estas aguas tienen un largo tiempo de residencia en el sistema acuífero (al menos 15 años más antiguas que las aguas del río Tinguiririca, las cuales presentan contenidos de Tritio de 1,9 UT). Lo anterior está asociado a las bajas permeabilidades de los materiales que conforman el acuífero somero (acuitardo) y a una combinación de baja permeabilidad y ubicación de las áreas de recarga en el caso del acuífero profundo.



**Figura N°10.12:** Curvas Equipotenciales (curvas celeste) y Direcciones del Flujo de las Aguas Subterráneas (líneas amarillas) del sistema acuífero del sector Pichidegua, Septiembre 2010.



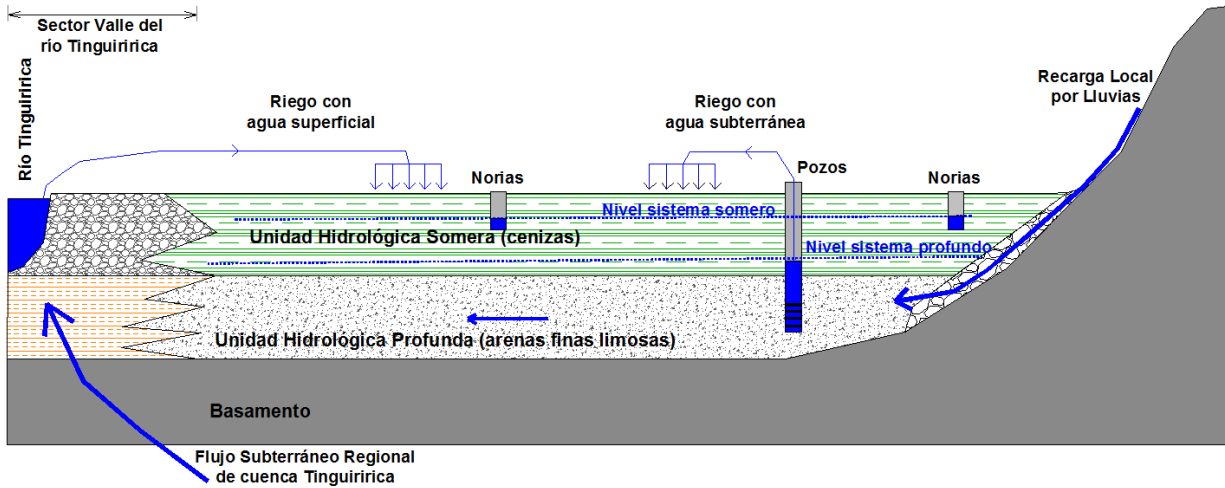


Figura N°10.13(a): Perfil longitudinal representativo esquemático del sistema hidrogeológico del sector Pichidegua.

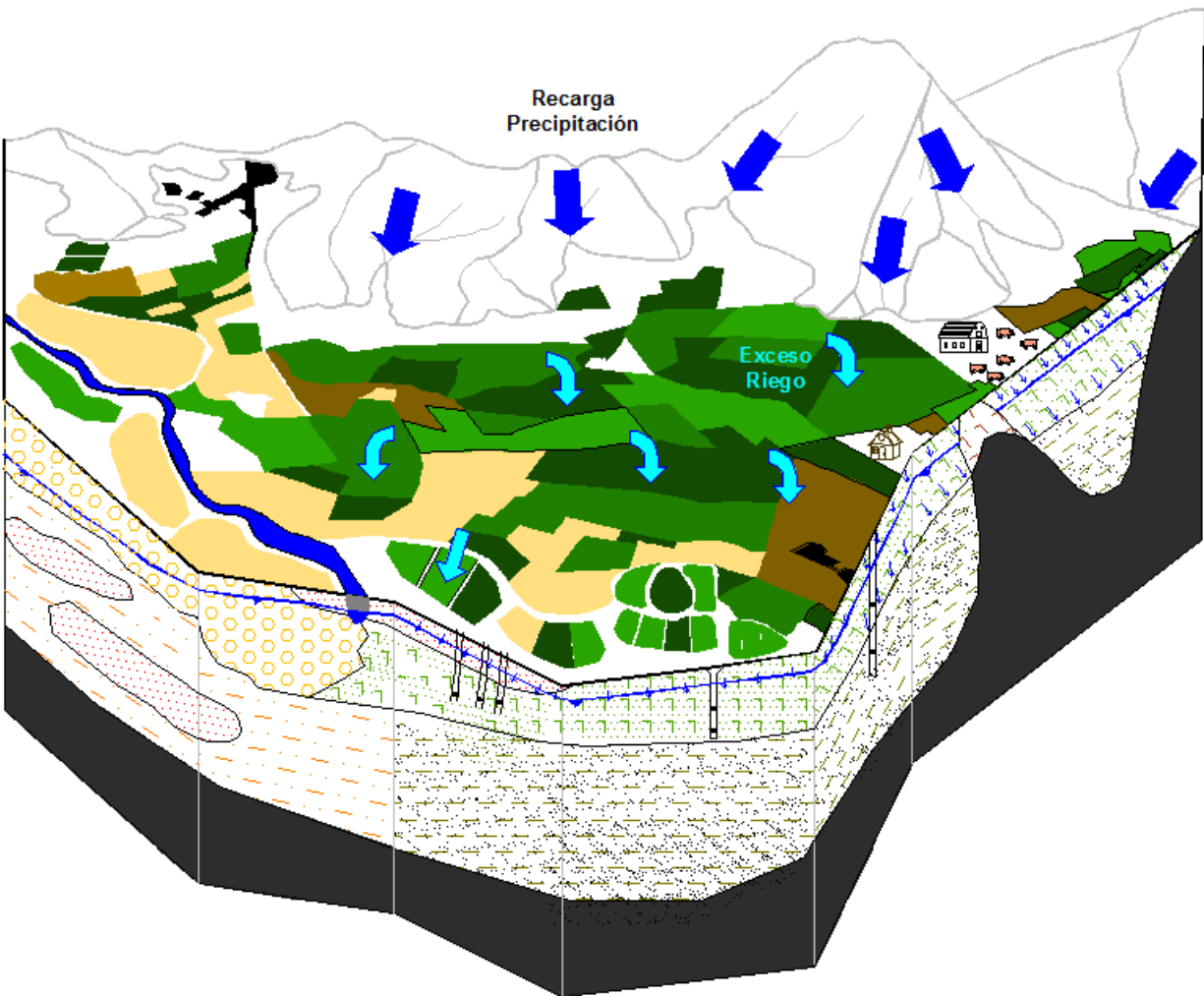


Figura N°10.13(b): Esquema conceptual del sistema hidrogeológico del sector Pichidegua.

### c) Nitratos en las Aguas Subterráneas

Las mediciones conjuntas de Nitrógeno Total y N-Nitratos, muestran que los N-Nitratos son la especie de nitrógeno predominante en el sistema acuífero (somero y profundo).

El efecto de las actividades agrícolas en la superficie del terreno (aplicación de fertilizantes, purines, guanos, etc) sobre los contenidos de N-Nitratos en las aguas subterráneas, que sobrepase el límite permisible de nitrato de 10 mgN/L, se observa sólo puntualmente en algunas norias (con altos contenidos de N-Nitratos), lo cual no se extiende a nivel regional en el sector del proyecto. Las aguas subterráneas profundas (medidas en pozos) muestran consistentemente concentraciones de N-NO<sub>3</sub> inferiores a 10 mgN/L (en todas las campañas), independiente del tipo de fertilizantes usado en la zona (inorgánico, purines o guano).

En las **Figuras N°10.14** y **N°10.15** se presentan las concentraciones promedio de N-Nitratos, junto con los valores mínimos y máximos medidos en pozos y norias respectivamente. Las mediciones efectuadas en los años 2009, 2010 y 2011 incluyen muestreos estacionales, abarcando períodos secos (previos a las lluvias) y húmedos (posterior a las lluvias). Se observa que en el sistema profundo las concentraciones de N-Nitratos son inferiores a 10 mg N/L (mayoritariamente en torno a 5 mgN/L), manteniéndose bastante estables en el período del proyecto. En el sistema somero, representado por las norias, se observa variación estacional relacionada con el regadío y la aplicación de fertilizantes, ya sea inorgánico, purines o guano.

La concentración de N-Nitratos medidos en norias es menor a 10 mg-N/L en 11 de las 16 norias monitoreadas durante el proyecto. En las 5 que superan el límite de 10 mgN/L, se observa una fuerte variabilidad estacional, lo cual es efecto de las actividades en la superficie del terreno. La zona que se visualiza con un mayor grado de afección es el definido por las norias 23, 24 y 25 (ubicadas en el sector central del área, ver **Figura N°10.16**). Las altas concentraciones de N-Nitratos en las norias 1 y 18 (ubicadas en el borde Sur del área, ver **Figura N°10.16**) están asociadas a focos específicos y no a plumas de carácter regional.

Cabe destacar que no se encontraron diferencias significativas en la concentración de N-Nitrato entre zonas donde los fertilizantes inorgánicos han sido utilizados históricamente, en comparación con zonas donde se ha aplicado solamente purines.

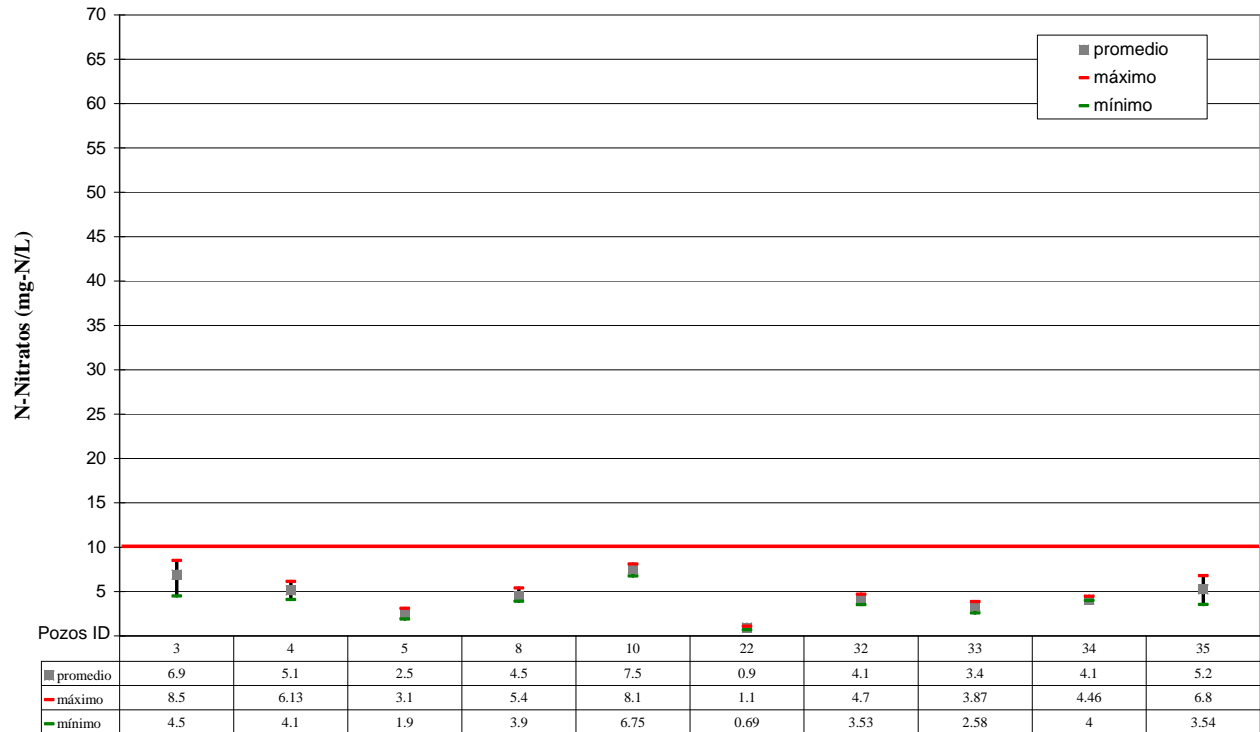


Figura N°10.14: Concentraciones promedio de N-Nitratos (mg-N/L); valores mínimos y máximos medidos en pozos en el período 2009, 2010 y 2011 (sistema acuífero profundo).

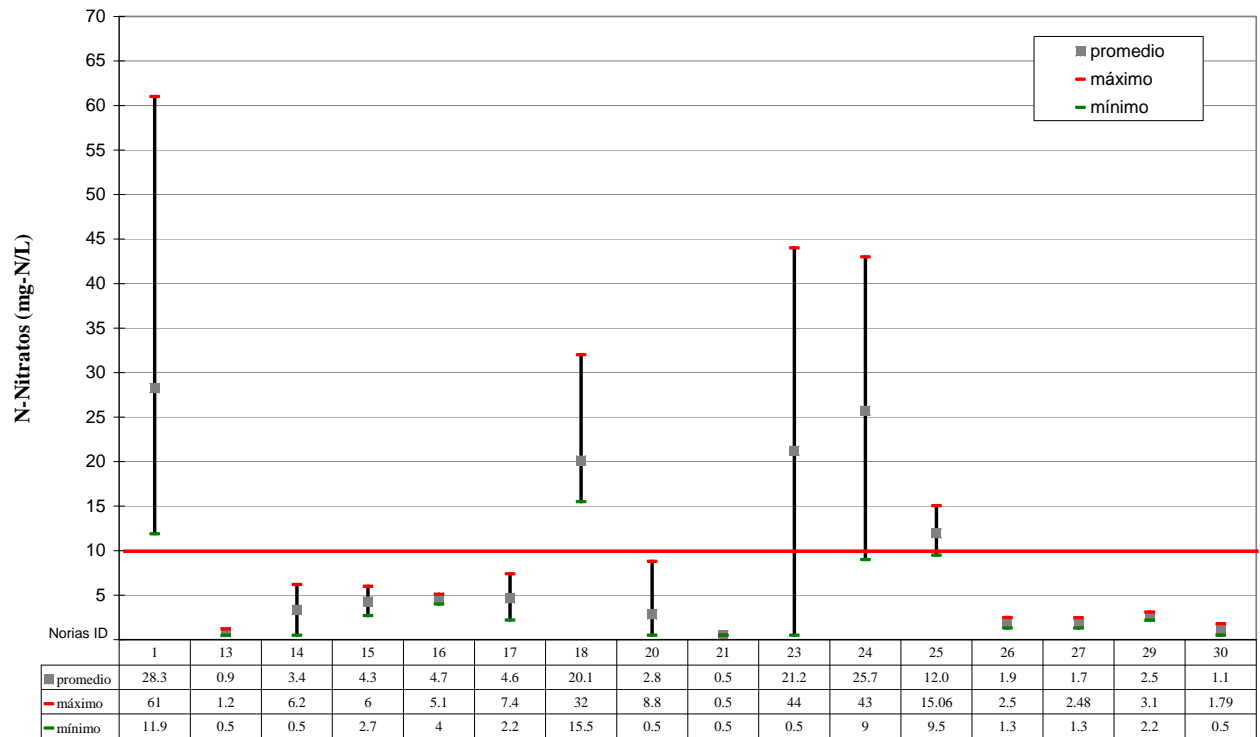


Figura N°10.15: Concentraciones promedio de N-Nitratos (mg-N/L); valores mínimos y máximos medidos en norias en el período 2009, 2010 y 2011 (sistema acuífero somero).



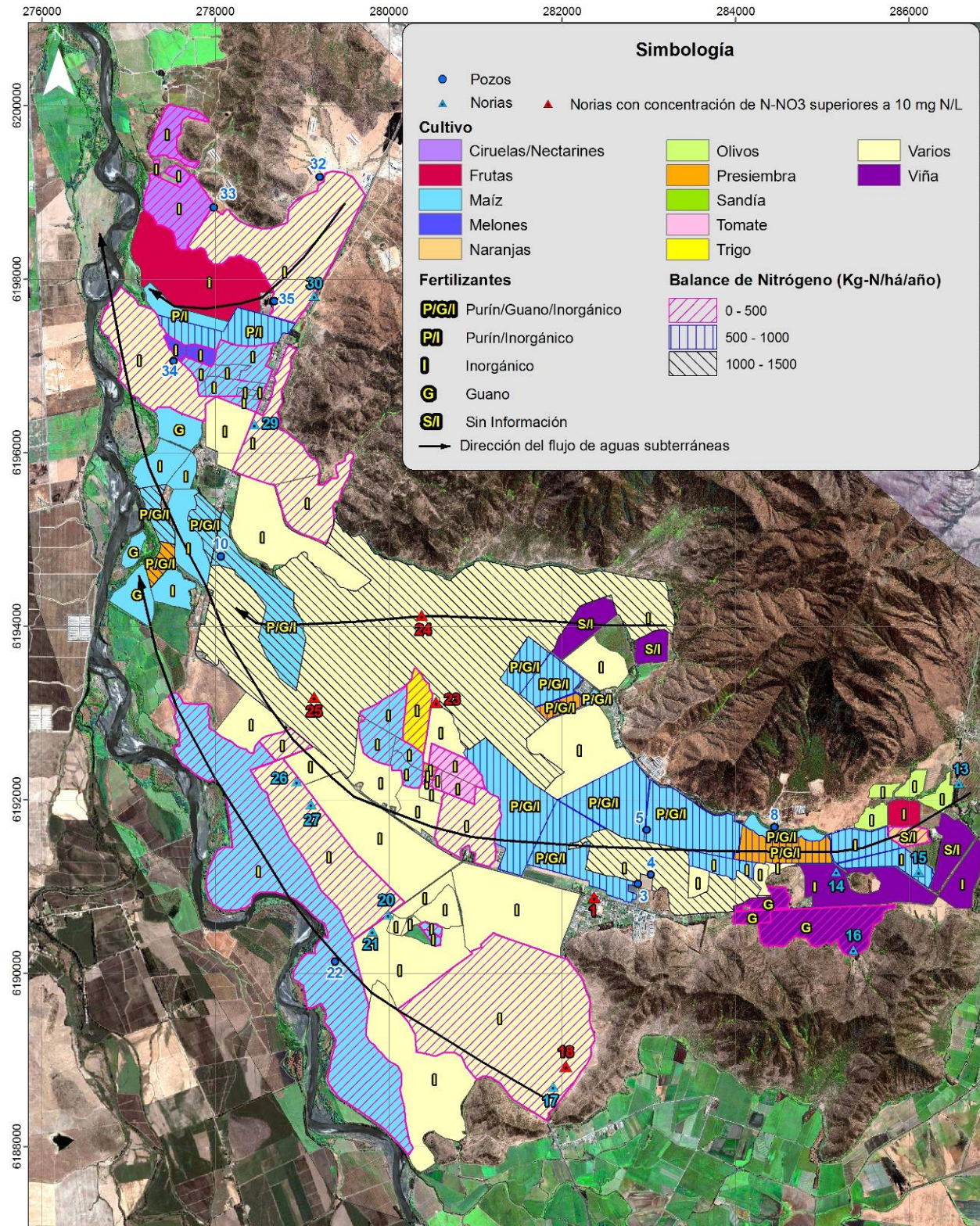


Figura N°10.16: Pozos y Norias monitoreados durante el proyecto, y su entorno. Los números identifican a los pozos y norias; en rojo se destacan las norias que presentaron concentraciones de N-Nitratos superiores a 10 mg-N/L.



#### **d) Niveles de N-NO<sub>3</sub> en la Columna de Suelo**

En la superficie del terreno existen importantes fuentes de Nitrógeno. Sin embargo, las aguas subterráneas muestran bajas concentraciones de N-Nitratos, especialmente las correspondientes al sistema profundo.

Con la finalidad de evaluar pérdidas potenciales de formas nitrogenadas (NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) en el perfil de suelo, en el último año del proyecto se realizaron mediciones (entre Abril y Octubre de 2011) en suelos de textura gruesa, cultivados con maíz y sometidos a aplicaciones de purín de cerdo la temporada anterior. Los principales resultados muestran:

- Los niveles de N-NO<sub>3</sub> en la columna de suelo (intervalo de profundidad de 0-3 m) muestran que existen zonas dentro del suelo donde hay cambios texturales abruptos que generan discontinuidades en el tamaño que poros que afectan el movimiento de agua en profundidad (percolación profunda) y en consecuencia a la lixiviación de N-NO<sub>3</sub> hacia napas subterráneas.
- Considerando las condiciones climáticas de la zona, las características de los suelos analizados y la duración del estudio (Abril-Octubre), los resultados sugieren que el amonio y/o los nitratos se estarían acumulando dentro de los 3 primeros metros de profundidad y el riesgo de lixiviación hacia napas más profundas sería bajo.
- El otro proceso que limita el transporte de nitrato en materiales de baja permeabilidad al agua subterránea, es la desnitrificación. Este proceso ocurre en condiciones anaeróbicas e implica la transformación del Nitrato (NO<sub>3</sub>) a Nitrógeno gas (N<sub>2</sub>).

#### **e) Marca Química**

Las “marcas químicas” de los purines y de las aguas subterráneas son claramente diferentes. Los purines presentan un alto contenido de Bicarbonato y de Sodio + Potasio, mientras que en las aguas subterráneas los Sulfatos cobran mayor importancia relativa (especialmente en norias).

En las norias, el contenido relativo de sulfatos y de calcio son más altos que en las aguas de los pozos. Su marca química (en aguas de norias) indica una mayor salinidad, lo cual está relacionado con el agua de recarga del acuífero somero (agua de exceso de riego, que es del tipo Ca-SO<sub>4</sub>) y a la salinización de los suelos que ocurre en zonas de irrigación en materiales de baja permeabilidad.

#### **f) Marca Isotópica**

Los resultados indican que los purines de cerdo, por ser aplicados directamente (sin almacenamiento previo), presentan una marca isotópica (<sup>15</sup>N, <sup>18</sup>O) parecida (aunque un poco más enriquecida) a las otras potenciales fuentes de nitratos. Entonces, las interferencias en las “marcas isotópicas” hacen que se uso presente limitaciones en el sector de Pichidegua. Por lo anterior, las mediciones isotópicas son analizadas en conjunto con la caracterización de las actividades en superficie, mediciones químicas y, fundamentalmente, con la información hidrogeológica.

No obstante lo anterior, los datos isotópicos muestran que la desnitrificación es un proceso que está participando en la atenuación de nitratos en el acuífero somero y profundo.

### g) Seguimiento de las “Marcas Isotópicas y Químicas” en las Aguas Subterráneas

El seguimiento de las “marcas” de las potenciales fuentes de N-Nitratos se efectúa en la dirección del flujo de las aguas subterráneas. Para facilitar el seguimiento de la interpretación efectuada, el análisis se presenta por sectores dentro de la cuenca y separado para el sistema somero y para el sistema profundo:

#### ◆ Sector Sur-Este, cabecera de la cuenca:

- **Sistema acuífero somero:** En la cabecera de esta microcuenca se ubican las **norias 13, 14, 15 y 16** (ver **Figura N°10.16**). Todas ellas presentan concentraciones de N-Nitratos menores a 5 mgN/L, concentraciones acorde con las bajas cargas de nitrógeno observadas en esta zona.

La **noria 15** se ubica en una zona donde no se aplican actualmente fertilizantes, purines o guanos. Se postula entonces que los datos de  $^{15}\text{N}$  y  $^{18}\text{O}$  de los Nitratos en la noria 15 (más enriquecidos) se pueden explicar por el proceso de desnitrificación. Los datos de isótopos estables del agua indican que sus aguas provienen del exceso de regadío que utiliza como fuente de abastecimiento al río Tinguiririca.

La **noria 16** se ubica en una zona donde se aplica guano. Los datos de  $^{15}\text{N}$  y  $^{18}\text{O}$  de los Nitratos medidos en esta noria representarían el nitrato proveniente de guano que no ha sufrido volatilización durante su permanencia en el suelo, lo que implicaría una infiltración rápida, concordante con su ubicación en una zona de alta permeabilidad (cabecera de la microcuenca, zona de *pié de monte*). El origen del agua de esta noria es de precipitación local.

Las **norias 13 y 14** se ubican en una zona de aplicación de fertilizantes sintéticos, en zonas con suelos de moderada a alta permeabilidad. No se cuenta con mediciones isotópicas. No obstante, por las características del suelo (alta permeabilidad), es probable que la aplicación de fertilizantes sea la fuente de los N-Nitratos medidos.

- **Sistema acuífero profundo:** Los **pozos 3, 4, 5 y 8** se ubican cercanos a la cabecera del sistema de flujo de la microcuenca SurOriente, aguas abajo de las norias descritas en el punto anterior, pero sus aguas corresponden al acuífero profundo (ver **Figura N°10.16**). Estas aguas se caracterizan por concentraciones de N-Nitratos entre 2,4 y 6 mgN/L. los pozos se ubican en zonas de uso de fertilizantes inorgánicos, de purines y de guano, sin observarse diferencias significativas en su composición isotópica, por lo cual su origen no queda claramente establecido. Los valores de isótopos estables del agua muestran que el origen de las aguas del sistema acuífero monitoreado en los pozos, es la precipitación local.

- **Sistema acuífero somero:** Hacia el Sur-Oeste de los pozos anteriores, también en cabecera de la microcuenca, se ubica la **noria 1** (ver **Figura N°10.16**). Sus aguas presentan elevadas concentraciones de N-Nitratos, con valores de  $28,3 \pm 18,5$  mgN/L. Se ubica en la zona de San Roberto (poblado), donde no existe aplicación directa de fertilizantes nitrogenados; sin embargo, se encuentra aguas abajo de un sector de aplicación de purines. Respecto al origen de los nitratos, las mediciones isotópicas muestran la influencia de los purines y guano, proveniente de una zona que está siendo recargada principalmente por agua de exceso de riego proveniente del río Tinguiririca. El valor isotópicamente más enriquecido de este nitrato en comparación a los purines y guanos frescos, indicaría que la urea en estas fuentes es afectada por volatilización durante su permanencia en la zona de riego. Por otra parte, la gran diferencia en concentración de N-Nitratos en sus aguas indica que existe una fuente de nitratos próxima a la noria y que está aportando estacionalmente diferentes concentraciones de N-Nitrato (probablemente asociados al riego).

#### ◆ **Sector Sur, cabecera de la cuenca.**

- **Sistema acuífero somero:** Las **norias 17 y 18** se ubican en la cabecera de la parte Sur del sector en estudio (ver **Figura N°10.16**). Entre ellas muestran una gran diferencia en sus concentraciones de N-Nitratos (valores promedio de 4,6 y 20,1 mgN/L, respectivamente), pero isotópicamente son muy similares. Ambas se ubican en un área de uso de fertilizantes sintéticos; luego, los valores isotópicos tendrían que estar asociados a volatilización de la urea y no se puede descartar la influencia de desnitrificación. El origen de sus aguas proviene del agua de riego y de precipitación local. Las diferencias en concentración de N-Nitratos están asociadas a condiciones hidrogeológicas locales.

#### ◆ **Sector Central- Sur de la cuenca:**

- **Sistema acuífero somero:** Hacia aguas abajo y al Norte de las norias 17 y 18, en el sector del río Tinguiririca, se ubican las **norias 20 y 21** (ver **Figura N°10.16**), las que presentan bajas concentraciones de N-Nitrato (en promedio menores a 5 mgN/L). No se cuentan con mediciones isotópicas en sus aguas; sin embargo, están en una zona de influencia de aplicación de fertilizantes sintéticos, lo cual es la fuente más probable de los N-Nitratos encontrados. Los suelos en esta zona corresponden a un material de moderada a baja permeabilidad, lo que explica los bajos valores en las concentraciones medidas de  $\text{N-NO}_3^-$ .
- **Sistema acuífero profundo:** En este sector, próximo y al Sur-Oeste de las norias anteriores, se ubica el **pozo 22** (ver **Figura N°10.16**), cuyas aguas también presentan bajas concentraciones de N-Nitrato (1 mgN/L) y valores de 39,6 y 13,2 ‰ para  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ , respectivamente. Estos son los valores más enriquecidos obtenidos en el área de estudio, y no concordaría con el hecho que este pozo se encuentra en un área de influencia de aplicación de fertilizantes inorgánicos, por lo que se postula que la información medida responderían al proceso de desnitrificación, que atenúa la concentración de nitratos y enriquece isotópicamente al nitrato residual. Sin embargo, este pozo muestra un valor de oxígeno disuelto de 8,4 mg/L, el cual representa aguas oxigenadas, donde no es posible que ocurra desnitrificación. Esta parte del acuífero está

alimentada principalmente por agua de precipitación. Es importante destacar que el agua de los pozos es un agua de mezcla que proviene de las rejillas colocadas a distintas profundidades. Luego, a veces es posible encontrar oxígeno en el agua ya que una parte del acuífero que esta aportando al pozo tiene oxígeno y otra parte del acuífero puede estar en condiciones anaeróbicas, y es en esas unidades es donde se produce la desnitrificación.

#### ◆ Sector Central de la cuenca

- **Sistema acuífero somero:** Al Norte del sector anterior y en el centro del área de estudio, se ubican las **norias 23, 24, 25, 26 y 27** (ver **Figura N°10.16**), las que se encuentran en una zona de uso de fertilizantes inorgánicos. En sus aguas se observa un amplio rango de variación en las concentraciones de N-Nitratos, con valores entre 2,4 a 27,6 mgN/L. Esos nitratos muestran valores entre 10 y 18,8 ‰ en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y entre 3,7 a 6,9 ‰ en  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ . Los valores más enriquecidos se pueden explicar por el efecto de desnitrificación. Los valores de isótopos estables en el agua muestra que la mayor parte de la recarga al acuífero somero en la zona central proviene del agua de exceso de riego. Todas estas norias se encuentran ubicadas en suelos con permeabilidad baja; sin embargo, al corresponder al sistema somero, ellas están mucho más afectas a las actividades en superficie y a sus variaciones temporales.

La **noria 24** presenta valores de 10 (‰  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ ) y 3,7 ‰ ( $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ ) con una concentración de N-Nitratos de 27,8 mgN/l, siendo una de las concentraciones más altas medidos en el área de estudio. Esta noria se encuentra en una zona de uso de fertilizantes, pero cercano a ella se emplaza un pequeño galpón de pollos y un canal de regadío, siendo esas las fuentes más probable de los nitratos.

#### ◆ Sector Central-Norte de la cuenca

- **Sistema acuífero profundo:** En el sector Centro-Norte del área en estudio se encuentra el **pozo 10** (ver **Figura N°10.16**), cuyas aguas se caracterizan por una concentración de N-Nitrato de 7,5 mgN/L y de 5,9 a 6,8 ‰ en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  y de 1,6 ‰ para  $\delta^{18}\text{O-NO}_3$ . Este último valor es uno de los valores más bajos en el área de estudio. El pozo se ubica en una zona de aplicación de purines y guano. Los valores de isótopos estables del agua indican que esta parte del acuífero es alimentada por agua de riego proveniente del río. Es posible que en esta zona hayan materiales de alta permeabilidad y la recarga sea relativamente rápida en la zona de riego, no siendo posible que el agua sea afectada por evaporación antes de infiltrarse. Los valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  pueden representar nitratos de purines y guano que no han sufrido volatilización en el suelo, así como también a nitratos provenientes de fertilizantes como la urea que ha sido afectada por volatilización y que entró al acuífero profundo aguas arriba de la zona de la aplicación de purines. Luego, en este caso los isótopos del  $^{15}\text{N}$  no son muy sensibles para diferenciar nitratos de fertilizantes en comparación a purines.



## ◆ Sector Norte de la cuenca

- **Sistema acuífero somero:** En la parte norte de la cuenca se ubican las **norias 29 y 30** (ver **Figura N°10.16**), las cuales están dentro de zonas con uso de fertilizantes sintéticos. Los N-Nitratos en esta zona se caracterizan por concentraciones bajas, del orden de 0,5 (noria 30) a 2,3 (noria 29) mgN/L. Los valores de isótopos estables del agua en esta zona muestran que el agua infiltrada del exceso de regadío es la fuente principal de recarga del acuífero somero. Luego el nitrato es transportado al acuífero principalmente durante el período de riego. Se destaca que estas norias se encuentran en zonas con suelos de baja permeabilidad.
- **Sistema acuífero profundo:** En la parte final del área de estudio, en la dirección del flujo de aguas subterráneas, sector Norte, se utilizan fertilizantes sintéticos. En ella se ubican los **pozos 32, 33, 34 y 35** (ver **Figura N°10.16**), cuyas aguas se caracterizan por valores de N-Nitratos entre 3,6 a 6,8 mgN/L. Los valores de los isótopos estables del agua indican que parte del agua que alimenta al acuífero profundo en esta zona proviene del agua de exceso de regadío, extraída del río Tinguiririca. En la zona del pozo 34 (más al Sur que los otros pozos), el acuífero es alimentado solamente por precipitación local. Esta zona se caracteriza por suelos de moderada a baja permeabilidad, lo que concuerda con las bajas concentraciones de N-Nitratos medidas.

## h) Visión General del Sector Pichidegua

No obstante la intensiva utilización de fuentes nitrogenadas en la superficie del terreno, las mediciones de N-Nitratos en el sistema de aguas subterráneas (tanto en el sistema somero como en el profundo), muestra bajas concentraciones: en el entorno de 5 mg-N/L, normalmente bajo los 10 mg-N/L.

En el sistema acuífero somero, compuesto por arena fina limosa inmersa en matriz de ceniza, con un espesor reconocido de hasta 23 m y una permeabilidad hidráulica baja, se monitorearon sus aguas en un total de 16 norias, encontrándose concentraciones de N-Nitratos mayores a 10 mg-N/L sólo en 5 de ellas (norias N°1 y 18 en cabecera Sur de la cuenca y norias N°23, 24 y 25 en el sector central de la cuenca). En esas 5 norias se observa además una significativa variación estacional, lo cual muestra que existe una fuente próxima a cada una de ellas y que aporta estacionalmente diferentes concentraciones de N-Nitrato (probablemente asociados al regadío). El origen de las aguas de esas norias corresponde a la percolación de los excesos de agua de regadío, que utiliza como fuente de abastecimiento al río Tinguiririca.

En el sistema acuífero profundo, compuesto por arcilla arenosa con algunas intercalaciones o lentes de arena, con una potencia reconocida de hasta 53 m y una permeabilidad hidráulica media a baja, se monitorearon sus aguas en un total de 10 pozos. En todos ellos se midieron concentraciones de N-Nitratos menores a 10 mg-N/L, habitualmente en torno a 5 mg-N/L. El bajo efecto de las actividades en superficie sobre la calidad de las aguas subterráneas profundas se explica por la existencia de la unidad hidrogeológica superficial de baja permeabilidad hidráulica, la cual prácticamente tiende a aislar al sistema profundo de las actividades en superficie. El estudio de suelos, que muestra baja a nula concentración de nitratos a una

profundidad de 3 metros, confirma el rol de las capas de baja permeabilidad en la atenuación del transporte de nitrógeno hacia el acuífero. La protección de las capas de baja permeabilidad también es confirmada por las mediciones de Tritio, las cuales muestran que las aguas subterráneas son más antiguas que las aguas superficiales del río Tinguiririca, en más de 15 años. La recarga principal de las aguas del sistema profundo se produce en las cabeceras de la cuenca, donde están presentes los sedimentos de mayor permeabilidad. También se produce recarga al sistema profundo por percolación de las aguas excedentes del regadío (que utiliza como fuente a las aguas del río Tinguiririca), lo cual se produce preferentemente en el sector bajo de la cuenca.

### **10.3 CONCLUSIONES GENERALES**

Basándose en los resultados obtenidos, asociados al cumplimiento de los objetivos del proyecto, se formulan las siguientes conclusiones principales:

#### **a) Evaluación de la condición actual de las concentraciones de nitrato en las aguas subterráneas, en los sectores hidrogeológicos seleccionados (sectores pilotos).**

En los sectores pilotos seleccionados se efectuaron monitoreos de parámetros físicos, químicos e isotópicos de las aguas subterráneas en norias (sistema acuífero somero) y en pozos (sistema acuífero profundo). Los monitoreos fueron realizados en: enero-2009, abril-2009, abril-2010, septiembre-2010, abril-2011 y octubre-2011. Se monitorearon 7 norias y 36 pozos en el sector de San Pedro y 16 norias y 10 pozos en el sector de Pichidegua.

Basado en esas mediciones, se evalúa la presencia de N-Nitratos en las aguas subterráneas (especie del nitrógeno preponderante en el sistema acuífero). Se observan bajas concentraciones de N-Nitratos en las aguas subterráneas a escala de sector hidrogeológico.

#### **b) Caracterización detallada de las Potenciales Fuentes Superficiales de nitrato al agua subterránea en los sectores pilotos.**

En el Sector de San Pedro, los purines son los que aportan una mayor cantidad de nitrógeno a la superficie del terreno (68%), seguido por los fertilizantes inorgánicos (32%). El aporte de los sólidos (guanos) es muy inferior (0,1%) respecto de las otras fuentes existentes.

En el Sector de Pichidegua la aplicación de fertilizantes sintéticos en la superficie del terreno es la principal fuente potencial de nitrógeno (84%), seguido por la aplicación de purines (14%). El aporte de nitrógeno asociado a los guanos es de un 2%.

Dichas fuentes (purines, fertilizantes inorgánicos y guanos), además de las aguas subterráneas naturales (aguas de recarga de los sistemas acuíferos), son caracterizadas química e isotópicamente, con el objetivo de identificar sus “marcas” características.

En el Sector de San Pedro, los trazadores químicos, con la excepción del N-Nitrato, no son buenos indicadores para evaluar el aporte de nitrato de purines al agua subterránea, por cuanto la diferencia en las “marcas químicas” se pierde en el agua de riego debido a que ella corresponde a una mezcla de purines con aguas subterráneas proveniente de bombeos. En

cuanto a los trazadores isotópicos del nitrato, en el Sector de San Pedro se observa que las aguas subterráneas que presentan altas concentraciones de N-Nitratos y valores más enriquecidos en  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ , están mostrando influencia de una fuente enriquecida en  $^{15}\text{N}$  y en nitratos. Lo anterior por cuanto el proceso de desnitrificación (que incrementa los valores de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$ ) no es significativo en la atenuación de N-Nitratos en este sector. Entonces, identificando la marca de  $\delta^{15}\text{N-NO}_3$  de la potencial fuente, se puede identificar el efecto de ella en las aguas subterráneas.

En el Sector de Pichidegua, las “marcas químicas” de los purines y de las aguas subterráneas son claramente diferentes. Los purines presentan un alto contenido de Bicarbonato y de Sodio + Potasio, mientras que en las aguas subterráneas los Sulfatos cobran mayor importancia relativa (especialmente en norias). Esto es un reflejo de la recarga de aguas de riego (río Tinguiririca) que son ricas en Sulfatos. En cuanto a la marca isotópica, los purines de cerdo, por ser aplicados directamente (sin almacenamiento previo), presentan una marca isotópica ( $^{15}\text{N}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) parecida a las otras potenciales fuentes de nitratos. Entonces, las interferencias en las “marcas isotópicas” hacen que se uso presente limitaciones en el sector de Pichidegua.

En este sector (Pichidegua), las mediciones de isótopos estables del agua ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ ) muestran que el origen de las aguas subterráneas del acuífero profundo es diferente a las del sistema somero. Las aguas del acuífero profundo corresponden a aguas de recarga local (aguas provenientes de precipitaciones en el mismo sector del proyecto). Las aguas del sistema acuífero somero se originan por percolación de los excedentes de regadío (aguas del río Tinguiririca, conducidas al sector por canales de regadío). Se observan además pozos y norias cuyas aguas presentan marcas intermedias, las cuales corresponden a mezclas de agua de recarga local y de percolación de excesos de regadío.

En ambos sectores las mediciones de Tritio en las aguas subterráneas muestran valores inferiores a 0,8 UT (menores al límite de detección analítico del laboratorio), indicando que estas aguas tienen un largo tiempo de residencia en el sistema acuífero (al menos hace 15 años que se infiltraron).

### **c) Utilización de trazadores químicos e isotópicos en la identificación de fuentes de nitratos al agua subterránea.**

En base a las mediciones efectuadas, se efectúa un seguimiento de las “marcas” características de las potenciales fuentes de nitrógeno y de las aguas subterráneas naturales. En ambos sectores se asocian esas “marcas” con la fuente que la puede haber originado, lo cual se logra analizando en conjunto la caracterización de las actividades en superficie, las mediciones químicas e isotópicas y, fundamentalmente, la información hidrogeológica.

Si bien se identificaron trazadores químicos e isotópicos, ha sido necesario desarrollar un estudio multidisciplinario (geología, hidrogeología, hidroquímica, isótopos, agronómico), los cuales aportan diferentes líneas de evidencia, para evaluar -con resultados concluyentes- el impacto de los purines u otra fuente nitrogenada en las aguas subterráneas,.

#### **d) Procesos condicionantes de la presencia de nitrógeno en las Aguas Subterráneas.**

Una de las conclusiones importantes del proyecto, en ambos sectores, es que la concentración de nitrato en las aguas subterráneas es controlada principalmente por las características hidrogeológicas. En la superficie de ambos sectores del proyecto existen significativas fuentes de Nitrógeno. Sin embargo, no se expresan en la calidad de las aguas subterráneas: los niveles de N-Nitratos en general son mucho más bajos que el límite permisible de 10 mgN/L para su uso en agua potable.

En el Sector de San Pedro las mediciones de N-Nitratos en el sistema profundo de aguas subterráneas muestra que su nivel basal es de aproximadamente 5 mgN/L, con concentraciones normalmente bajo 10 mgN/L. Las aguas de este sistema profundo son las aprovechadas en la cuenca. Sólo en casos específicos se observan concentraciones mayores.

En el Sector de Pichidegua, se midieron concentraciones de N-Nitratos mayores a 10 mg-N/L en solamente 5 de las 16 norias monitoreadas. En el sistema acuífero profundo se midieron concentraciones de N-Nitratos menores a 10 mg-N/L, habitualmente en torno a 5 mg-N/L, en los 10 pozos monitoreados. Es esperable que en las norias, que están en el sistema somero y por ello más expuesto a las actividades agrícolas en superficie, se vean valores puntuales más altos que el nivel de 10 mg-N/L (considerado como valor referencial).

En ambos sectores estudiados se observa que existe una unidad hidrogeológica superficial de baja permeabilidad (arcillas en el caso de San Pedro y cenizas en Pichidegua), la cual prácticamente tiende a aislar al sistema acuífero profundo de las actividades en superficie. Estas unidades hidrogeológicas restringen el movimiento del agua en profundidad (percolación profunda) y, en consecuencia, la lixiviación de N-NO<sub>3</sub> hacia la zona saturada. Luego, los N-NO<sub>3</sub> se acumulan sobre o dentro estas zonas de movimiento de agua lento (dentro de los primeros 3 metros de profundidad). Además, debido al alto contenido de arcillas, que tiene una alta capacidad de absorción (inmovilización) del nitrógeno, probablemente como amonio, impide el transporte de amonio y su transformación en nitrato a niveles más profundos en el suelo. Por otro lado, dado el espesor de las capas de arcilla y su baja permeabilidad, es posible que el nitrato sea atenuado por el proceso de desnitrificación, que es la transformación de nitrato en nitrógeno gas (proceso observado en el sector de Pichidegua, no así en San Pedro).

La recarga principal de agua del sistema profundo corresponde a aguas lluvias que precipitan en la misma cuenca y que ingresan al sistema subterráneo por los sedimentos de mayor granulometría y que se acumulan en los sectores de *pié de monte*. Se observa que se producen mayores efectos en la calidad de las aguas subterráneas cuando se localizan fuentes de nitrógeno sobre esos sedimentos de mayor granulometría (sectores de recarga, de mayores permeabilidades hidráulicas) y los flujos de agua que infiltran hacia el sistema subterráneo (recarga, por lluvia o por exceso de agua de regadío) transportan los nitratos.

En las norias que presentan aguas con concentraciones de N-NO<sub>3</sub> mayores a 10 mg-N/L, se observa que existe una fuente cercana (exceso de agua de riego o residuos domésticos) que induce un flujo de agua prácticamente horizontal hacia ella, por la unidad de suelo superficial de mayor permeabilidad que la unidad hidrogeológica de arcillas o cenizas.



**e) Mejora en la eficacia de los planes de aplicación de purines.**

Se postula que el proyecto realizado, así como la metodología aplicada y los resultados alcanzados, son insumos importantes para que, a partir de ellos, pueda orientarse la investigación futura que permita una efectiva aplicación de instrumentos de gestión ambiental.

Entre los más significativos, a tener en cuenta en las subcuencas donde existan o se prevea la instalación de Planteles de Cerdos, surgen:

- ◆ Desarrollar estudios hidrogeológicos (básico, principalmente con información existente o que se pueda capturar en terreno sin construir nuevos pozos) a nivel de subcuencas, en el cual -al menos- se identifiquen los sectores de recarga del sistema acuífero, las unidades hidrogeológicas presentes, sus propiedades hidráulicas, las direcciones de flujo, los niveles de las aguas subterráneas y la litología de la zona no-saturada.
- ◆ Evaluar la línea de base de la calidad de las aguas subterránea, ya que pueden existir niveles altos de N-Nitratos de actividades agrícolas históricas, previos a la instalación de nuevos Planteles.
- ◆ Establecer programas de monitoreo de calidad del agua subterránea y evaluar su evolución en el tiempo.

Esos antecedentes permitirán elaborar o mejorar la eficacia de los planes de aplicación de purines, al considerar en el diseño y elaboración de los mismos, las especificidades de los sitios hidrogeológicos donde se instale la actividad porcina intensiva.

A modo de ejemplo, en las zonas de recarga es recomendable establecer zonas de resguardo, donde las potenciales fuentes de nitrógeno sean más controladas. También las nuevas fuentes deben ser más controladas en sectores que presenten una línea de base con alta concentración de N-Nitratos, próxima al límite de 10 mg-N/L para uso del agua en bebida. Además se requiere revisar los pozos y norias existentes en las proximidades de sitios de regadío con aguas que contengan altos niveles de nitrógeno, con el objetivo que esas captaciones no se conviertan en vías preferenciales de infiltración por deficiencias en sus construcciones.

**f) Mayor certeza en las inversiones del sector en cuanto a medidas ambientales y a crecimientos productivos.**

El proyecto desarrolla una metodología de trabajo que permite obtener un mejor entendimiento de los factores que controlan la concentración de nitratos en las aguas subterráneas en sectores agrícolas con distintas fuentes de nitratos, incluyendo los purines.

Uno de los resultados importantes es el que muestra que las unidades hidrogeológicas de baja permeabilidad hidráulica, asociadas a arcillas y cenizas volcánicas, ejercen un control importante en la atenuación de nitratos. Luego, es recomendable que en futuras instalaciones de cerdos se realice un estudio hidrogeológico del sector, antes de la instalación de las Plantas.

El proyecto muestra también que en zonas agrícolas, no obstante la intensiva utilización de fuentes nitrogenadas en la superficie del terreno, los niveles de N-Nitratos en el sistema de aguas subterráneas tanto profundo como somero, están en torno a los 6 mg-N/L, asociados a prácticas agrícolas históricas. También es posible encontrar de forma puntual niveles superiores a 10mg-N/L permisible para su uso en bebida, dependiendo de las características hidrogeológicas y por deficiencias en la construcción de pozos. Luego, es recomendable realizar estudios de línea de base y de evolución temporal de las concentraciones de nitratos.

Finalmente el proyecto, aporta una base de datos isotópicos de purines y fertilizantes, que pueden ser utilizados en futuros estudios. También muestra las ventajas y limitaciones de la utilización de isótopos para identificar fuentes de nitratos en las aguas subterráneas.

Resumiendo, los resultados del proyecto serán de utilidad para evaluar nuevos sitios de crecimientos productivos del sector porcino, o de actividades agrícolas. Además, en el caso de actividades existentes, los resultados del proyecto son de utilidad para identificar las fuentes que pueden estar originando efectos no deseados en las aguas subterráneas. Todo lo anterior permitirá dar mayor certeza a las inversiones del sector en cuanto a medidas ambientales.

GP, Octubre 2012.

## 11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. **Addiscott, T.** (2005). "Nitrate, agriculture and the environment". Wallingford, UK: CABI Publishing.
2. **Anderson, K.K. and Hooper, A.B.** (1983). "O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O are each the source of one O in NO<sub>2</sub> produced from NH<sub>3</sub> by Nitrosomonas: 15N evidence". FEBS Letters , 164, 236-240.
3. **Aravena, R. and Mayer, B.** (2009). Isotopes and processes in the nitrogen and sulfur cycles. En: C. M. Aelion, P. Höhener, D. Hunkeler, & R. Aravena (Eds.), Environmental isotopes in biodegradation and bioremediation (pp. 203–246). Boca Raton: CRC Press.
4. **Aravena, R. and Robertson, W.D.** (1998). "Use of multiple isotope tracers to evaluate denitrification in ground-water: Study of nitrate from a large-flux septic system pluma". En: Ground Water, 36 (6), 975-981.
5. **Aravena, R. and Clark, I.** (2005). "Environmental Isotopes in Groundwater Resource and Contaminant Hydrogeology". NGWA Course #394 January 25-26, San Diego, California.
6. **Arumi, J., Oyarzún, R., Salgado, L. y M. Mariño** (2002). "Sensitivity Analysis and Testing of the Risk-N Model in the Central Valley Of Chile". En: Groundwater and Human Development, Bocanegra, E - Martínez, D - Massone, H (Eds.) 2002 - ISBN 987-544-063-9
7. **ASPROCER** (2008). Base de datos de producción de cerdos y generación de purines.
8. **Bedient, P., Rifai, H., Newell, C.** (1999). "Ground Water Contamination. Transport and Remediation". Second Edition. Prentice Hall PTR.
9. **Böttcher, J , Strebel, O., Voerkelius, S, and Schmidt, H.-L.** (1990). "Using isotope fractionation of nitrate nitrogen and nitrate oxygen for evaluation of denitrification in a sandy aquifer". Journal of Hydrology, 114: 413-424.
10. **CIREN** (1996). "Estudio Agrológico, descripciones de suelos, RM Región". Centro de Información de Recursos Naturales. Publicación N° 115.
11. **Clark, I. and P. Fritz, 1997.** Environmental Isotopes in Hydrogeology, Lewis Publishers, New York, NY, 328 p.
12. **DGA** (1987). Balance Hídrico, Dirección General de Aguas.

13. **DGA** (2005). “Determinación de la Disponibilidad de Derechos de Aprovechamiento de Aguas Subterráneas en la Cuenca del Estero Yali hasta Sector El Prado Región Metropolitana”. S.D.T. N° 189
14. **DGA** (2005). “Modelación Hidrogeológica de los Valles de Alhué, Cachapoal y Tinguiririca”. S.D.T. N° 209
15. **DGA** (2005). “Área de restricción sector hidrogeológico de aprovechamiento común de Yali Bajo El Prado”. S.D.T. N° 224,
16. **DGA**, (2008). Catastro Público de Aguas (CPA) de la Dirección General de Aguas
17. **Firestone, M. and Davidson E.** (1989). “Microbiological basis of NO and N<sub>2</sub>O production and consumption in soil”. *En: Exchange of Trace Gases between Terrestrial Ecosystems and the Atmosphere*. M. O. Andreae and D. S. Schimel (Eds.). John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, pp. 7-21.
18. **Foster, S. and Hirata, R.** (1991). “Determinación del Riesgo de Contaminación de Aguas Subterráneas: una metodología basada en datos existentes”. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, CEPIS.
19. **Foster, S., Garduño, H., Kemper, K., Tuinhof, A., Nanni, M. y Dumars, C.** (2002). “Protección de la Calidad del Agua Subterránea: definición de estrategias y establecimiento de prioridades, 2002-2006”. Banco Mundial, programa asociado de la GWP.
20. **Fukada, T., Hiscock, K., Dennis, P.** (2004). “A dual-isotope approach to the nitrogen hydrochemistry of an urban aquifer”. *Applied Geochemistry* 19 (2004) 709–719.
21. **Gana, P et al.** (1994). “Geología de la Cordillera de la Costa, regiones de Valparaíso y Metropolitana, al oeste de los 71°00' W”. Preparado para 7° Congreso Geológico Chileno,
22. **Gana et al.** (1994). “Evolución Geotectónica de la Cordillera de la Costa de Chile Central (33 – 34° S): Control Geológico y Geofísico”. Preparado para 7° Congreso Geológico Chileno.
23. **Grilli, A., Tore, C., Aguirre, E. y Moya, P.** (2000). “Cuidado con el Nitrato”. *Revista Vertiente del Capítulo Chileno de ALHSUD*, Año 5, N°5, pp.26-29.
24. **Hollocher, T.C.** (1984). “Source of the oxygen atoms of nitrate in the oxidation of nitrite by *Nitrobacter agilis* and evidence against a P-O-N anhydride mechanism in oxidative phosphorylation”. *Archives of Biochemistry and Biophysics* , 233, 721-727.
25. **Horibe, Y., Shigehara, K., and Takakuwa, Y.** (1973). “Isotope separation factors of carbon dioxide-water system and isotopic composition of atmospheric oxygen”. *Journal of Geophysical Research*, 78, 2625-2629.
26. **Hounslow, A.** (1995). “Water Quality Data; Analysis and Interpretation”. Lewis, Boca Raton, FL. 397 pp.



27. **Hubner, H.** (1986). "Isotope effects of nitrogen in the soil and biosphere". En: P. Fritz and J.C. Fontes (Eds.). Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, vol. 2b, The Terrestrial Environment, Elsevier, pp. 361-425.
28. **Internacional Atomic Energy Agency (IAEA, 1983).** Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology (Technical Reports Series N° 91).
29. **Iqbal, et al.** (1997). "Nitrogen isotope indicators of seasonal source variability to groundwater". Environmental Geology 32 (3)
30. **Karr, J., Showers, W., Wendell Gilliam, J. and Scout Andres, A.** (2001). "Tracing nitrate transport and environmental impact from intensive swine farming using delta nitrogen-15". Journal of Environmental Quality, 30, 1163-1175.
31. **Kemp, M.J. and Dodds W.K.** (2002). "The influence of ammonium, nitrate, and dissolved oxygen concentrations on uptake, nitrification, and denitrification rates associated with prairie stream substrata". Limnology and Oceanography 47:1380-1393.
32. **Kendall, C.** (1998). "Tracing nitrogen sources and cycling in catchments". En: Isotope tracers in catchment hydrology. Edited by C. Kendall and J.J. McDonnell. Elsevier, Amsterdam, the Netherlands. Pp. 534-569.
33. **Kendall, C., and Aravena, R.** (2000). Nitrate isotopes in groundwater systems, Chapter 9, En: P. Cook and Herczeg, A.L. (Eds.), Environmental Tracers in Subsurface Hydrology, Kluwer Academic Publishers, p. 261-297.
34. **Kumar, S., Nicholas, D.J.D. and Williams, E.H.** (1983). "Definitive 15N NMR evidence that waters serves as a source of O during nitrite oxidation by Nitrobacter agilis". FEBS Letters, 152, 71-74.
35. **Mosier, A.R., Bleken, M.A., Chaiwanakupt, P., Ellis, E.C., Frency, J.R., Howarth, R.B., Matson, P.A., Minami, K., Naylor, R., Weeks K.N., Zhu, Z.** (2001). "Policy implications of humus-accelerated nitrogen cycling". Biogeochemistry 52. 281-320.
36. **Motzer, W.** (2006). "Nitrate Forensics". Submitted to Fall 2006 HydroVisions Newsletter.
37. **Nomura, A.** (1996). Stomach Cancer. In: Scottenfeld, D., Fraumeni, J.F. (Eds), Cancer Epidemiology and Prevention. Oxford University Press, New York.
38. **Rempel, M.** (2008). "NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and N<sub>2</sub>O at the Strawberry Creek Catchment: tracing sources and processes using stable isotopes". Master's thesis, University of Waterloo.
39. **Roadcap, G., Hackley, K., Hwang, H.** (2002). "Application of Nitrogen and Oxygen Isotopes to Identify Sources of Nitrate". Report presented to the Illinois Groundwater Consortium Southern Illinois University.
40. **Robertson, G.P.** (1989). "Nitrification and denitrification in humid tropical ecosystems: potential controls on nitrogen retention". En: Mineral Nutrients in Tropical Forest and Savanna Ecosystems. J Procter (Ed.). Blackford Scientific Publications, Oxford, England, pp. 55-69.

41. **Rozanski, K., L. Araguas-Aragua, and R. Gonfiantini** (1993). “Isotopic patterns in modern global precipitation”. En: Swart, P.K., K.C. Lohmann, J. McKenzie, and S. Savin, (Eds.), *Climate Change in Continental Isotopic Records*, Geophysical Monograph 78, American geophysical Union, Washington, DC: 1-36.
42. **SERNAGEOMIN** (1990). “Carta Hidrogeológica de Chile N°1, Hoja Rancagua, VI Región”. Escala 1:250.000.
43. **SERNAGEOMIN** (1996). “Mapa Geológico del área de San Antonio – Melipilla. Regiones de Valparaíso, Metropolitana y del Libertador General Bernardo O’Higgins, N° 2”. Escala 1: 100.000.
44. **Silva, S., Ging, P., Lee, R., Ebbert, J., Tesoriero, A., Inkpen, E.** (2002). *Forensic Applications of Nitrogen and Oxygen Isotopes in Tracing Nitrate Sources in Urban Environments*. Environmental Forensics, 2002.
45. **Strauss, E., Mitchell, N., and Lamberti, G.** (2002). “Factors regulating nitrification in aquatic sediments: effects of organic carbon, nitrogen availability, and pH”. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 59: 554-563.
46. Triángulo de texturas de suelos de acuerdo con USDA Fuente: [ftp://ftp.fao.org/FI/CDrom/FAO\\_Training/FAO\\_Training/General/x6706s/x6706s06.htm](ftp://ftp.fao.org/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm)
47. **Vitòria L., Soler A., Aravena R. and Canals A.** (2005). Multi-isotopic approach ( $^{15}\text{N}$ ,  $^{13}\text{C}$ ,  $^{34}\text{S}$ ,  $^{18}\text{O}$  and D) for tracing agriculture contamination in groundwater (Maresme, NE Spain). In: *Environmental Chemistry: Green chemistry and pollutants in Ecosystems*. Ed. Springer-Verlag, (Eds. E. Lichtfouse, S. Dudd and D. Robert) Vol 1, N° XXVI, p 137-147.
48. **Wassenaar, L. I.** (1995). Evaluation of the origin and fate of nitrate in the Abbotsford aquifer using the isotopes of  $^{15}\text{N}$  and  $^{18}\text{O}$  in  $\text{NO}_3$ . *Applied Geochemistry* 10:391–405.
49. **Wells, E. R., and N. C. Krothe.** (1989). Seasonal fluctuation in  $\delta^{15}\text{N}$  of groundwater nitrate in a mantled karst aquifer due to macropore transport of fertilizer-derived nitrate. *Journal of Hydrology* 112:91–20.
50. **Yáñez, et al.** (1998). “Origen y Significado Geológico de la Anomalía Melipilla, Chile Central”. Preparado para *Revista Geológica de Chile* v 25 n° 2.