



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA  
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA  
CON MENCIÓN EN RECURSOS HÍDRICOS EN LA AGRICULTURA

## Herramientas de Gestión Ambiental para la utilización de purines como bio-fertilizantes



Profesor Guía: José Luis Arumí Ribera  
Profesor Guía: Diego Rivera Salazar  
Profesor Evaluador Interno: Luis Octavio Lagos Roa  
Dpto. de Recursos Hídricos  
Facultad de Ingeniería Agrícola

Documento de Tesis para ser presentada a la  
Dirección de Postgrado de la Universidad de Concepción

HÉCTOR RODRIGO FLORES MORAGA  
CHILLÁN-CHILE  
2012

# Herramientas de Gestión Ambiental para la utilización de purines como bio-fertilizantes

## COMISIÓN EVALUADORA

Dr. José Luis Arumí Ribera  
Ingeniero Civil, Ph.D.

---

Profesor Guía

Dr. Diego Rivera Salazar  
Ingeniero Civil, Doctor



---

Profesor Guía

Dr. Luis Lagos Roa  
Ingeniero Civil Agrícola, Ph.D.

---

Prof.Evaluador Interno

Dr. Gabriel Merino Coria  
Licenciado en Física, Ph.D.

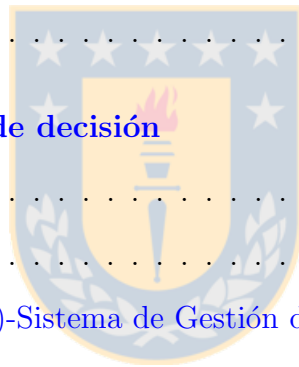
---

Director (s) de Programa

# Índice general

<b>1</b>	<b>Antecedentes generales</b>	<b>1</b>
1.1	Introducción . . . . .	2
1.1.1	Producción Limpia . . . . .	4
1.2	Planteamiento del problema . . . . .	5
1.2.1	Medio ambiente y el sector productivo . . . . .	7
1.2.2	Composición y valoración de los purines de cerdo . . . . .	10
1.3	N-P-K en el purín . . . . .	13
1.3.1	Nitrógeno en purines . . . . .	14
1.3.2	Fósforo en purines . . . . .	15
1.3.3	Potasio en los purines . . . . .	17
1.4	Justificación y relevancia . . . . .	18
<b>2</b>	<b>Hipótesis y objetivos</b>	<b>21</b>
2.1	Supuestos de la investigación . . . . .	21
2.2	Hipótesis . . . . .	21
2.3	Objetivos de la Investigación . . . . .	22
2.3.1	General . . . . .	22
2.3.2	Específicos . . . . .	22
2.4	Alcances . . . . .	23
2.5	Recursos . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Zona de estudios</b>	<b>24</b>
3.1	Escala regional . . . . .	24
3.1.1	Modelo hidrológico del Valle . . . . .	27
3.2	Área local . . . . .	28
3.2.1	Suelos . . . . .	31
3.2.2	Impacto de los canales de riego . . . . .	31

3.2.3	Modelo Conceptual del fundo San Guillermo . . . . .	33
<b>4</b>	<b>Identificar zonas de riesgo ambiental</b>	<b>34</b>
4.1	Introducción . . . . .	35
4.2	Materiales y métodos . . . . .	39
4.2.1	Vulnerabilidad y riesgo . . . . .	39
4.2.2	Inferencia Difusa . . . . .	41
4.2.3	Análisis del sistema . . . . .	43
4.2.4	Elaboración del índice de riesgo . . . . .	44
4.3	Área de estudio . . . . .	48
4.3.1	Descripción del predio . . . . .	51
4.4	Resultados . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Sistema soporte de decisión</b>	<b>58</b>
5.1	Introducción . . . . .	59
5.2	Metodología . . . . .	63
5.2.1	(SGPF)-Sistema de Gestión de Purines como Fertilizante . . . . .	63
5.2.2	Ciclo del Nitrógeno . . . . .	65
5.2.3	Ciclo del Fósforo . . . . .	66
5.2.4	Balance de nutrientes . . . . .	67
5.2.5	Análisis del sistema . . . . .	68
5.2.6	Interfaz Gráfica . . . . .	69
5.3	Área de estudio . . . . .	70
5.3.1	Descripción del predio . . . . .	71
5.3.2	Resultados . . . . .	73
5.3.3	Datos . . . . .	73
5.3.4	Resultados entregados por el SGPF . . . . .	75
5.4	Recomendaciones . . . . .	86



<b>6 Conclusiones</b>	<b>89</b>
6.1 Conclusión . . . . .	89
<b>7 Anexos</b>	<b>105</b>
7.1 Primera Publicación . . . . .	105
7.2 segunda Publicación . . . . .	110
7.2.1 Base de datos . . . . .	110
7.2.2 Código Fuentes . . . . .	116
7.3 Ecuaciones . . . . .	138
7.3.1 Modulo Nitrógeno . . . . .	138
7.3.2 Fósforo . . . . .	141
7.3.3 General . . . . .	143
7.4 acknowledgements . . . . .	145



# Índice de figuras

Figura 1.1 : Evolución de la nacional de carne de cerdo . . . . .	2
Figura 1.2 : Existencias porcinas según regiones . . . . .	3
Figura 1.3 : Ciclo de los nutrientes . . . . .	9
Figura 1.4 : Ciclo del nitrógeno en el suelo . . . . .	15
Figura 1.5 : Ciclo del fósforo en el suelo . . . . .	17
Figura 1.6 : Ciclo del potasio en el suelo . . . . .	18
Figura 3.1 : Comuna de ubicación del área de Estudios . . . . .	24
Figura 3.2 : Zona donde se encuentra inmersa el área de estudio . . . . .	25
Figura 3.3 : Información espacial de la cuenca . . . . .	26
Figura 3.4 : Modelo conceptual de los procesos hidrológico de la cuenca.	28
Figura 3.5 : Imagen Satelital del predio (Google Earth) . . . . .	28
Figura 3.6 : Información espacial del predio . . . . .	30
Figura 3.7 : Información espacial del predio. . . . .	32
Figura 3.8 : Principio de similitud . . . . .	33
Figura 4.1 : Principio de similitud modificado de (Rivera, 2006) . . . . .	38
Figura 4.2 : Diagrama de la vulnerabilidad, elaboración propia . . . . .	40
Figura 4.3 : Diagrama de inferencia lógica . . . . .	43
Figura 4.4 : Modelo conceptual de gestión ambiental . . . . .	44
Figura 4.5 : Comuna de ubicación del área en estudio . . . . .	50
Figura 4.6 : Unidades productivas del fundo San Guillermo . . . . .	51
Figura 4.7 : Fundo San Guillermo . . . . .	52
Figura 4.8 : Índice de riesgo de lavado de nutrientes por escorrentía . . . . .	53
Figura 4.9 : Índice de riesgo al lixiviado de nutrientes . . . . .	54
Figura 4.10 : Índice de riesgo de contaminación de los cursos de agua por la aplicación de purines de cerdo . . . . .	55

Figura 5.1 : Manejo sustentable del purín . . . . .	61
Figura 5.2 : Modulo del Nitrógeno . . . . .	66
Figura 5.3 : Modulo del fósforo . . . . .	67
Figura 5.4 : Interfaz Gráfica . . . . .	69
Figura 5.5 : Unidades productivas del fundo San Guillermo . . . . .	72
Figura 5.6 : Fundo San Guillermo . . . . .	73
Figura 5.7 : Variación temporal del Nitrógeno disponible y requerido por el cultivo . . . . .	76
Figura 5.8 : Variación temporal del Fósforo disponible y requerido por el cultivo . . . . .	77
Figura 5.9 : Estimación del Nitrógeno removido por lavado y Lixiviación	77
Figura 5.10 :Estimación del fósforo removido por arrastre de sedimentos y en solución . . . . .	78
Figura 5.11 :Variación temporal del contenido de agua en el suelo . . . .	79
Figura 5.12 :Variación de las concentración N disponible en el suelo . .	81
Figura 5.13 :Variación de las concentraciones de P soluble en el suelo . .	83
Figura 5.14 :Variación de las concentraciones de P soluble en el suelo . .	85

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Producción de excretas según el estado del animal. . . . .	11
Tabla 1.2: Precios medios anuales de algunos fertilizantes US\$/ton. . .	12
Tabla 4.1: Ponderación para las variables en relación a su importancia relativa sobre la lixiviación . . . . .	45

Tabla 4.2: Ponderación para las variables en relación a su importancia relativa sobre el lavado de nutrientes por escorrentía . . . . .	47
Tabla 4.3: Valores Cualitativos para cada indicador de riesgo sobre la lixiviación y lavado de nutrientes de nutrientes . . . . .	49
Tabla 5.1: Contenido Nutricional del Suelo . . . . .	74
Tabla 5.2: Característica física del suelo . . . . .	74
Tabla 5.3: Característica químico física del purín . . . . .	75
Tabla 5.4: Característica física del perfil A0 y factores de el calculo de la erosión . . . . .	75
Tabla 5.5: Cantidad de Purín y día de aplicación entregado por SGPF	86
Tabla 7.1: Valores para cada rango de pendientes según el impacto sobre el lavado de nutrientes del suelo . . . . .	105
Tabla 7.2: Valores para cada rango de uso de suelo, según el grado de protección, contra las pérdidas de nutrientes por lavado . . .	105
Tabla 7.3: Valores para cada rango de textura, según el impacto sobre el lavado de nutrientes y la lixiviación . . . . .	106
Tabla 7.4: Valores para cada rango de profundidad del suelo según su impacto en el lavado de nutrientes . . . . .	106
Tabla 7.5: Valores para cada rango de la altura del nivel freáticos según su impacto en la lixiviación . . . . .	106
Tabla 7.6: Valores para cada rango del Método de riego, manejo y aplicación del purín según su impacto en el lavado y lixiviación de nutrientes . . . . .	107
Tabla 7.7: Valores de para cada rango de las practicas de conservación según su impacto en el lavado de nutrientes del suelo . . . . .	107

Tabla 7.8: Valores para cada rango de la capacidad de campo efectivo del suelo hasta 1 m de profundidad según su impacto en el lavado y lixiviación de nutrientes . . . . .	107
Tabla 7.9: Valores para cada rango de las clases de drenajes del suelo según su impacto en la lixiviación y lavado de nutrientes . . .	108
Tabla 7.10: Información características de los sectores de un predio . . .	109
Tabla 7.11: Ponderaciones de los sectores y sus índices de riesgo . . . . .	109
Tabla 7.12: Contenido Nutricional del Suelo . . . . .	111



# Antecedentes generales

---

## Resumen

Fruto de las actividades agropecuarias se generan altas cantidades de desechos, los cuales habitualmente son aplicados al suelo, considerado uno de los métodos más efectivos y económicos para afrontar la problemática de la acumulación de los desechos de tipo orgánico procedentes de la ganadería intensiva. Sin embargo, estas practicas son de alto riesgo en lo concerniente a la pérdida de nutrientes sobre los cursos de agua. Los factores claves para reducir estas pérdidas son una correcta aplicación del purin y un buen manejo del riego; el efecto de estas estrategias dependerán específicamente de las características ambientales, y las prácticas previamente utilizadas en el lugar. Una buena alternativa, para evaluar el impacto de la aplicación de purines de cerdo, es la utilización de modelos matemáticos, debido a que medir directamente los efectos, resulta de alto valor, lento y difícil. El objetivo de este estudio es desarrollar herramientas que permitan la aplicación de purines de cerdo, maximizando su efectividad como fertilizante y minimizando sus efectos contaminantes, bajo condiciones climáticas, geográficas y de producción propias del Valle Central de Chile.

## 1.1. Introducción

La producción de cerdos en Chile ha tenido un rápido desarrollo en los últimos tiempos, se observó entre los años 1999 al 2008 un crecimiento superior al 214%. La razón de esto se debe fundamentalmente al consumo interno y al aumento de la exportación, esta última ha sufrido un incremento promedio anual del 8,95% (figura 1.1). Se estima que para el 2010, el sector podría exportar alrededor de 500 millones de dólares, constituyéndose en el principal actor en materia de exportación del sector cárnico (Peralta et al., 2005; Echavarrí, 2009).

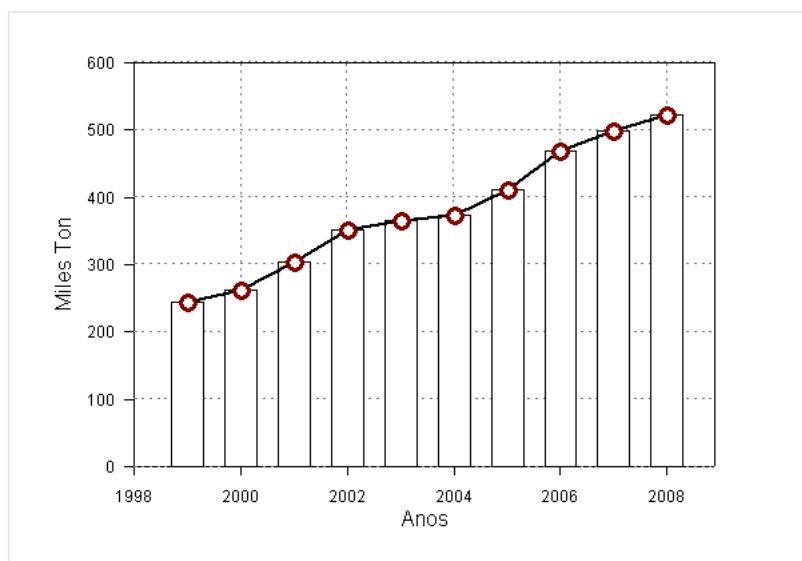


Figura 1.1: Evolución de la producción nacional de carne de cerdo

La concentración de las faenas porcinas se ubican principalmente en las regiones de O'Higgins y Metropolitana, donde se concentra el 73,7% de la existencia total nacional, (Figura 1.2), siendo sus principales mercados de destino Japón (35,6%) y Corea del Sur (24,9%), concentrando más del 60% de las exportaciones nacionales de carne porcina (Echavarrí, 2009; INE, 2009).

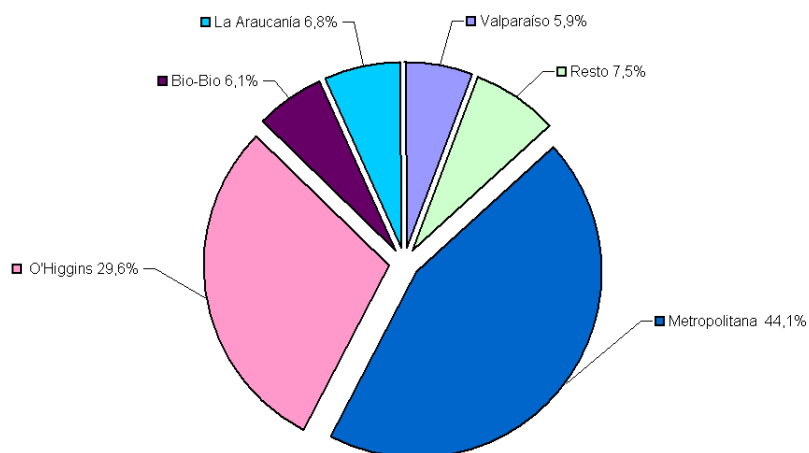


Figura 1.2: Existencias porcinas según regiones

Actualmente la cría y engorda de porcino para la producción de carne, esta ocasionando problemas medioambientales y sanitarios, surgiendo una creciente preocupación por los efectos en el medio ambiente; derivados del aumento en la productividad. Esta problemática ha incentivado a que diferentes empresas del rubro hayan iniciado un proceso tendiente a mejorar su desempeño ambiental utilizando distintos sistemas de gestión. Por esta razón la Asociación de Productores de Cerdos (**ASPROCER**) firma en el año 1990, un acuerdo voluntario de producción limpia, el objetivo del acuerdo fue cubrir los aspectos ambientales que trascendieran el cumplimiento de la normativa ambiental vigente; que regula la valorización agronómica de los purines, el tratamiento y disposición final de los residuos sólidos y líquidos. Además, tenía por objeto iniciar un proceso de objetivación ante el sector productivo, autoridades y comunidad en general del concepto de "buen manejo" de los planteles productores de cerdos, logrando que más del 75 % del sector haya presentado planes de manejo agronómicos, lo que ha significado un mejor desempeño ambiental, reduciendo los olores y vectores<sup>1</sup> que genera la crianza porcina(ASPROCER, 2005; Peralta et al., 2005; CNPL, 2007).

<sup>1</sup>Insectos o animales que son medios de transmisión de enfermedades desde el animal al ser humano.

### **1.1.1. Producción Limpia**

En el último tiempo, el sector productor de cerdos en Chile se ha visto sometido a una gran presión para reducir en forma significativa sus emisiones contaminantes. La que se origina principalmente por las restricciones impuestas en mercados internacionales, así como por la evolución que ha tenido la regulación y fiscalización a nivel nacional. Esto se suma a una creciente sensibilidad social, que se ha traducido en una mayor conciencia de los ciudadanos, consumidores, trabajadores y empresarios sobre la existencia de la contaminación y su impacto sobre la salud y la calidad de vida.

La dimensión ambiental, no tiene porque ser asumida sólo como un costo para los empresas, puede incluso generar beneficios, más allá de lo que implica cumplir con las normativas. Esta es la esencia del concepto de producción limpia, que consiste básicamente en solucionar un problema ambiental a través de estrategias preventivas, que al ser aplicada a los productos, procesos y organización del trabajo, permite usar con mayor eficiencia los recursos materiales y energéticos, y con ello incrementar la productividad y competitividad de la empresa(Castillo et al., 2000).

#### **Alternativas de manejo de residuos**

En relación al manejo de residuos existen tres grandes alternativas de gestión ambiental para la industria.

1. **Reducción de Residuos en el Origen:** La reducción en el origen elimina o disminuye la necesidad de tratamiento y disposición de los residuos. Incluye el uso racional de los recursos, materias primas, insumos y energía, y el uso de materiales menos nocivos para el medio ambiente. Para alcanzar este

punto destacan:

- a) **Cambios en las materias primas o insumos:** Corresponde al uso de materias primas e insumos que no generen o que generen un nivel inferior de residuos indeseables o peligrosos.
  - b) **Cambios de tecnología:** Esto significa modificar sistemas obsoletos o costosos por tecnologías adecuadas donde la inversión es recuperada en el corto plazo, por el ahorro de materias primas e insumos y/o mejoramiento de la productividad.
  - c) **Cambios en las prácticas de operación:** La aplicación de buenas prácticas de gestión de operaciones en la empresa se basa en la aplicación de una serie de procedimientos y/o políticas organizacionales y administrativas destinadas a mejorar y optimizar los procesos productivos y a promover la participación del personal en actividades destinadas a lograr la minimización de los residuos.
2. **Reutilización y reciclaje:** permiten reducir los volúmenes de residuos a ser dispuestos, transformándolos en un insumo más dentro del mismo proceso productivo u otro.
  3. **Tratamiento y disposición:** separan los contaminantes de un medio, obligando a disponerlos en otro, pero sin que necesariamente se reduzca su presencia en términos netos.

## **1.2. Planteamiento del problema**

El aire, el agua y el suelo, constituyen los medios donde se vierten los residuos generados por el hombre. Dichos residuos participan en los complejos procesos físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en el medio natural,

sufriendo transformaciones y en muchos casos, alterando el funcionamiento de los ecosistemas. El desarrollo agrícola y la producción pecuaria, se ha caracterizado en todo el mundo por la incorporación masiva de nutrientes y pesticidas, los que ingresan al ciclo hidrológico como una contaminación difusa ([Habit and Parra, 2001](#); [Humenik et al., 1987](#)).

El principal problema social a escala global es atender las necesidades alimentarias de la población y paralelamente controlar el impacto ambiental que provoca la agricultura intensiva sobre suelos, cursos de aguas superficial y subterráneas ([IUPA, 2008](#)). Las prácticas de manejo agropecuario tienen un potencial considerable para contaminar el medio ambiente, siendo el agua una de las mas vulnerable dado que enlaza las actividades productivas y las condiciones ambientales dentro de los sistemas ([Rivera et al., 2005](#)). El agua tiene un papel vital en el desarrollo de las comunidades, por lo que es indispensable que su abastecimiento sea seguro y continuo, ya que aún cuando sea un recurso renovable, puede llegar a estar tan contaminada por la actividad humana, que ya no sea útil, sino mas bien nociva ([Abelardo, 2003](#)).

Una de las principales consecuencias negativas de la actividad agrícola son la alteración de la calidad de las aguas a través del incremento de partículas en suspensión, fertilizantes, sales, compuestos orgánicos y la presencia de compuestos tóxicos como residuos de plaguicidas ([C.N.R., 2008](#); [Gassman et al., 2006](#)). Prácticamente en todos los países en los que se aplican fertilizantes agrícolas y plaguicidas, se han contaminado acuíferos subterráneos y aguas superficiales. El agua que vuelve a los ríos después de haberse utilizado para el riego se encuentra frecuentemente degradada por el exceso de nutrientes, salinidad, agentes patógenos y sedimentos que dificultan su uso posterior ([Klohn and Wolter, 1998](#)).

Un buen manejo de las labores agropecuarias y la implementación de tecnologías para una producción limpia, pueden reducir drásticamente la contaminación de las aguas y suelos, permitiendo alcanzar una cierta sostenibilidad en la producción. En este camino, la implementación de las BPA's<sup>2</sup> han marcado un avance en la incorporación de la dimensión ambiental a la gestión productiva predial, esto debido a que consideran acciones orientadas a disminuir o minimizar el impacto de la actividad productiva agropecuaria y forestal sobre el medio ambiente (Nazal and Cabezas, 2008; Abelardo, 2004), pero estas estrategias de manejo están basadas en investigación teórica, ensayos de campo y juicios por parte de agricultores, investigadores y agencias del gobierno. Idealmente, es necesario integrar modelos económicos y ambientales que sirvan como una herramienta en la selección de BPA's efectivas y eficientes tanto desde el punto de vista ambiental como del económico (Saleh et al., 2008; Kemp and Dodds, 2001). El entendimiento de los procesos de transporte de materia y energía asociados a procesos hidrológicos y manejo agrícola, puede ayudar en el entendimiento y la predicción de los patrones espacio temporales de los contaminantes, así como puede ayudar a mejorar las prácticas actuales, para reducir los efectos adversos de las actividades agropecuarias en el ambiente, la evaluación de esquemas alternativos es esencial. Para esta tarea, la simulación numérica es un método rápido y económico para analizar alternativas de manejo (Gardenas et al., 2005; Skaggs et al., 2004; Javaux et al., 2006; Prechtela and Knabner, 2002).

### **1.2.1. Medio ambiente y el sector productivo**

Fruto de la actividad agropecuaria se generan alta cantidades de desechos los cuales, al no ser manejados correctamente, pueden provocar impactos ambientales negativos, dado su alto contenido nutricional. Antiguamente, el manejo de

---

<sup>2</sup>Buenas practicas agrícolas

desechos (efluentes) no representaba un gran problema, debido a los bajos volúmenes producidos, el medio natural sean: agua, aire, suelo, eran capaces de asimilando y transformando estos desechos; sin embargo, esta situación ha cambiado, la agricultura y la ganadería tradicional han sido desplazadas por un tipo de producción intensivo basado exclusivamente en criterios económicos, que han generado graves consecuencias medioambientales (Sans, 2007; Olson and Kalischuk, 2008). Si los desechos producidos por la actividad agropecuaria no son manejados en forma eficiente, en un mediano a corto tiempo en el país se empezarán a percibir los impactos negativos generados en el ambiente, y seguramente existirán conflictos de intereses con respecto a la calidad ambiental, entre pobladores y productores agrícolas (Sperberg, 1996; Sepúlveda and Bastida, 2005).

La industria porcina esta asociada a importantes impactos ambientales en toda su cadena productiva, siendo los principales la: generación de purines; guano; residuos sólidos provenientes del manejo, recolección y almacenamiento de purines así como de productos para la salud animal, desinfectantes, antibióticos, etc.; olores, vectores; y contaminación de las aguas superficiales. Por lo anterior mencionado, la asociación de productores de cerdo en Chile, estipulo en uno de los puntos del acuerdo de producción limpia, la implementación, en el 100% de los planteles, de medidas para impedir la contaminación de aguas superficiales y subterráneas mediante la elaboración, aprobación e implementación, cuando proceda, de un proyecto de aplicación de residuos líquidos o purines al suelo.

La aplicación de residuos líquidos o purines al suelo es uno de los métodos más efectivos y económicos para afrontar la problemática de la acumulación de los desechos de tipo orgánico procedentes de la ganadería intensiva (Westerman

and Bicudo, 2005; Schröder et al., 2005; Carrasco et al., 2008). En términos agronómicos, la aplicación de materia orgánica incrementa la capacidad del suelo para retener la humedad y los nutrientes, el estiércol y el purín contienen niveles de nutrientes, lo cual permite reducir la aplicación de fertilizantes sintéticos o inorgánicos, de mucho mayor poder contaminante (CNPL, 2007). En definitiva, al aplicar el purín sobre un suelo agrícola lo que se hace, es restituir al suelo lo que han extraído los cultivos, cerrando el ciclo de los nutrientes (Figura 1.3) (Iosu and Abaigar, 2002).

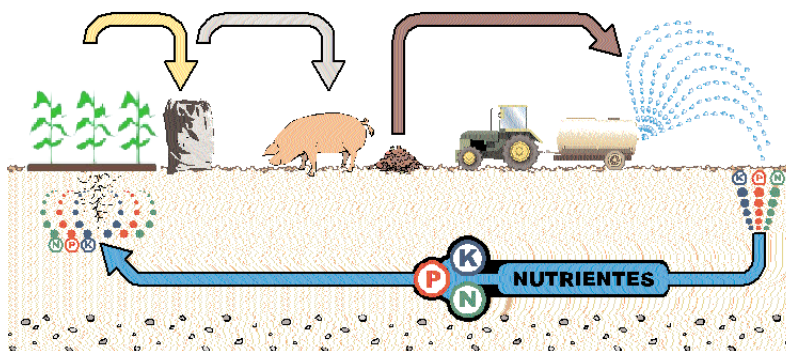


Figura 1.3: Ciclo de los nutrientes

El manejo de purines porcinos ha tomado importancia por dos razones: por una parte, la tendencia a aumentar el tamaño de los criaderos de cerdo, en sistemas de producción intensiva confinada, en donde se genera una cantidad considerable de desechos, y por otra, una mayor conciencia frente a la protección del medio ambiente por parte de la sociedad (Peralta et al., 2005; Llona and Faz, 2006). Tradicionalmente la incorporación de los residuos a las parcelas objeto de diversos cultivos ha sido el camino más fácil y económico, desde un punto de vista agronómico la aplicación no presenta, en principio, problemas insalvables siempre y cuando se manejen cantidades ajustadas a las necesidades del cultivo y el estado del suelo. Estrictamente el análisis químico de la composición de los residuos es clara: las concentraciones de nitrógeno, fósforo y potasio son muy importantes,

se trata justamente de los elementos minerales que los cultivos necesitan para su desarrollo, e indispensables para sustentar la agricultura, por lo que los aportes han aumentado drásticamente junto con la producción agrícola, y esto a su vez ha llevado a una mayor pérdida de N y P en el ambiente (Schröder et al., 2005); Surgen varias preguntas: ¿cuáles son las dosis precisas según el cultivo y suelo, se conoce el estado del suelo, las necesidades de la planta o la propia composición del residuo? Por otro lado es evidente que el sector de la ganadería intensiva ejerce una fuerte presión de “oferta“ que puede conllevar la utilización de criterios de gestión no ambiental ni agronómicos. Si en el plano agronómico la necesidad de nutrientes de los cultivos es una necesidad inapelable, y para la ganadería intensiva el suelo constituye el destino final del subproducto parece evidente que debe procederse a un estudio pormenorizado de esta situación (Mayoral, 2003). Sabiendo que el manejo incorrecto de los purines es actualmente uno de los procesos que provoca mayor deterioro ambiental (Dumont, 2000). Los purines por sus características físicas, químicas y biológicas, son potencialmente contaminantes afectando a los cursos de agua subterránea o superficial, aire y suelo; provocando turbidez, sedimentación, aumento de concentraciones de nutrientes, demanda biológica de oxígeno (DBO) y crecimiento excesivo de algas.

### **1.2.2. Composición y valoración de los purines de cerdo**

La generación de purines por unidad de cerdo, depende del sistema de manejo, del estado fisiológico del animal, calidad y cantidad de alimento ingerido, volumen de agua consumida, clima local, entre otros (Cuadro 1.1). El purin es el conjunto de orina, heces que produce el animal y agua de lavado. La orina representa aproximadamente el 45 % y las heces el 55 % del contenido volumétrico total de excretas, la humedad es cercana al 90 % y el contenido de materia seca es próximo al 10 %, adicional al volumen de excretas producido, se debe considerar el agua

utilizada en el lavado de los pabellones, la que si bien varia dependiendo el manejo de cada industria esta se encuentra en una relación aproximada de 1:6 a 1:18 (18 litros de agua de lavado por 1 litro de excreta)(Peralta et al., 2005)

Cuadro 1.1: Producción de excretas según el estado del animal.

Etapa animal	Peso (Kg)	Producción Excretas (L día <sup>-1</sup> )	Sólidos totales (kg día <sup>-1</sup> )	DBO <sub>5</sub> (kg día <sup>-1</sup> )	Sólidos volátiles (kg día <sup>-1</sup> )	Nitrógeno (kg día <sup>-1</sup> )	Fósforo (kg día <sup>-1</sup> )	Potasio (kg día <sup>-1</sup> )
Cría	16	1	0,09	0,08	0,08	0,01	0,01	0,01
Recría	29	1,8	0,18	0,14	0,14	0,01	0,01	0,01
Engorda	68	4,3	0,41	0,33	0,33	0,03	0,02	0,02
Gestación	125	4,2	0,37	0,3	0,3	0,03	0,02	0,02
Maternidad	170	15,1	1,36	1,09	1,09	0,1	0,08	0,08
Verraco	159	5,3	0,45	0,38	0,38	0,04	0,03	0,03

Fuente: Purdue University y U.S. Environmental Protection Agency, 2001

Si se cuantifica la cantidad diaria de purines producida por el número total de cabezas de cerdo que existen en Chile (2.945.370 de animales, según VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal el año 2007, INE (2009)), tomando como promedio 4,3 Lt/día de excretas por hembra y 6 Lt/día por litro de excreta en el lavado, se obtendría una cantidad cercana a los 89.000 m<sup>3</sup> diarios en promedio de purines, lo que genera un problema real en lo que respecta a manejo de desechos, pero a su vez abre una oportunidad, económica desde el punto de vista agronómico, ya que las excretas producidas por un animal al día contienen en promedio 0,036 kg de nitrógeno, 0,03 kg de fósforo y potasio (Allen and Embleton, 2001), que se traduce en 106 ton de nitrógeno y 88 ton de fósforo y potasio diario.

Valorar económicamente este recurso significa poder contar con un indicador de su importancia relativa, lo que permitirá entre otras cosas poder compararlo con otros recursos, sobre esto los purines no tienen un mercado definido donde se transen, por lo tanto carecen de un precio que valore sus características. Una forma de aproximarse a una valoración económica de los purines, es analizar

su disponibilidad como factor de producción y compararlo con un recurso con mercado definido. En este caso con los fertilizantes minerales, los cuales entre los años 2001 y 2008 han experimentado una clara tendencia al alza en los precios internos (Cuadro 1.2), esto en relación a que la demanda mundial ha continuado aumentando, como resultado de una mayor producción agrícola, con formas de cultivos más intensivos y un mayor costo de producción por el aumento en el valor de los combustibles (ODEPA, 2008).

Cuadro 1.2: Precios medios anuales de algunos fertilizantes US\$/ton.

Año	Urea	Superfosfato triple	Sulfato de potasio
2001	125	147	295
2002	128	145	271
2003	178	168	266
2004	236	207	297
2005	287	233	343
2006	271	230	365
2007	371	368	367
2008	527	884	701

Fuente: (ODEPA, 2008).

Si solo se valoriza los nutrientes contenidos en los purines de cerdos, tomando como comparación los fertilizantes minerales, sin tomar en cuenta valores intrínsecos, como el medio ambiental al mejorar su disposición final y las diferencia en las eficiencia inmediatas<sup>3</sup> de cada fertilizante, es una buena primera aproximación, para valorar este residuo. Debe tener presente la cantidad de cada nutriente contenido en los fertilizantes minerales; La urea contiene 46% de nitrógeno, el superfosfato triple 47% de fósforo y el sulfato de potasio 50% de potasio, utilizando los precios promedios entre los años 2001 y 2007, los nutrientes contenidos en los purines presentan los siguientes beneficios económicos diario,

<sup>3</sup>expresa la eficiencia de un elemento fertilizante aportado en forma de residuo con relación a un abono mineral

en cuanto a nitrógeno se obtiene 52.538 US\$, para el fósforo 40.067 US\$ y el potasio 55.440 US\$ diarios.

### **1.3. N-P-K en el purín**

En países desarrollados, la producción agropecuaria es considerada como una de las principales actividades productivas responsables de la contaminación difusa de cursos de agua, debido a que genera el enriquecimiento de éstas con nutrientes, principalmente N y P (Alfaro and Salazar, 2005; Sperberg, 1996). Se calcula que entre un 50 y un 90 % de la carga de nitrógeno en las aguas superficiales tiene su origen en las actividades agrarias (Martínez et al., 2002). Es posible aprovechar en gran medida la cantidad de nutrientes que posee como un subproducto para la agricultura (Zaror, 2000), por lo que es necesario la implementación de criterios ambientales en los campos de cultivo, para la aplicación de purín de cerdo, podría resultar una buena alternativa de fertilización. Sin embargo se convierte en contaminante si se utilizan los predios como vertedero. El factor clave que debemos controlar, tanto desde el punto de vista medioambiental como agronómico, es el nitrógeno, en la medida en que se consiga una buena eficacia en la aplicación del purín, reduciremos su impacto medioambiental (Iosu and Abaigar, 2002).

El suelo puede retener, modificar, descomponer o adsorber contaminantes, debido al gran número de microorganismos descomponedores, asimilación de las plantas, remoción durante las cosechas, materia orgánica que inmoviliza contaminantes y otros procesos que hacen de su perfil un medio ideal en los procesos de reciclado natural. El problema se produce cuando la carga de contaminantes excede la capacidad de asimilación de desechos del suelo, provocando una cadena de eventos con efectos perjudiciales por el movimiento de químicos almacenados en el suelo

y los sedimentos, en respuesta a una lenta alteración del ambiente (Arumí and Jimenez, 2000).

### 1.3.1. Nitrógeno en purines

En los purines, el nitrógeno puede estar presente en múltiples formas, y son numerosas las transformaciones que puede sufrir en los procesos de tratamiento (Figura 1.6). Estas transformaciones permiten convertir el nitrógeno amoniacal en otros productos fácilmente separables del purín residual. Los dos mecanismos principales que intervienen en este proceso son la asimilación y la nitrificación desnitrificación. Debido a que el nitrógeno es un nutriente, los microbios presentes en los procesos de tratamiento tenderán a asimilar el nitrógeno amoniacal y a incorporarlo a su masa celular. Una parte del nitrógeno amoniacal retornará al agua residual con la lisis<sup>4</sup> y muerte de las células. En el proceso de nitrificación desnitrificación, la eliminación de nitrógeno se consigue con dos etapas de conversión. En la primera, la nitrificación, se reduce la demanda de oxígeno del amoniaco mediante su conversión a nitrato. No obstante, en este paso, el nitrógeno apenas ha cambiado de forma y no se ha eliminado. En el segundo paso, la desnitrificación, el nitrato se convierte en producto gaseoso que es eliminado (Sepúlveda and Bastida, 2005; IUPA, 2008; Zaror, 2000).

### Transporte de nitrógeno

El principal mecanismo de pérdida de nitrógeno (N) asociado al movimiento de agua es la lixiviación de N inorgánico, principalmente como nitrato. El nitrato  $NO_3^-$  es un ión móvil que se encuentra normalmente en la solución del suelo. La cantidad presente dependerá del balance entre la cantidad de N aplicada como fertilizante, reciclaje o fijación biológica, la depositación atmosférica y la

---

<sup>4</sup>Rotura de la membrana celular

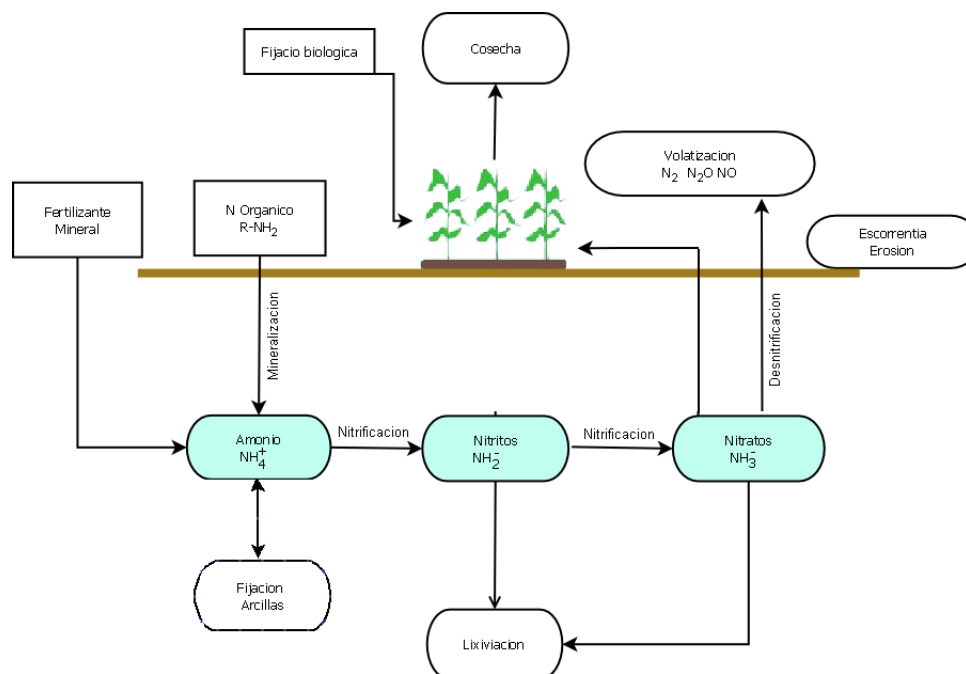


Figura 1.4: Ciclo del nitrógeno en el suelo

extracción de las plantas. Todo el N que al final del período de mayor crecimiento de las plantas, no haya sido utilizado por éstas, permanece en el suelo con riesgo de perderse por lixiviación a través del drenaje del exceso de agua que ocurre durante el invierno. Puede existir también en forma orgánica (en aminoácidos o proteínas de las plantas). Si su concentración en la materia orgánica es  $> 1.5\%$  ocurre mineralización, si es  $< 1.5\%$  ocurre inmovilización (unido a las arcillas). El N se pierde además, por la erosión del suelo, y la escorrentía, pudiendo también infiltrarse al agua subterránea, (Matta, 2007; Andreu et al., 2006; IUPA, 2008; Alfaro and Salazar, 2005) y (Novotny and Olem, 1994) citado por Merino (2009)

### 1.3.2. Fósforo en purines

El fósforo presente en purín proporciona una disponibilidad mayor que el proveniente de fertilizantes minerales, pero gran parte del valor nutritivo se pierde rápidamente por descomposición y lavado producto de un mal manejo del riego.

### Transporte de Fósforo

El fósforo (P) se presenta como ión fosfato, que puede existir en forma orgánica o inorgánica (Figura 1.5). La fuente de los fósforos orgánicos son las plantas y residuos de biomasa orgánica (humus del suelo), En general son los microorganismos (hongos y bacterias) los que producen la liberación del fósforo orgánico. Este fósforo liberado reacciona con la fracción mineral del suelo dando productos no solubles, siendo su movilidad tan pequeña como la de los fosfato inorgánicos, que son las rocas y minerales del suelo. El fosfato es importante en la nutrición de los ecosistemas acuáticos, al igual que el N, en exceso el P causa eutrofización. El P no es móvil en el suelo y es casi inexistente la lixiviación, ya que se une a las arcillas, partículas del suelo y materia orgánica. La cantidad de P en solución es pequeña, la mayoría es removida por asimilación de las plantas como  $HPO_4^{-2}$  (ión fosfato monoácido) y  $H_2PO_4^{-1}$  (ión fosfato diácido), escorrentía y por la erosión,(IUPA, 2008; Alfaro and Salazar, 2005; Arumí and Jimenez, 2000; Merino, 2009)

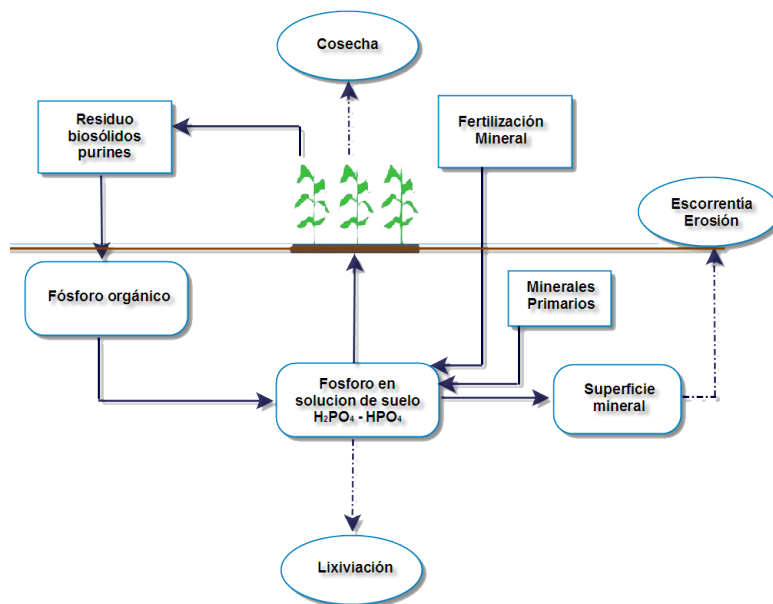


Figura 1.5: Ciclo del fósforo en el suelo

### 1.3.3. Potasio en los purines

El potasio está contenido casi exclusivamente en las orinas. Se encuentra en forma de sal mineral, soluble en agua (Iosu and Abaigar, 2002). Los niveles naturales de potasio en el suelo son muy variables en función del tipo de arcilla que contenga y del porcentaje de ésta en la fracción mineral del suelo. Las pérdidas de potasio por lavado son generalmente bajas, por su baja concentración en la solución del suelo. Sin embargo, puede lavarse con precipitaciones importantes en suelos arenosos. La necesidad del potasio por parte de las plantas son inferiores que las del nitrógeno y fósforo. En realidad, parte del potasio que absorben los cultivos es devuelto al suelo en los residuos, raíces, rastrojos, etc.. y con abonos orgánicos, sobre todo en estiércoles. En suma, el potasio no suele ser contaminante de aguas o suelos, debido a su capacidad para la fijación y para el intercambio iónico (IUPA, 2008).

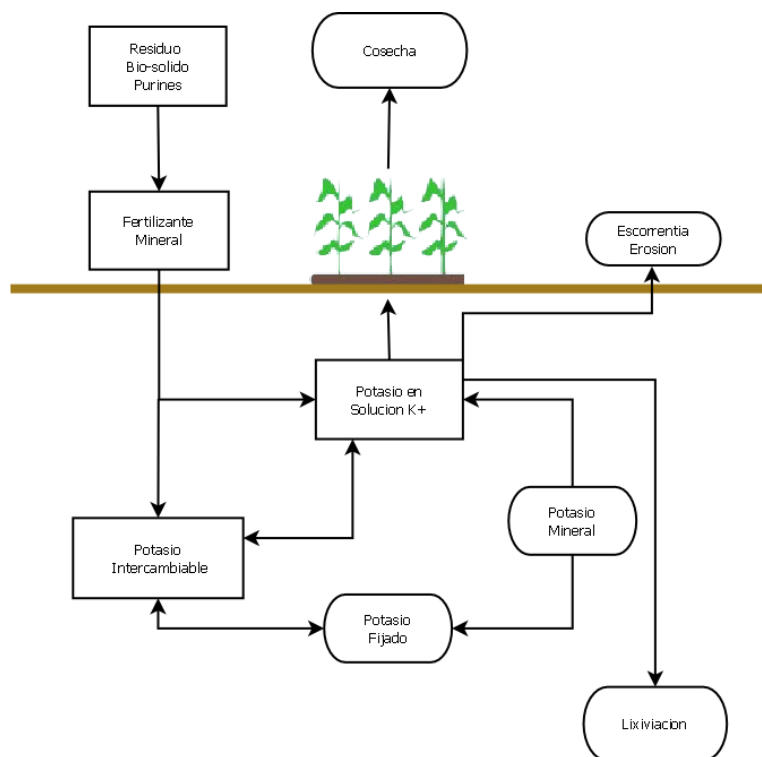


Figura 1.6: Ciclo del potasio en el suelo

## 1.4. Justificación y relevancia

La valoración del potencial impacto de la aplicación de purines de cerdo como fuente no puntual de contaminación a escala local, es necesaria como una base para el desarrollo de estrategias efectivas de manejo, con la finalidad de proteger recursos valiosos como lo son la tierra y el agua (Behera and Panda, 2006). El impacto de las estrategias de manejo como las BPA's o la producción limpia dependerá específicamente de las características medioambientales del área, además de las prácticas previamente utilizadas en el lugar. En general es importante cuantificar el real impacto ambiental y económico de las practicas agrícolas implementadas en los predios del valle central de Chile, con la finalidad de obtener mayor eficiencia del uso de los recursos y minimizar los impactos adversos en las operaciones de los predios. (Gassman et al., 2006)

Uno de los objetivos prioritarios en la gestión sustentable de los ecosistemas agrarios debe ser la protección y conservación de los recursos hídricos. La infiltración en el terreno de aguas con alto contenido en nutrientes, derivada del efecto combinado de una excesiva fertilización y prácticas de riego de baja eficiencia, contribuyen al deterioro de los mismos. Es más, si persiste el exceso de nutrientes en la solución del suelo en época de intercultivo, también pueden producirse lixiviación con el inicio de la temporada de lluvias (Arauzo et al., 2003). El resultado es que, cada vez con más frecuencia, se alcanzan concentraciones que pueden afectar a la salud humana (contaminación de aguas de abastecimiento) y a la calidad ambiental (procesos de eutrofización en ecosistemas acuáticos).

Una buena alternativa, para evaluar el impacto de la aplicación de purines de cerdo, es la utilización de modelos matemáticos, debido a que medir directamente los efectos de estos resulta de alto valor y los procedimientos son, lentos y difíciles (Arumí et al., 2000), estos modelos tienen por objeto la predicción del comportamiento de un contaminante en el ambiente. Este conocimiento es esencial en la prevención de los efectos perjudiciales para el ecosistema (Aquino, 1996). A su vez sirven como herramientas de gestión, especialmente, durante las etapas de estudios de factibilidad y de definición de las formas de operación recomendables para un predio agrícola, además, son de gran ayuda para definir medidas de mitigación de los impactos ambientales. En lugar de los costosos esfuerzos en monitoreos y pruebas de campo, un modelo de simulación computacional sirve como una herramienta para presentar información con el fin de formular políticas de manejo en los predios (Gassman et al., 2006; Arumí et al., 2000).

La necesidad de desarrollar un modelo computacional que ayude a realizar una

gestión sustentable de los purines de cerdo como una alternativa de fertilización y riego, nace de la complejidad que presentan los modelos ya existentes para su implementación, donde se necesita un grado elevado de conocimientos y familiaridad con ellos, que los productores en su mayoría no tienen, siendo modelos de investigación que presentan un alto grado de complejidad en su entendimiento y puesta en marcha. Una respuesta interesante a esta problemática es el desarrollo e implementación de un modelo integrado (asociado), que tome las habilidades y capacidades de, modelos individuales para conducir a una adecuada simulación colectiva y a una forma accesible de controlar y entender por el usuario.



# Hipótesis y objetivos

---

## 2.1. Supuestos de la investigación

La modelación matemática es una metodología de comprobado éxito en el descubrimiento y entendimiento de procesos o fenómenos subyacentes en la naturaleza. Basada en componentes observables y sus relaciones, es comúnmente usada en el estudio del comportamiento de los contaminantes. El cambio en el tiempo y el espacio de la concentración de estos, puede ser descrita por las ecuaciones de continuidad que expresan el balance entre las variaciones de la concentración de un contaminante y el efecto de flujos de transporte, fuentes, cuerpos receptores y manejo del área.

## 2.2. Hipótesis

Un modelo Pragmático<sup>1</sup> agro-ambiental para el manejo de los purines de cerdo a escala predial en Chile, es capaz de entregar información respecto al movimiento de agua, producción y transporte de contaminantes en los cursos de agua superficial y subterránea, lo que permitiría obtener recomendaciones y planes de manejo

---

<sup>1</sup>La palabra pragmatismo proviene del vocablo griego praxis que significa acción. Para los pragmatistas la verdad y la bondad deben ser medidas de acuerdo con el éxito que tengan en la práctica. En el pragmatismo no existe el conocer por conocer. Si algo no tiene un fin o uso determinado no hay razón para que tal cosa exista.

para un óptimo uso de los purines como bio fertilizantes, generando aumentos en las utilidades y mitigando la concentración de nutrientes en los cuerpos de agua receptores.

## **2.3. Objetivos de la Investigación**

En atención a los antecedentes revisados y el marco teórico expuesto, se definieron los siguientes objetivos para esta investigación.

### **2.3.1. General**

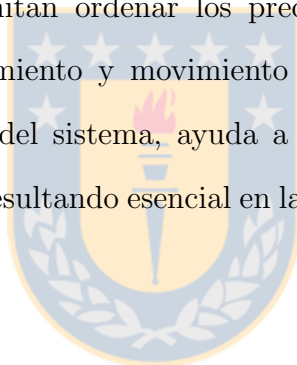
Desarrollar herramientas de gestión que permitan la aplicación de purines de cerdo, maximizando su efectividad como fertilizante y minimizando sus efectos contaminantes.

### **2.3.2. Específicos**

- ✦ Desarrollar una metodología de ordenamiento territorial que permita identificar y diferenciar los riesgos asociados a la aplicación de purines como alternativa de fertilización y disposición final en predios del Valle Central de Chile.
- ✦ Desarrollar un Sistema de soporte de decisión para la gestión de los purines de cerdo como bio-abono, tomando como referencia el modelo conceptual del fundo San Guillermo, donde se integren el módulo hidrológico y los módulos de transporte y balance de fósforo, nitrógeno.

## **2.4. Alcances**

La fertilización con purines de cerdo, el cual es abundante en muchas áreas, podría proporcionar una interesante forma de reducir los costos de producción y a la vez ayudar al problema de disposición final de estos. La aplicación de purines al suelo ha sido una práctica comúnmente utilizada por la agricultura intensiva, pero está debe ser correctamente implementada para maximizar la fertilización y evitar efectos negativos al medio ambiente. Es importante entender el alcance de las diferentes alternativas de manejo de este recurso, en las condiciones medioambientales, y la pérdida difusa de los nutrientes, por consiguiente establecer herramientas que permitan ordenar el predio entendiendo su heterogeneidad y evaluar el comportamiento y movimiento de los nutrientes en el suelo bajo características propias del sistema, ayuda a reducir el efecto contaminante del nitrógeno y el fósforo, resultando esencial en la implementación de una agricultura sustentable.



## **2.5. Recursos**

Esta investigación se enmarca en el proyecto INNOVA Bío-Bío, código 07-PC S1-198 cuyo título es "Generación de información para el diseño y operación de sistema de tratamientos de bajo costo y ambientalmente sustentables para plantales porcinos: ejecutado por la Universidad de Concepción. Lo que garantiza los fondos necesarios para equipos, monitoreos, análisis de laboratorio, movilización, entre otros, además se cuenta con el respaldo académico del Departamento de Recursos Hídricos, El Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile y Agrícola Yanine, propietaria de Fundo San Guillermo.

# Zona de estudios

---

## 3.1. Escala regional

El área de estudio (Figura 3.1) se encuentra aproximadamente a 22 km al noreste de la ciudad de Chillán, Comuna de Coihueco, provincia de Ñuble, región del Bío-Bío, Chile.



Figura 3.1: Comuna de ubicación del área de Estudios

Se encuentra ubicado en la zona hidrológica, que conforman los río Cato y Ñuble, siendo su principal actividad la agricultura, con una superficie aproximada de 459  $km^2$ , representando un 10% de la provincia de Ñuble. El area de riego alcanza

un 24,7%, es decir, 10.151 ha, y la agricultura de secano un 65,7% equivalente a 19.448 ha. Limita por el oriente con el estero Los Guindos en el sector bajo de la Cordillera de los Andes, el límite poniente corresponde a la junta de los ríos Cato y Ñuble, limita al sur con el río Cato y al norte con el río Ñuble, (Figura 3.2).

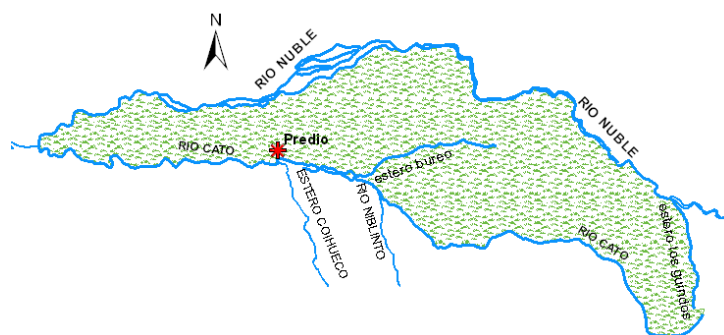


Figura 3.2: Zona donde se encuentra inmersa el área de estudio

El río Cato, es de régimen pluvial.<sup>1</sup> Sus mayores caudales ocurren en los meses de invierno. En años húmedos los mayores caudales se presentan entre los meses de junio y agosto, mientras que los menores caudales ocurren entre enero y marzo, período en que se observan severos estiajes (D.G.A., 2004), sus principales afluentes son el río Niblinto y estero Coihueco.

El río Ñuble es de régimen mixto (nivopluvial)<sup>2</sup>, Su caudal es relativamente estable durante el año, en invierno por el aporte de lluvias y en verano al elevarse las temperaturas, por el derretimiento de las nieves. su principal afluente es el río Los Sauces.

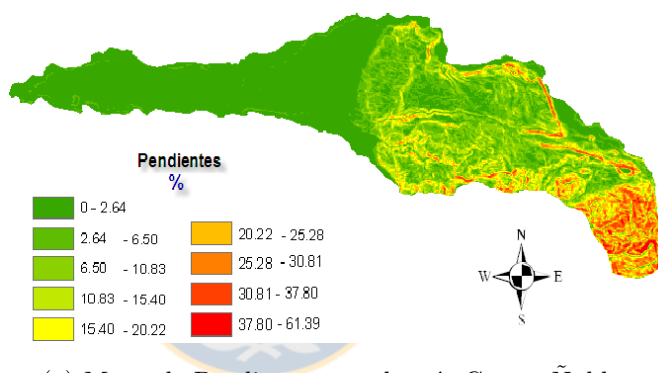
El área se encuentra bajo la influencia de un bioclima mediterráneo y presenta al menos dos meses consecutivos del período estival con déficit hídrico (D.G.A., 2004). La temperatura promedio anual es de 14,1°C, con una mínima de 7,6°C y

<sup>1</sup>Su caudal es estrictamente determinado por el régimen de precipitaciones

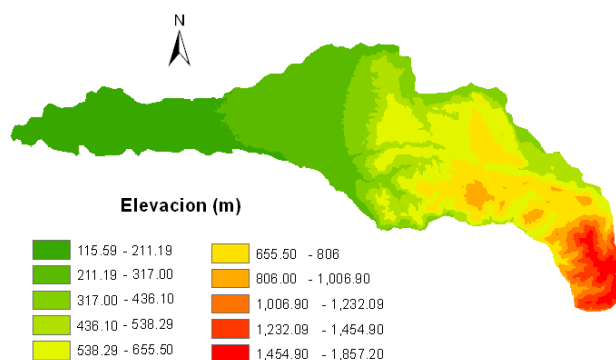
<sup>2</sup>Su caudal procede de las lluvias y del derretimiento de las nieves

una máxima de 20,6°C. La precipitación promedio es de 85,4 mm y el total anual de agua caída es de 1.025 mm.

Las pendientes, (Figura 3.3a), en la parte baja varían entre 2 a 6%, esta zona no presenta quebradas profundas ni elevaciones de consideración (Torres, 2006), y es donde se desarrolla la actividad agricultura del Valle, en comparación con la parte alta, donde las pendientes varían entre 30 a un 50 % siendo zonas no aptas para el la explotación agrícola pero de un gran valor patrimonial por su belleza. La cuenca presentan alturas, (Figura 3.3b), que van desde 115 msnm<sup>3</sup> a los 1850 msnm, lo que genera características climáticas muy variadas dentro de ella.



(a) Mapa de Pendiente entre los río Cato y Ñuble.



(b) Mapa de elevación entre los río Cato y Ñuble.

Figura 3.3: Información espacial de la cuenca

Los suelos presentes son formados sobre cenizas volcánicas recientes (postglaciales)

<sup>3</sup>Metros sobre el nivel del mar

depositadas sobre material fluviales, fluvio-glaciales, entre otros, pero no cementados. En estos suelos predomina las texturas franca limosa y arcillosas (Torres, 2006). En la zona existe una importante interacción entre el sistema de aguas subterráneas entre los ríos Cato y Ñuble; el flujo de aguas subterráneas tiende a ser paralela a la red de drenaje superficial del río Ñuble, producto de los rellenos o depósitos de conglomerados de origen coluvial<sup>4</sup> con alta permeabilidad (D.G.A., 2004), drenando sus aguas a través del río Cato. Tanto el río Ñuble como las infiltraciones de aguas lluvias y pérdidas de los sistemas de riego actúan como recarga para el acuífero superficial (Torres, 2006).

### 3.1.1. Modelo hidrológico del Valle

La hidrología de una región está determinada por sus patrones de clima tales como topografía, la geología y vegetación. La actividad humana modifica gradualmente el medio ambiente alterando el equilibrio dinámico de ciclo hidrológico e iniciando nuevos procesos y eventos (Chow et al., 1994). Cada cuenca presenta características únicas que la identifican y diferencian de su entorno. Sin embargo, los procesos hidrológicos que en ellas se desarrollan son similares: precipitación, infiltración, evapotranspiración y escurrimiento (Belmonte and Núñez, 2006). La caracterización hidrológica de las cuencas es de gran importancia ya que permite conocer y comprender los procesos que en ella se llevan a cabo tales como direcciones de flujo superficial y subterráneos, caudales máximos, almacenamiento de agua, entre otros. Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y es posible que nunca se entiendan en su totalidad, sin embargo en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden representarse en forma simplificada por medio del concepto de sistema<sup>5</sup>(Chow et al., 1994).

---

<sup>4</sup>Dícese de los suelos generados por materiales depositados por gravedad al pie de una pendiente.

<sup>5</sup>Conjunto de partes conectadas entre si, que forman un todo.

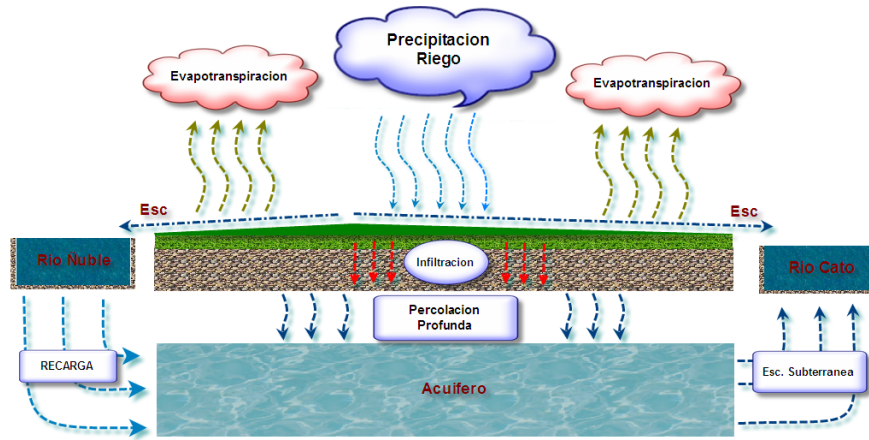


Figura 3.4: Modelo conceptual de los procesos hidrológico de la cuenca.

### 3.2. Área local

Todas las actividades relacionadas con el proyecto de investigación se realizarán en el predio Fundo San Guillermo, (Figura 3.5), cuya superficie de 240 has, se ubica en el Km. 22 de la Ruta N-45 en Tres Esquinas de Cato, Comuna de Coihueco, provincia de Ñuble, región del Bío-Bío, Chile.



Figura 3.5: Imagen Satelital del predio (Google Earth)

El fundo presenta dos terrazas, con topografía plana a casi plana y una diferencia de cota de aproximadamente 30 m entre ellas, además cuenta con 3 unidades de explotación (Figura 3.6a). Un plantel porcino de engorda para 8.000 hembras siendo ésta su actividad principal de explotación, ella genera una importante cantidad de desechos orgánicos biodegradables 96  $m^3$  día de purines, lo que trae consigo un problema de manejo ambiental, por lo que el fundo estableció como objetivo dar un uso y disposición óptima de los desechos orgánicos, dando la posibilidad de utilizarlos como materiales de fertilización, para la producción agrícola de maíz, remolacha, trigo, avena y achicoria, permitiendo a su vez en el mediano plazo reducir o suprimir la incorporación de fertilizantes artificiales a los suelos agrícolas. Para cumplir la Norma Chilena Oficial NCh 1.333, que establece requisitos de calidad del agua para diferentes usos, entre ellos los requisitos de agua para riego, sus instalaciones cuentan con sistema de tratamiento de purines, tales como decantadores, separador parabólico, micro prensado, separador centrífugo, laguna anaeróbica y humedal superficial.

La segunda unidad del fundo San Guillermo, en el que se destina el 70% de su superficie, es la explotación de huertos frutales con manejo orgánico cuyo destino es la exportación. Todos estos huertos se encuentran protegidos ya sea por barreras naturales como son el río Cato y las pequeñas quebradas, además de barreras artificiales como canales, que funcionan de biofiltros<sup>6</sup> y amortiguadores naturales<sup>7</sup>, lo que en su conjunto realizan la labor de una microcuenca.

La última unidad de explotación consiste en cultivos de rotación, con la finalidad

---

<sup>6</sup>La biofiltración se caracteriza por el uso de una matriz orgánica, la cual provee el sostén para el desarrollo y proliferación de una serie de microorganismos los cuales procesan y degradan varios tipos de contaminantes al quedar estos atrapados en la matriz orgánica.

<sup>7</sup>Vegetación existente en las zonas ribereñas. Estas zonas ayudan a proteger la calidad del agua filtrando los contaminantes, los sedimentos y los nutrientes de los derrames y ayudan a controlar las inundaciones, a estabilizar el lecho del cauce y a controlar su temperatura

de producir la materia prima para abastecer la alimentación requerida por el plantel porcino y disminuir los costos de producción de éste, los cultivos son regados con purines previamente tratados, por lo que se necesita una planificación de riego, conocimientos del balances de nutrientes, clima, entre otros, con el fin de evitar la contaminación de las agua.

La presencia de los niveles freáticos se encuentra entre 2 a 6 m de profundidad (Figura 3.6b), un nivel freático a poca profundidad puede constituir un serio problema para la producción agrícola, el efecto puede ser perjudicial al limitar la respiración de las raíces, ya que el suelo encuentra en una condición de saturación. El conocimiento de la profundidad del nivel freático permite al agricultor definir los cultivos más adecuados para la condición del campo; además, cuando los niveles freáticos se encuentran cercanos de la superficie, todas las labores de fertilización y aplicación de pesticidas tendrán un rápido efecto sobre el acuífero, si estas no se realizan en forma correcta.

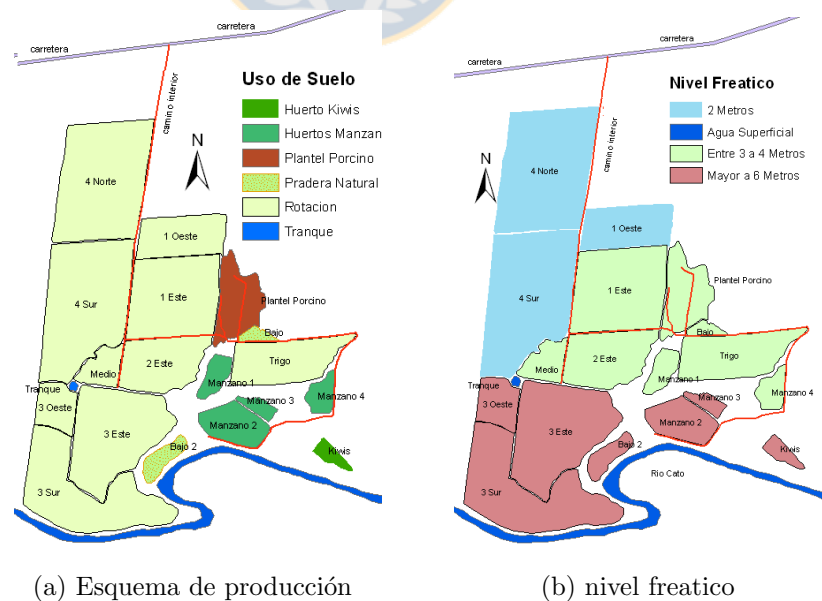


Figura 3.6: Información espacial del predio

**3.2.1. Suelos**

Los suelos en Chile son variados, debido a la gran cantidad de procesos que han intervenido en su origen, asociado principalmente a procesos geológicos, geomorfológicos, climáticos y a la actividad volcánica que está presente en todos los eventos modeladores del paisaje natural (Pinto et al., 2004).

Muchas veces los planes de manejo predial consideran los suelos como unidades homogéneas, lo que provoca problemas de degradación de suelos y contaminación de las aguas. Esto se produce por que la cantidad de agua aplicada es mayor que la capacidad de retención del suelo, por ende el agua infiltrará hacia zonas en las que las raíces del cultivo no pueden acceder, arrastrando consigo sustancias las cuales contaminaran los acuíferos, además de la posibilidad de producir escorrentías superficiales lo que provocara pérdida de suelo y arrastre de contaminantes. Conocer la textura y profundidad del suelo es una información valiosa para planificar la cantidad de agua a aplicar, minimizando la percolación, evitando así el lavado del suelo que puede arrastrar fertilizantes y pesticidas, entre otros.

**3.2.2. Impacto de los canales de riego**

Un aspecto poco considerado, son los impactos que los canales de regadío han generado en la estructura y funcionamiento de los sistemas hidrográficos intervenidos por el riego, ya sea alterando los flujos y caudales, como también el incremento de la superficie expuesta. La interacción entre los sistemas de riego, aguas subterráneas y la hidrológia de un valle se observa en fenómenos como la recarga del agua subterránea por la filtración de canales y la generación de flujo base por excesos de agua aplicada a los cultivos (Fernald, 2002). El uso de agua para riego produce modificaciones hidrológicas, así como alteraciones

en la morfología y sedimentología del cauce, además genera aumentos en la concentración de sales en solución en el agua y la incorporación de diversos elementos químicos en el ciclo hidrológico, tanto en lo que se refiere al agua superficial como a la subterránea (Habit and Parra, 2001).

El riego no sólo actúa como una fuente de recarga, sino que se transforma en una condición de frontera que determina localmente los patrones de flujo y el tiempo de residencia en la zona vadosa del potencial soluto, la interacción entre los sistemas de aguas superficiales, de riego y subterráneas, afecta, y de cierta manera determina, las condiciones de manejo de la agricultura dentro de una cuenca o microcuenca y la planificación de riego (Rivera et al., 2007).

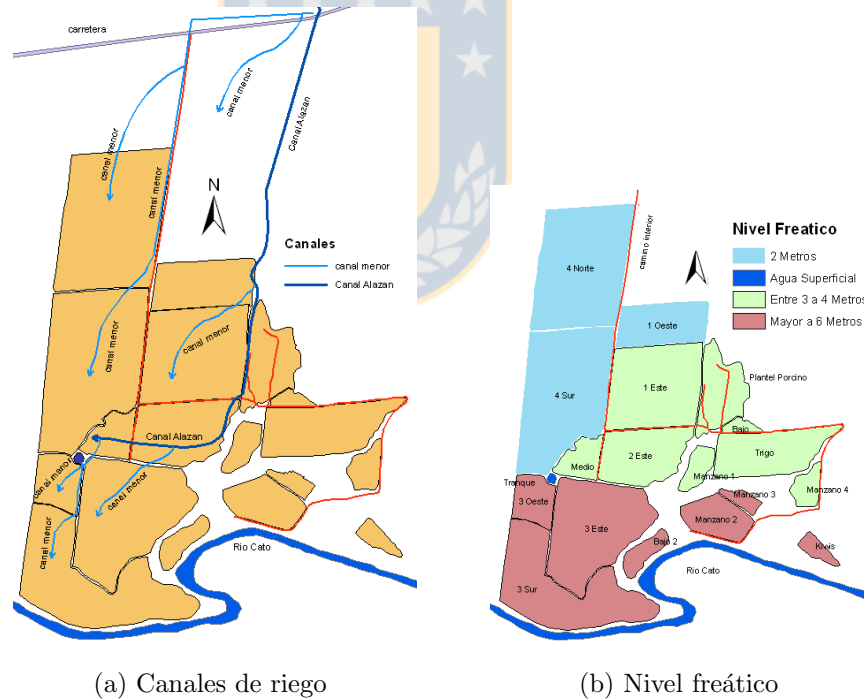


Figura 3.7: Información espacial del predio.

### 3.2.3. Modelo Conceptual del fundo San Guillermo

El monitorio y la modelación son herramientas cooperativas en el proceso de gestión y planificación de nuestros procesos productivos (Rivera et al., 2005), estas herramientas de no ser correctamente integradas pueden llegar a entregar resultados contradictorios o incorrectos, por lo que deben ser vinculadas con un modelo conceptual de nuestro sistema de interés, "principio de similitud" (Figura 3.8) (Rivera, 2006). Esta vinculación permitirá relacionar los diferentes procesos que ocurren en nuestro sistema y sus escalas espacio temporal, facilitando la toma de decisiones tanto de los puntos y periodicidad del monitoreo de los diferentes parámetros, y la correcta elección del modelo de simulación, en el cual las ecuaciones, describan correctamente, los fenómenos a estudiar, obteniendo así una adecuada correspondencia entre los datos recolectados en terreno y los obtenidos en la simulación, la cual permita una razonable evaluación y calibración del modelo de simulación.

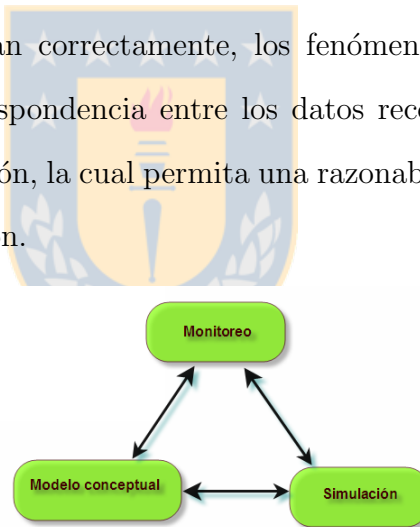



Figura 3.8: Principio de similitud

En el modelo conceptual del fundo San Guillermo, se deben enlazar los procesos y subprocesos que están involucrados en alcanzar un manejo sustentable. Debe tenerse en consideración que la escala de trabajo se encuentra relacionada con el tiempo de respuesta de algunos procesos, debiendo ser la apropiada para el análisis del fenómeno o sistema que se pretenda estudiar.

# Metodología para identificar zonas de riesgo ambiental debido a la aplicación de purines<sup>1</sup>

---

## Resumen



Frente a los requerimientos ambientales de los mercados nacionales e internacionales, las empresas del sector agropecuario chilena, se han visto en la necesidad de incorporar tratamientos y estrategias para la disposición de sus riles dentro de sus procesos productivos. Esto ha creado una gran presión y la necesidad de contar con herramientas de gestión ambiental simples, robustas y basadas en información disponible que permitan cumplir con las normas medioambientales vigentes. En este trabajo se desarrolló una metodología utilizando conjuntos difusos, contruidos con funciones de pertenencia, para identificar zonas susceptibles a la pérdida de nutrientes, donde existe un elevado riesgo de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales. La metodología propuesta es sencilla, flexible y resulta fácilmente adaptable a la realidad de los predios, lo que permite

---

<sup>1</sup>Environmental Monitoring and Assessment Volume 184, Number 6 (2012), 3915-3928, DOI: 10.1007/s10661-011-2233-1

mejorar la gestión y uso sostenible de los ecosistemas, a través de la mejora de las actividades de planificación y uso de las tierras. Esta metodología no se limita sólo a aproximaciones cuantitativas, sino que engloba aspectos cualitativos en los procesos dinámicos, afectados por las combinaciones antrópicas y la naturaleza de la zona. Se aplicó la metodología en un predio, donde se realizó una conceptualización de la gestión del fundo, el cual tiene una superficie de 240 hectáreas donde se incluye: un plantel porcino de 12.000 hembras, 100 hectáreas de huerto orgánico y 140 hectáreas de cultivos de rotación donde se disponen las aguas residuales del plantel porcino. Aplicando la metodología desarrollada, fue posible identificar los sectores de mayor riesgo ambiental asociados a la utilización de purines de cerdo como bio-abono.

## **4.1. Introducción**

La producción de cerdos en Chile ha tenido un rápido desarrollo en los últimos 10 años, con un incremento promedio anual de 21,4 % debido al aumento del consumo interno y a la apertura de nuevos mercados de exportación (Peralta et al., 2005; Echavarrí, 2009). El sector productor de cerdos en Chile se ha visto sometido a una gran presión para reducir en forma significativa sus emisiones contaminantes, principalmente por las restricciones impuestas en mercados internacionales, así como por la evolución que ha tenido la regulación y fiscalización a nivel nacional. Esto, se suma a una creciente sensibilidad social que se ha traducido en una mayor conciencia de los ciudadanos, consumidores, trabajadores y empresarios sobre la existencia de la contaminación y su impacto sobre la salud y la calidad de vida.

Si los desechos generados por la actividad agropecuaria no son manejados en

forma correcta, en el mediano a corto plazo en el país se empezarán a percibir los impactos negativos generados en el ambiente, y seguramente existirán conflictos de intereses con respecto a la calidad ambiental, entre pobladores y productores (Sperberg, 1996; Sepúlveda and Bastida, 2005). La aplicación de residuos líquidos o purines al suelo es uno de los métodos más efectivos y económicos para afrontar la problemática de la acumulación de los desechos de tipo orgánico procedentes de la ganadería intensiva (Westerman and Bicudo, 2005; Schröder et al., 2005; Carrasco et al., 2008). En términos agronómicos, la aplicación de estiércol y el purín incrementa la capacidad del suelo para retener la humedad. Además incrementa el contenido de nutrientes, lo cual permite reducir la aplicación de fertilizantes sintéticos o inorgánicos (CNPL, 2007).

El manejo de purines porcinos ha tomado importancia por dos razones: la tendencia a aumentar el tamaño de los criaderos de cerdo, en sistemas de producción intensiva confinada, en donde se genera una cantidad considerable de desechos, y por otra, una mayor participación frente a la protección del medio ambiente por parte de la sociedad (Peralta et al., 2005; Llonca and Faz, 2006). Tradicionalmente la incorporación de los purines a las parcelas ha sido el camino más fácil y económico para hacer frente al problema de su disposición final. Desde un punto de vista agronómico la aplicación no presenta, en principio, problemas insalvables, siempre y cuando se manejen cantidades ajustadas a las necesidades del cultivo y el estado del suelo, considerando que el mal manejo de los purines es actualmente uno de los procesos de la actividad agropecuaria que provoca mayor deterioro ambiental (Dumont, 2000). Sin embargo, la ganadería intensiva ejerce una fuerte presión de “oferta” que puede conllevar la utilización de criterios de gestión no ambientales ni agronómicos. En otras palabras, “colocar” o “eliminar” antes que “aprovechar”. En países desarrollados, la producción agropecuaria es

considerada como una de las principales actividades productivas responsables de la contaminación difusa de cursos de agua, debido a que genera el enriquecimiento de éstas con nutrientes, principalmente N y P (Alfaro and Salazar, 2005; Sperberg, 1996).

La valoración del potencial impacto de la aplicación de purines de cerdo como fuente no puntual de contaminación a escala local, es necesaria como una base para el desarrollo de estrategias efectivas de manejo, con la finalidad de proteger recursos valiosos como lo son la tierra y el agua (Behera and Panda, 2006). Uno de los objetivos prioritarios en la gestión sustentable de los ecosistemas agrarios debe ser la protección y conservación de los recursos hídricos. Una buena alternativa, para evaluar el impacto de la aplicación de purines, es la utilización de modelos matemáticos, debido a que medir directamente los efectos de estos resulta de alto valor y los procedimientos son lentos y difíciles (Arumí et al., 2000). Un modelo de simulación sirve como una herramienta para presentar información con el fin de formular políticas de manejo en los predios (Gassman et al., 2006; Arumí et al., 2000), en donde el monitoreo y la modelación son herramientas cooperativas en el proceso de gestión y planificación de los procesos productivos (Rivera et al., 2005). Estas herramientas de no ser correctamente integradas pueden entregar resultados contradictorios o incorrectos, por lo que deben ser vinculadas con un modelo conceptual del sistema de interés (principio de similitud, (Rivera, 2006)). La vinculación permitirá relacionar los diferentes procesos que ocurren en el sistema y sus escalas espacio temporales, facilitando la elección correcta del modelo de simulación, que describa correctamente, los fenómenos involucrados.

Aún cuando el principio de similitud es de gran ayuda en el proceso de modelación, no permite definir puntos del predio, donde se obtendrían datos representativos de

la dinámica del sistema, necesarios para evaluar y validar la modelación a realizar. Luego nace la necesidad de desarrollar un índice de riesgo y vulnerabilidad el cual enlace las variables ecológicas y administrativas, necesarias para identificar, clasificar y ordenar el territorio en el ámbito predial, considerarse como una aproximación inicial al problema de representación y medición de los fenómenos en un sistema Fig(4.1).

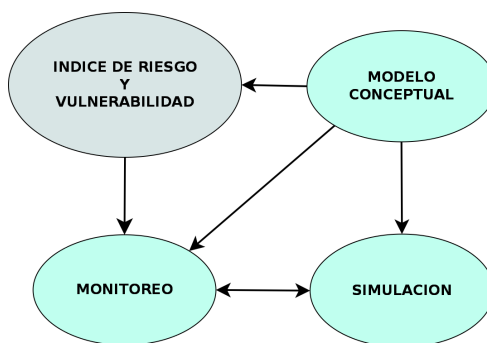


Figura 4.1: Principio de similitud modificado de (Rivera, 2006)

En este trabajo se propone una metodología para identificar zonas de riesgo ambiental, utilizando índices de vulnerabilidad y riesgo a través de la superposición de mapas temáticos re-clasificados (uso y tipo de suelo, manejo predial, fertilización, etc.). La metodología permitirá identificar zonas susceptibles a pérdidas de nutrientes producto de la aplicación de purines de cerdo con el fin de facilitar la toma de decisiones, y así minimizar los efectos negativos de esta actividad sobre los cursos de agua, y ser una herramienta cooperativa en el proceso de modelación y gestión de un predio agropecuario. La metodología se aplicó en un predio tipo del Valle central de Chile, con la finalidad de evaluar sus resultados. Conceptualmente la metodología valorara, de manera simple el riesgo asociado a la aplicación de purines y su potencial afección sobre el medio receptor. Para esto se considerara la propia fuente de peligro (purín), los elementos y sistemas dispuestos para su control, su posible transporte y la vulnerabilidad del medio receptor. En este contexto, la cartografía de riesgo y vulnerabilidad puede constituir una

herramienta alternativa o complementaria, muy eficaz para la gestión del riesgo (Belmonte et al., 2008) vinculada al ordenamiento territorial sobre la aplicación de purines.

## **4.2. Materiales y métodos**

La metodología propuesta permitirá evaluar cualitativamente el riesgo ambiental asociado a la aplicación de purines de cerdo. En general podrá ser usada para evaluar zonas de alto riesgo de contaminación de aguas subterráneas y superficiales, en un predio donde se utiliza el purín como bio-abono. Mediante índices de vulnerabilidad y riesgo la metodología permitirá caracterizar los predios, permitiendo realizar un ordenamiento territorial de acuerdo a las necesidades diferenciadas de manejo dentro de la unidad productiva.

### **4.2.1. Vulnerabilidad y riesgo**

Cualquier actividad humana esta asociada a ciertos niveles de riesgos, entendiéndose este como la eventualidad o probabilidad de que ocurra un hecho capaz de producir un efecto adverso, daño o perjuicio sobre el sistema en estudio (Pruzzo, 2006; Gómez, 2001). Por esta razón es necesario que el riesgo sea identificado y jerarquizado, de tal manera que se pueda determinar si es aceptable o debe ser reducido.

Para hacer frente a los riesgos, es necesario el conocimiento de las amenazas “peligro” entendiéndose este como los eventos, situaciones, agentes o elementos que tienen el potencial de producir efectos adversos o consecuencias indeseadas sobre el sistema vulnerable que se entiende como la disposición de ser afectado

por estos peligros. Es importante conocer las maneras en las cuales los peligros y las vulnerabilidades cambian en un breve o largo período de tiempo y el efecto de las acciones asumidas con base a este conocimiento (Naciones Unidas, 2005; Gómez, 2001; Cardona, 2001).

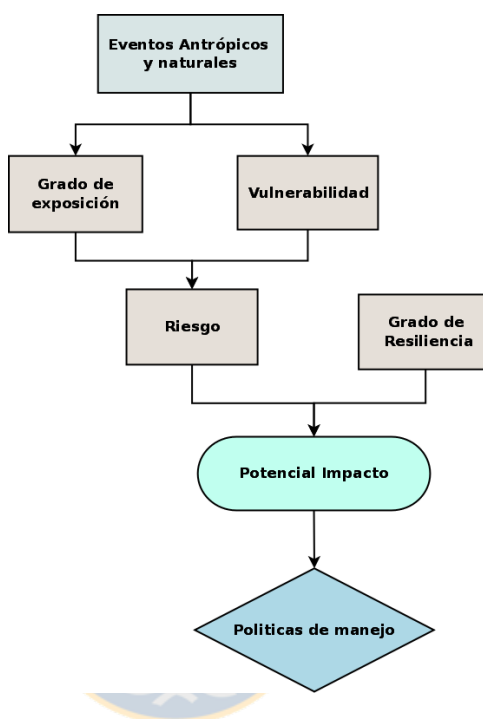


Figura 4.2: Diagrama de la vulnerabilidad, elaboración propia

Un análisis de vulnerabilidad y riesgo no se limita sólo a aproximaciones cuantitativas, sino que engloba también aspectos cualitativos (Birkmann and Nishara, 2008) y debe entenderse como un proceso dinámico, afectado por las combinaciones antrópicas y eventos naturales extremos, determinadas por el grado de exposición o grado al cual el ecosistema entra en contacto con una amenaza en particular, la sensibilidad o grado de afectación a esté y la capacidad de adaptación o resiliencia Fig(4.2) (Gómez, 2001; Birkmann and Nishara, 2008). No se puede ser vulnerable si no se esta amenazado y no existe una condición de amenaza para un sistema si no esta expuesto y es vulnerable a la acción potencial que representa dicha amenaza (Cardona, 2001). Esto se refiere a que distintos sistemas puedan

enfrentar a la misma amenaza, no significa que sean igualmente vulnerables. Es importante reconocer también que la vulnerabilidad es una propiedad dependiente de la escala espacio temporal (Belmonte et al., 2008; Birkmann and Nishara, 2008), donde situaciones de baja vulnerabilidad a escala de cuenca pueden estar enmascarando situaciones de alta vulnerabilidad a escala predial.

Para enfrentar un análisis de vulnerabilidad y riesgo la metodología debe adaptarse a las necesidades específicas de cada caso, así como las combinaciones de información cuantitativa, cualitativa, además de la escala del sistema en estudio. En otras palabras se recomienda el diseño de una metodología específica, que, en función de la información disponible y de las características del área de estudio, se ajuste al problema y la escala de análisis (Birkmann and Wisner, 2006; Belmonte et al., 2008). Una forma de hacer frente y verbalizar el análisis de vulnerabilidad y riesgo es la utilización de la Inferencia difusa la que es fácil de interpretar ya que se basa en el lenguaje natural lo que proporciona una mejor comunicación entre el experto y el productor (Llano et al., 2007; Zarandi et al., 2007).

#### **4.2.2. Inferencia Difusa**

Los seres humanos interpretan, toman decisiones y obtienen conclusiones con una cantidad significativa de información imprecisa e incorrecta, por lo anterior la teoría de lógica difusa en conjuntos difusos es una herramienta importante para modelar incerteza y procesar información vaga o subjetivas en modelos matemáticos, (Cano et al., 2009; Llano et al., 2007; Arumí and Jones, 2001), entendiéndose que la mayoría de los fenómenos con los que nos encontramos diariamente son imprecisos, es decir, tiene cierto grado de difusidad en su naturaleza (Serna et al., 2008)

La teoría clásica de conjuntos sólo contempla la pertenencia o no pertenencia de un elemento a un conjunto ecuación(4.1), sin embargo la teoría de conjuntos difusos contempla la pertenencia parcial de un elemento a un conjunto, es decir, cada elemento presenta un grado de pertenencia a un conjunto difuso, este grado de pertenencia se define mediante la función característica asociada al conjunto difuso.

$$x = \begin{cases} Verdadero, & \text{si } x \in A; \\ Falso, & \text{si } x \notin A; \end{cases} \quad (4.1)$$

El concepto de conjunto difuso reside bajo la idea de que los elementos sobre los que se construye el pensamiento humano no son números sino etiquetas lingüísticas (Pueyo, 2005). La lógica difusa permite representar el conocimiento común, que es mayoritariamente del tipo lingüístico cualitativo y no necesariamente cuantitativo, en un lenguaje matemático a través de la teoría de conjuntos difusos y funciones características o de pertenencia asociadas a ellos, las cuales pueden ser lineales o lineales por tramos y expresan el grado de pertenencia de un elemento a un conjunto (Llano et al., 2007; Zarandi et al., 2007; Arumí and Jones, 2001). Esta técnica, posee la habilidad de procesar simultáneamente la información subjetiva proveniente de un equipo de expertos y la información objetiva recopilada mediante datos del sistema en estudio (Medellín et al., 2004). La técnica se basa en un conjunto de reglas expresadas por relaciones lingüísticas de tipo *Si (X<sub>1</sub> es A<sub>1</sub>) y (X<sub>2</sub> es A<sub>2</sub>) ... (X<sub>n</sub> es A<sub>n</sub>) Entonces (Y es B)* donde X<sub>i</sub> son las variables de estado del sistema, Y es la variable a controlar, A<sub>i</sub> y B son etiquetas lingüísticas. Este tipo de lógica toma valores arbitrarios, pero contextualizados y referidos entre sí. Luego por medio de la inferencia difusa se interpretan los valores en el vector de entrada y basado en algún conjunto de reglas asigna valores al vector de salida (Lee, 1990), Fig(4.3).

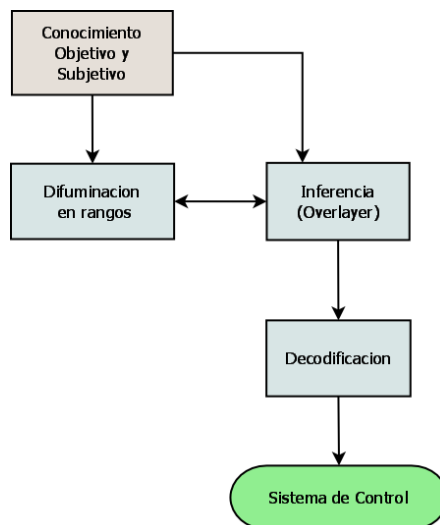


Figura 4.3: Diagrama de inferencia lógica

### 4.2.3. Análisis del sistema

Para desarrollar esta metodología, el primer paso se basa en la construcción de un modelo conceptual donde se representan las condiciones locales del área de estudio, identificando y jerarquizando las variables claves que pueden afectar directa o indirectamente las condiciones medio ambientales relacionadas con la lixiviación y arrastres de nutrientes, que están asociados a la degradación de los cuerpos de aguas. La Fig(4.4) muestra el modelo conceptual para un predio tipo del Valle central de Chile donde se utilizan purines como un complemento en la fertilización y el riego. En ella se advierte que los factores claves para conseguir un manejo ambientalmente sustentable, minimizando las pérdidas de nutrientes, están asociados tanto a las buenas practicas de fertilización, ya sea artificial y natural como el manejo del riego. Una vez elaborado el modelo conceptual e identificados los procesos implicados, se deben valorar cada uno de los fenómenos asociados a estos procesos.

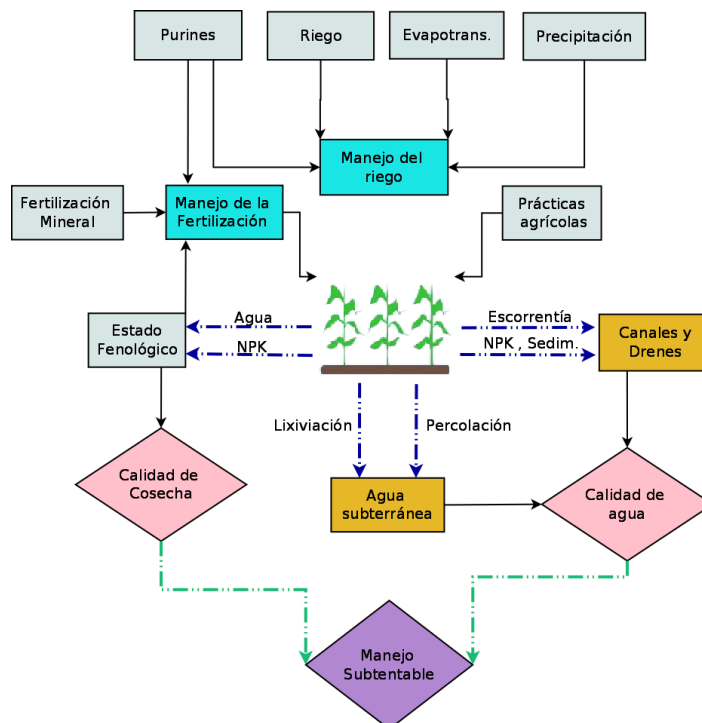


Figura 4.4: Modelo conceptual de gestión ambiental

#### 4.2.4. Elaboración del índice de riesgo

Determinar zonas con alto riesgo de pérdidas de nutrientes por lavado y lixiviación, permitiría desarrollar estrategias de manejo acorde a cada subunidad predial. Para desarrollar estos indicadores es importante reconocer los factores intrínsecos y antropogénicos que influyen en estos fenómenos. Varios estudios se han realizado sobre la erosión hídrica (Morgan, 1997; Morin and Rey, 2009; Quiñonez and Dal Pozzo Montuchio, 2008; Espinosa, 2007) y lixiviación (Auge, 2004; Martínez et al., 1998; Arumí et al., 2001; Monari, 2004), en donde se establecen las variables que afectan los procesos y su grado de participación en este. Es importante, no parametrizar innecesariamente los índices, ya que un elevado número de estos dificultaría la implementación de la metodología, encareciendo y desmotivando su utilización por parte de los productores, siendo recomendable valerse de información disponible y proveniente de una fuente confiable. Con

este propósito se utilizó la información incorporada en los mapas de suelos del Centro de Información de recursos naturales (CIREN), perteneciente al Gobierno de Chile, donde se encuentran las diferencias intraprediales en cuanto a los tipos de suelos, clases de drenaje, capacidad de campo, entre otros. Esta información es complementaria con el conocimiento en terreno del área en estudio.

Cuadro 4.1: Ponderación para las variables en relación a su importancia relativa sobre la lixiviación

Lixiviación		
Variables	Pond.	Descripción
Nivel Freático	5	El nivel del agua subterránea, nivel pizométrico o freático. marca la profundidad por debajo del suelo
Clase Drenaje	5	Esta dada por la velocidad de la remoción del exceso de agua de la superficie del suelo y/o del perfil del suelo
Capacidad de Campo Efectiva	4	Corresponde a la humedad de un volumen dado de suelo disponible para la vegetación multiplicada por el espesor de suelo correspondiente
Textura de suelo	3	Porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo; arena, limo, arcilla
Profundidad Horizonte. A	3	Corresponde al grosor de las capas de suelo en las cuales las raíces pueden penetrar sin dificultad en busca de agua, nutrientes
Aplicación Riego y Purín	2	Son las prácticas de manejo relacionada a la aplicación de los requerimientos de agua y nutrientes

Para determinar la influencia de cada parámetro en los procesos de lixiviación y lavado por escorrentía se empleó un método heurístico en el cual a partir

de la información recabada, bibliografía pertinente y un panel de expertos, se establecieron pesos o niveles para cada uno de los procesos (Cuadro 4.1 y 4.2), los pesos se encuentran entre 2 y 5, no utilizándose el valor 1, por se el elemento neutro del producto, el cual no permitía representar de buena forma, dentro del índice de riesgo, el peso de los parámetros que poseen dicho valor. Luego se asignan valores a cada rango de los parámetros Anexo(7) respetando su progresión natural, siendo el valor 1 el rango con menos peso o participación en el proceso particular que se caracteriza, existen 2 excepciones, la primera para obtener el valor correspondiente al peso asociado al método de riego y aplicación del purín, en donde se debe suma el valor obtenido por el método de riego con el valor para el manejo del purín, luego el resultado se divide por 2 y se aproxima al entero superior y la segunda excepción es cuando se desea obtener el valor correspondiente al peso asociado a las prácticas de conservación, en donde se suman los valores de cada practica realizada en el predio. existe un valor particular dentro de los pesos (N.apli) este dice que bajo ningún circunstancia debe aplicarse purín en el sector ya que el riesgo ambiental es extremo, para el proceso en el cual esta involucrado.

#### **Escala cualitativa de números difusos**

Para obtener los riesgos en el predio asociados a la aplicación de purines, la metodología contempla la elaboración de mapas temáticos, correspondientes a los riesgos vinculados a la lixiviación de nutrientes en cada subunidad del predio y los riesgos relacionados al lavado de nutrientes por escorrentía (Cuadro 4.3). Una vez obtenidas las soluciones serán interceptadas y valorizadas en razón de la vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas (Ec.4.2), para cada subunidad del predio .

Cuadro 4.2: Ponderación para las variables en relación a su importancia relativa sobre el lavado de nutrientes por escorrentía

Lavado por escorrentía		
Variables	Pond.	Descripción
Cubierta de suelo	5	cubierta vegetal que presta cierto grado de protección contra la erosión del agua y del viento
Clase Drenaje	4	Esta dada por la velocidad de la remoción del exceso de agua de la superficie del suelo y/o del perfil del suelo
Capacidad de Campo Efectiva	4	Corresponde a la humedad de un volumen dado de suelo disponible para la vegetación multiplicada por el espesor de suelo correspondiente
Textura de suelo	3	Porcentaje en que se encuentran los elementos que constituyen el suelo; arena, limo, arcilla
Aplicación Riego y Purín	3	Son las practicas de manejo relacionada a la aplicación de los requerimientos de agua y nutrientes
Pendientes	2	Inclinación del suelo respecto a una horizontal
Practicas de conservación	2	Practicas de manejo, relacionadas con la aplicaciones de purines

$$IR_p = \sum_{i=1}^n L_i \cdot P_i \cap \sum_{i=1}^n Lw_i \cdot Pw_i \tag{4.2}$$

Donde  $L_i$  y  $Lw_i$  son las ponderaciones de la variables  $i_s$  asociada a la lixiviación y lavado de nutrientes Cuadro(4.1,4.2), y  $P_i$  y  $Pw_i$  son los valores asignados al rango en que se encuentran dichas variables, Anexo(7). Lo anterior permite establecer

un mapa de riesgo, sujeto a índices cualitativos (Cuadro 4.3), donde en cada subunidad de un predio, se identifican los niveles de riesgo de contaminación de los cursos de agua al utilizar purines de cerdos, como alternativa de fertilización y riego.

Con los valores extremos para cada una de los análisis de riesgo, es posible asignar un valor difuso triangular (Ec.4.3) clasificado en una escala cualitativa, definida como Bajo, Bajo Moderado, Medio, Alto Moderado, Alto y Extremo.

$$V_i = V_{i-1} + \Delta D \quad (4.3)$$

donde  $V_i$  varía de 1 a 5, y el rango de cada uno, estará dado por la discretización aplicada al soporte (Ecuación(4.4)) y o sensibilidad intrínseca del sistema a cada uno de los valores cualitativos de  $V_i$ , por lo tanto  $V_1$  esta en el rango  $D_{min}$  y  $D_{min} + \Delta D$ , luego  $V_2$  se encuentra entre  $D_{min} + \Delta D + 1$  y  $D_{min} + 2\Delta D$  y así sucesivamente hasta  $V_5$ .

$$\Delta D = \frac{(D_{max} - D_{min})}{5} \quad (4.4)$$

Donde,  $D_{max}$  es el máximo valor del riesgo y  $D_{min}$  el mínimo valor del riesgo.

### 4.3. Área de estudio

Con el propósito de evaluar la metodología, esta se aplicó en un predio ubicado a 22 km al noreste de la ciudad de Chillán, Comuna de Coihueco, provincia de Ñuble, región del Bío-Bío, Chile Fig(4.5). Emplazado en la zona hidrológica que conforman los ríos Cato y Ñuble, la principal actividad del valle es la agricultura, con una superficie aproximada de  $459 \text{ km}^2$ , representando un 10 % de la provincia

Cuadro 4.3: Valores Cualitativos para cada indicador de riesgo sobre la lixiviación y lavado de nutrientes de nutrientes

Valor cualitativo	Ranking Lixiviación	Ranking Lavado	Observaciones
Bajo	19–38	15–37	Zona con bajo riesgo de lixiviación y lavado de nutrientes, donde las operaciones desarrolladas no han causado mayor impacto en el ecosistema
Bajo Moderado	39–57	38–58	La aplicación de purines tiene bajo impacto en la contaminación de las aguas
Medio	58–76	59–79	Tolera fallas ocasionales en el manejo, debe realizarse las operaciones de manejo con cuidado moderado
Alto Moderado	77–95	80–10	Zona sensible a errores en el manejo ya que cualquier falla producirá una pérdida de nutrientes hacia los cursos de agua
Alto	96–114	101–122	No se recomienda la aplicación de purines de cerdo y o fertilización mineral, Cualquiera sea el caso habrá una pérdida inminente de los nutrientes
Extremo	No Aplic	No Aplic	En esta zona, no se debe aplicar purines, bajo ninguna circunstancia de manejo.

de Ñuble. El área de riego alcanza un 24,7%, es decir, 10.151 ha, y la agricultura de secano un 65,7% equivalente a 19.448 ha.

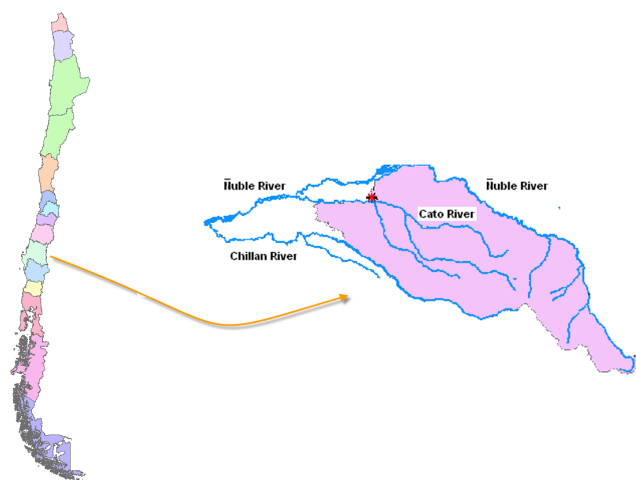


Figura 4.5: Comuna de ubicación del área en estudio

El área se encuentra bajo la influencia de un bioclima mediterráneo, presentando al menos dos meses consecutivos del período estival con déficit hídrico (D.G.A., 2004). La temperatura promedio anual es de 14,1°C, con una mínima y máxima promedio anual de 7,6°C y 20,6°C, y una precipitación promedio mensual de 85,4 mm que entrega un total anual de agua caída de 1.025 mm.

Los suelos presentes son formados sobre cenizas volcánicas recientes (postglaciales) depositadas sobre material fluviales, fluvio-glaciales, entre otros, pero no cementados. En estos suelos predomina las texturas franca limosa y arcillosas (Torres, 2006). En la zona existe una importante interacción entre el sistema de aguas subterráneas entre los ríos Cato y Ñuble; el flujo de aguas subterráneas tiende a ser paralela a la red de drenaje superficial del río Ñuble, producto de los rellenos o depósitos de conglomerados de origen coluvial con alta permeabilidad (D.G.A., 2004), drenando sus aguas a través del río Cato. Tanto el río Ñuble como las infiltraciones de aguas lluvias y pérdidas de los sistemas de riego actúan como

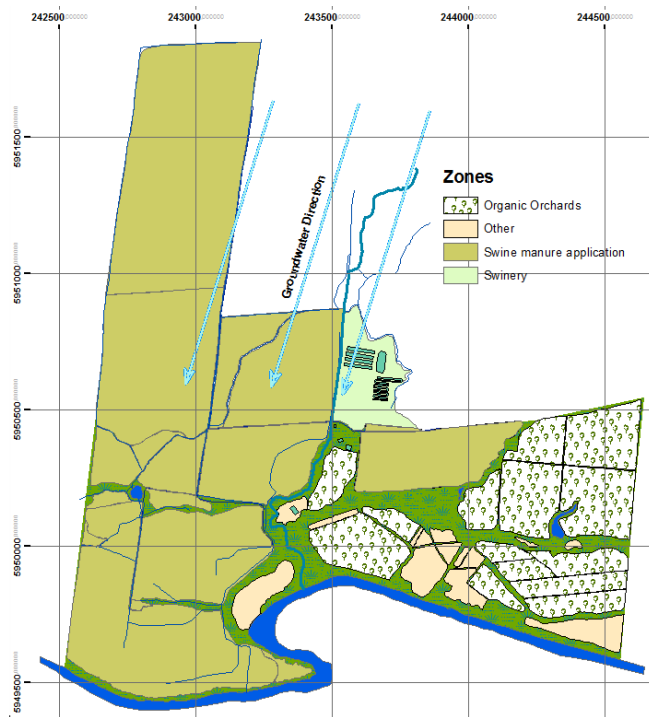


Figura 4.6: Unidades productivas del fundo San Guillermo

recarga para el acuífero superficial (Torres, 2006), Fig(3.4)

#### 4.3.1. Descripción del predio

El predio Fundo San Guillermo, Fig(4.6), tiene una superficie de 240 has, presentando dos terrazas, con topografía plana a casi plana y una diferencia de cota de aproximadamente 30 m entre ellas. Su economía se basa en 3 unidades de explotaciones, siendo la principal la explotación porcina para carne con 8.000 cerdos Fig(4.7a), en la cual se generan una importante cantidad de desechos orgánicos biodegradables ( $96 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$  de purines). Los dueños establecieron como objetivo dar un uso y disposición óptima de los desechos orgánicos, dando la posibilidad de utilizarlos como bio-fertilizantes, para la producción agrícola de maíz, remolacha, trigo, avena y achicoria. Esto permitirá, en el mediano plazo, reducir o suprimir la incorporación de fertilizantes artificiales a los suelos agrícolas. La segunda unidad del fundo San Guillermo, donde se destina el 70% de su

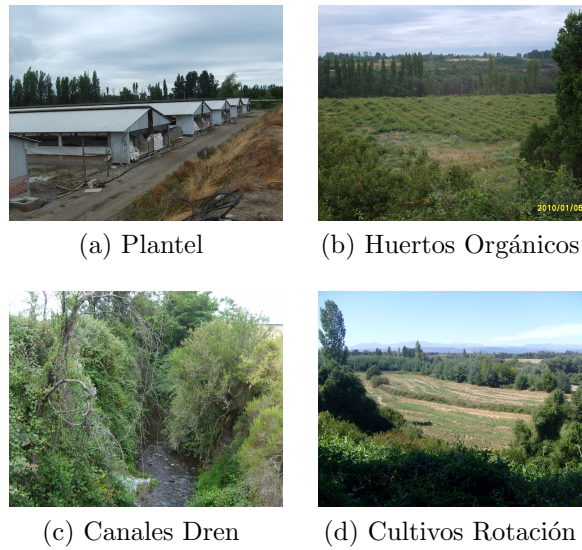


Figura 4.7: Fundo San Guillermo

superficie, representa la explotación de huertos frutales con manejo orgánico Fig(4.7b). Estas se encuentra protegida ya sea por barreras naturales como el río Cato, por pequeñas quebradas, además de barreras artificiales como canales Fig(4.7c), que funcionan como biofiltros y amortiguadores naturales, lo que en su conjunto interactúan entre sí en el espacio y tiempo con los patrones de manejo (Rivera et al., 2005). La última unidad de explotación consiste en cultivos de rotación Fig(4.7d), con la finalidad de producir la materia prima para abastecer la alimentación requerida por el plantel y disminuir los costos de producción. Los cultivos son regados con purines previamente tratados. La planificación de riego considera el balance de nutrientes, clima, puntos críticos de manejo, entre otros aspectos, con el fin de evitar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

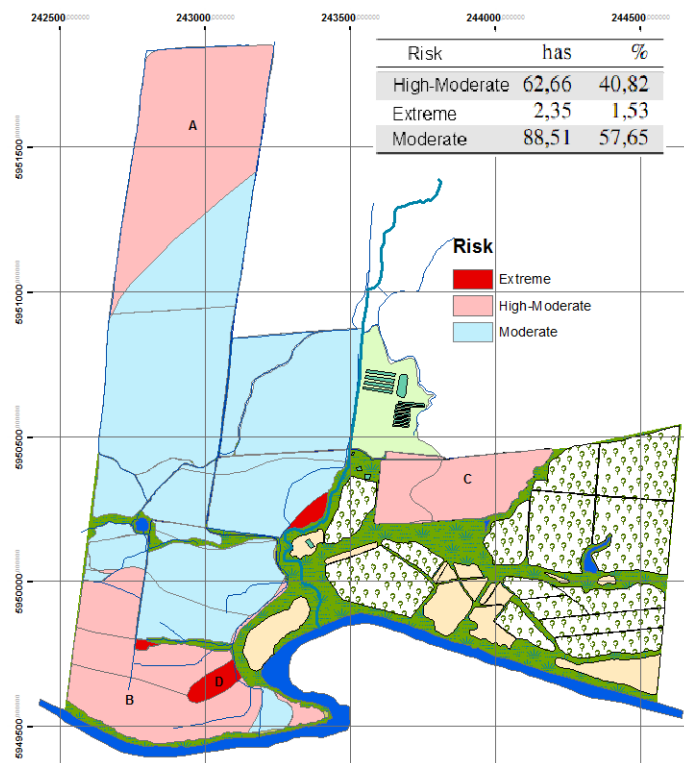


Figura 4.8: Índice de riesgo de lavado de nutrientes por escorrentía

## 4.4. Resultados

Al aplicar la metodología en el Fundo San Guillermo, es posible observar en las Figuras (4.8 y 4.9), que predomina un riesgo medio en cuanto a la lixiviación y lavado de nutrientes, lo que representa un 68% y 58% de la superficie total, existiendo sectores de gran superficie, colindantes al río Cato (B) y predios vecinos (A) donde el riesgo es alto moderado (Figura 4.10). En los sectores A,B y C se monitorearán las aguas superficiales en los puntos inmediatos superior e inferior de los cursos, lo que permitirá evaluar las practicas de manejo aplicadas en el predio.

Es posible observar en las Figuras (4.8 y 4.9) la disimilitud que presenta el sector D en relación a los índices de lavado y lixiviación, esto se produce ya

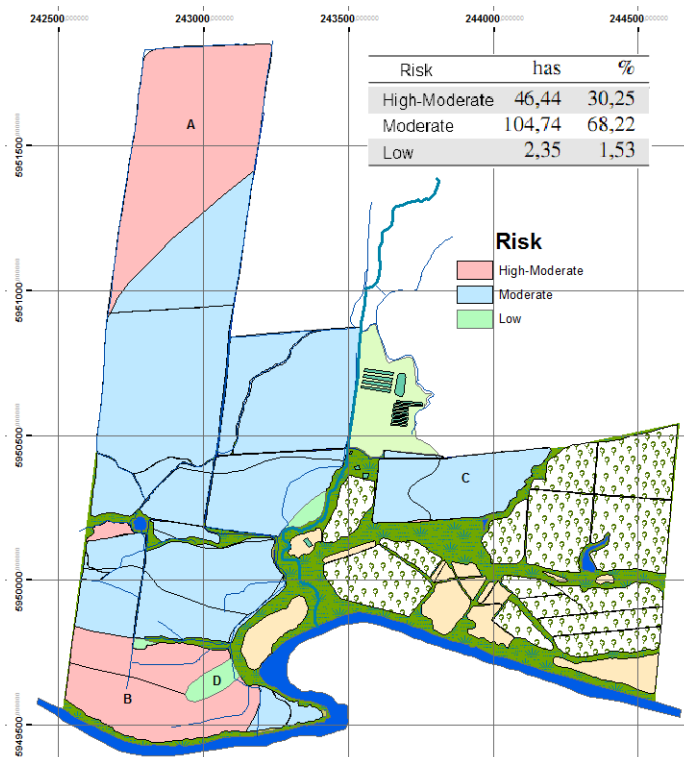


Figura 4.9: Índice de riesgo al lixiviado de nutrientes

que las ponderaciones de los parámetros que influyen en el proceso de lavado de nutrientes por escorrentía, en general son opuestos respecto a las de lixiviación, siendo fuertemente marcado en zonas donde se producen riesgos extremos, no así en sectores con riesgos medios, ya que en ellos es posible que sucedan ambos procesos, luego estas disimilitudes hacen presumir que la metodología propuesta, es capaz de diferenciar los procesos en el predio, lo que fue corroborado en terreno por un grupo de expertos, que validaron los índices de riesgo ambiental asociado a la aplicación de purines.

Las zonas que presentan un mayor riesgo de contaminación de los cursos de agua por la aplicación de purines Figura (4.10), se encuentran en la periferia del predio representando una 41,24% del área total. El sector B presenta un riesgo alto moderado de lavado de nutrientes por escorrentía, los que irían a dar a las

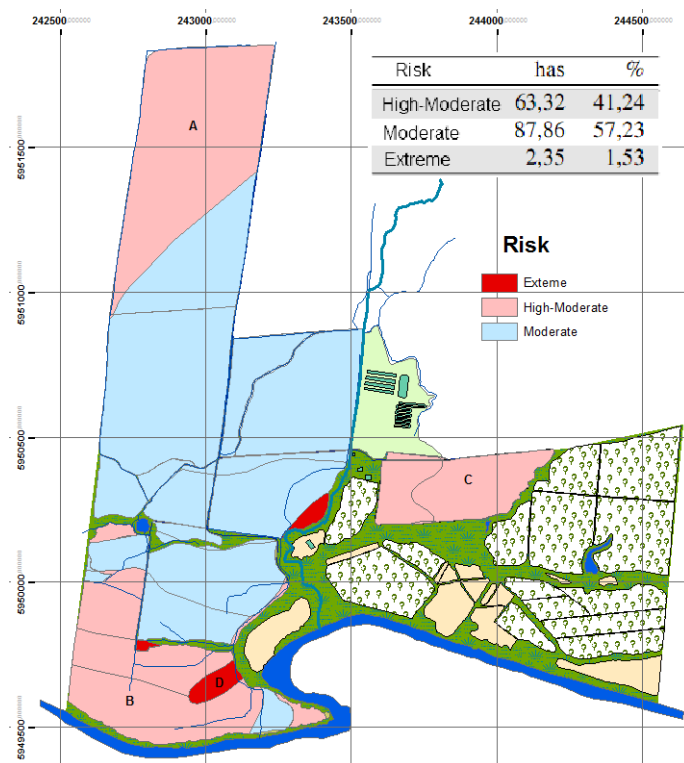


Figura 4.10: Índice de riesgo de contaminación de los cursos de agua por la aplicación de purines de cerdo

agua del río Cato, por lo que se recomienda la implementación de vegetación amortiguadora en la ribera del río, por otro lado en el sector A es posible suponer que la contaminación se produciría por lixiviación de nutrientes, y conociendo el movimiento de las aguas subterráneas, estos irían a dar de igual manera al río Cato, potenciando el incremento en la concentración de nutrientes aguas abajo del río. Por último el sector C ubicado al noreste, emplazado en la terraza inmediata superior de los huertos orgánicos, existe una zona que presenta un riesgo alto moderado de lavado por escorrentía, los que podrían ser amortiguados por la abundante vegetación presente en la quebrada ubicada aguas abajo, esto no asegura que los huertos orgánicos se encuentren aislados o protegidos y lo más seguro es que sea un sistema conectado, por lo que es recomendable no aplicar purín en este sector.

Queda en evidencia que, en una misma unidad de manejo del predio pueden existir más de un índice de riesgo, debido a la heterogeneidad de los suelos en Chile, todo ello acarrea un problema de gestión no menor a la hora de disponer los purines, ya que cada sub sector de una unidad debería contar con su propio plan de manejo entregado por los balances de nutrientes y la capacidad de retención de agua, entre otros. Una alternativa para superar este inconveniente sería el re-diseño de las unidades, respetando su geomorfología, lo que es poco práctico de implementar. Otra alternativa es aplicar los purines con respecto al suelo limitante, lo que no garantiza una óptima utilización de su riqueza nutricional y homogeneidad del cultivo.

Por encontrarse el predio en un sector ribereño, cualquier error en el manejo en la aplicación de purines, afectarían rápidamente el cauce del río Cato, lo que acarrearía graves problemas ambientales, a la comunidad emplazada aguas abajo.

Es recomendable que los productores desarrollen un protocolo de manejo integrado del predio, en pos de garantizar el buen uso de este recurso, implementando franjas de vegetación en la ribera del río, que permita amortiguar la carga de nutrientes que pueden ser arrastradas por escorrentía. Existen drenes naturales donde crece una densa vegetación nativa, la cual no debe ser eliminada puesto que ella actúa como un filtro natural en el sistema, se recomienda a su vez realizar un trabajo integrado con los organismos fiscalizadores, entendiéndose que la disposición de los purines en los predios no debe realizarse para solucionar el problema de disposición final de este residuo, sino como un recurso valioso que entrega una oportunidad desde el punto de vista productivo, esto permitiría un cambio de visión global respecto al purín, ya no siendo un desecho, sino mas bien un insumo dentro del manejo productivo.



# Diseño de un sistema de soporte de decisión para la gestión de los purines como bio-abonos

---

## Resumen

La pérdida de nutrientes presente en los purines hacia los cursos de aguas, depende fundamentalmente de las condiciones de los suelos, los eventos de precipitación y/o riego, además de las características o estado en que los nutrientes que se encuentren presente. Frente a esto y dado los requerimientos ambientales de los mercados nacionales e internacionales, las empresas del sector agropecuario chileno, se han visto en la necesidad de contar con herramientas de gestión ambiental simples, robustas y basadas en información disponible que permitan cumplir con las normas medioambientales vigentes, de forma de garantizar la utilización y disposición correctas de estos residuos, garantizando la ausencia de riesgos inaceptables para el medio ambiente.

(SGPF)-Sistema de Gestión de Purines como Fertilizante, es una aplicación que pretende la gestión integrada y sostenible de los residuos generados en la ganadería

intensiva, estimando la distribución del fósforo y nitrógeno presente en el purín, entre el suelo, cuerpos de aguas tanto superficiales como subterráneas y los cultivos.

Este capítulo presenta una importante herramienta de soporte de decisión para la gestión de los purines basado en un conjunto de pantallas amigables para el usuario, este sistema de soporte de decisión es flexible y amigable en cuanto a que puede ser utilizado en áreas con diferentes características tanto de suelo como climáticas, además puede ser utilizado con diferentes fuentes de purín y usuarios.

## 5.1. Introducción

En el último tiempo, el sector agropecuario en Chile se ha visto sometido a una gran presión para reducir en forma significativa sus descargas contaminantes, la que se ha originado principalmente por las restricciones impuestas en los mercados internacionales, así como por la evolución que ha tenido la regulación y fiscalización a nivel nacional. Por tal motivo los productores se han visto en la necesidad de incorporar tratamientos y estrategias para la disposición de sus purines dentro de sus procesos productivos.

Los purines son una fuente tradicional de nutrientes orgánicos en la agricultura (Szógi and Vanotti, 2003; Rosen and Eliason, 1996), ricos en nitrógeno, fósforo, potasio y otros micro-nutrientes, elementos esenciales para el crecimiento de los cultivos (McFarland et al., 1997), representando un potencial sustituto de los fertilizantes comerciales (Adhikari M. and Paudel K.P. and Martin N.R. and others, 2005). La fertilización de los suelos agrícolas con nitrógeno y

fósforo a menudo mejora la productividad de los cultivos, resultando en mayores rendimientos, lamentablemente, estos mismos nutrientes pueden poner en peligro la calidad de las aguas (Kohn et al., 1997; Szógi and Vanotti, 2003), es por ello que la planificación y manejo de nutrientes es el principal mecanismo ha utilizar para reducir el movimiento de nutrientes desde el suelo agrícola hacia las aguas superficiales y subterráneas (Lory et al., 2002; Higgins et al., 2005), dado que una mala gestión de ellos, lleva a la aplicación excesiva de nutrientes y por consecuencia a una acumulación en exceso y sobre la necesidad de los cultivos, que a su vez, conduce directamente a una mayor pérdida de nutrientes de los sistemas agrícolas.

Los purines son usualmente considerados como desperdicio o desecho de la producción ganadera, mas que como una fuente importante de nutrientes (Berenguer et al., 2008). La aplicación de residuos líquidos o purines al suelo es uno de los métodos más efectivos y económicos para afrontar la problemática de la acumulación de los desechos de tipo orgánico procedentes de la ganadería intensiva (Westerman and Bicudo, 2005; Schröder et al., 2005; Carrasco et al., 2008; Domínguez and Cano, 2009), permitiendo a su vez reducir la necesidad de fertilizantes artificiales para el crecimiento de los cultivos, disminuyendo los costos de producción (McFarland et al., 1997; Berenguer et al., 2008; Payet et al., 2009), sin embargo un inapropiado manejo puede contaminar las aguas superficiales y subterráneas con concentraciones elevadas de nutrientes causando enfermedades a los organismos (Bakhsh et al., 2005; Harris et al., 1996; Rosen and Eliason, 1996), siendo fundamental reconocer el potencial impacto ambiental de esta practica sobre el medio receptor y como fuente no puntual de contaminación, siendo la base para el desarrollo de estrategias efectivas de manejo, con la finalidad de proteger recursos valiosos como lo son la tierra y el agua (Behera and Panda, 2006).

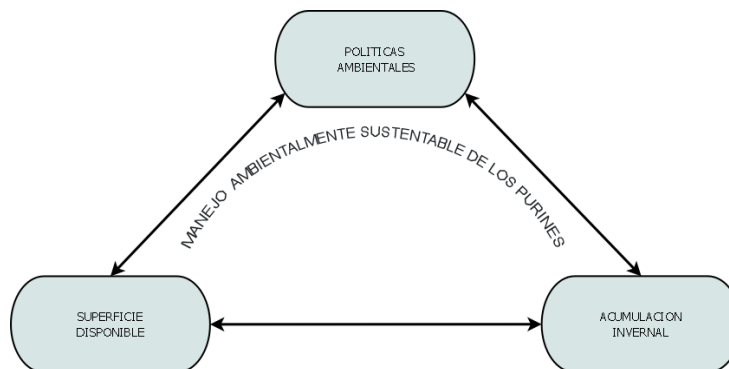


Figura 5.1: Manejo sustentable del purín

Los factores limitantes a la hora de manejar y disponer los purines ganaderos son en general tres (Figura 5.1).

1. La visión ambiental de la empresa o productores.
2. La superficie de cultivos necesaria para la disposición final.
3. La capacidad de acumulación invernal.

Si se cumplen estas tres condiciones, es posible mediante un modelo de gestión de purines, manejar eficaz y eficientemente este recurso.

Los puntos más críticos desde el punto de vista medioambiental están en función de cómo, dónde, cuánto y cuándo se apliquen los purines (Lory et al., 2002; Sawyer and Mallarino, 2008), lo que puede producir grandes beneficios agroambientales o graves riesgos de contaminación para las aguas, suelo y atmósfera. Una buena alternativa para gestionar y proteger estos recursos, es la utilización de modelos matemáticos, como herramientas para presentar información con el fin de formular políticas de manejo en los predios (Gassman et al., 2006; Arumí et al., 2000; Payet et al., 2009), siendo junto al monitoreo y la modelación herramientas cooperativas en el proceso de gestión y planificación de los procesos productivos (Rivera et al.,

2005).

El purín tiene características que lo hacen muy difícil de manejar nutricionalmente y algunas veces mas complicado que los fertilizantes artificiales (Sawyer and Mallarino, 2008), ya que incluye una mezcla de formas de nutrientes orgánicos e inorgánicos, que varían en su concentración y forma, aunque este problema puede ser parcialmente resuelto realizando análisis del purín antes de cada aplicación (Higgins et al., 2005; Berenguer et al., 2008). Desde el punto de vista agronómico es necesario conocer su composición y establecer las necesidades del suelo y cultivo de modo de optimizar su uso para reducir la pérdida de nutrientes hacia el ambiente (Faz et al., 2003), otra importante decisión para evitar o disminuir las pérdidas de nutrientes recae sobre la fecha de aplicación (Lewis et al., 2003), ya que ésta dependerá del estado fenológico de los cultivos y las condiciones meteorológicas imperantes.

Aún cuando existen modelos que pueden ayudar a gestionar los purines, SWAT/GRASS, (Srinivasan et al., 1996); SWAPP, (Saleh et al., 2007), IFSM,(USDA, 2010), APEX, (Williams and Izaurralde, 2007). La necesidad de desarrollar un sistema de soporte de decisión computacional que ayude a realizar una gestión sustentable de los purines como una alternativa de fertilización, nace de la complejidad que presentan los modelos ya existentes para su implementación, donde se necesita un grado elevado de conocimientos y familiaridad con ellos, que los productores en su mayoría no tienen. Una respuesta interesante a esta problemática es el desarrollo herramientas simples y robustas que permitan un ordenamiento territorial sustentable desde los punto de económico y medio ambiental (Sheldrick et al., 2003).

Los balances de nutrientes de entrada y salida de los agro-sistemas dan una idea de la eficiencia en el reciclado y el uso de nutrientes como también las posibles pérdidas de estos (Wang et al., 2007). El objetivo de este estudio es desarrollar un sistema de soporte de decisión para ser utilizado en el manejo de purines ya sea la parte líquida o sólida por los productores de las regiones de Chile, este modelo de gestión, simulará la acumulación potencial de nitrógeno y fósforo en el suelo y las posibles pérdidas del sistema, será práctico, intuitivo, útil para los productores, con datos de entrada de fácil obtención y válido para los organismos estatales encargados de supervisar las buenas prácticas sanitarias y medio ambientales.

## **5.2. Metodología**

La solución propuesta consiste en una herramienta que permita planificar y ejecutar acciones que promuevan el uso adecuado de los purines generados en la producción agropecuaria intensiva. Dado lo anterior se desarrolló un sistema de soporte de decisión, como una herramienta técnica cooperativa sobre la gestión y el desarrollo de un sector agropecuario amigable con el medio. El sistema de gestión propuesto cumplirá dos funciones fundamentales, proporcionar información y conocimiento para la gestión del purín y como un instrumento de apoyo para las instituciones fiscalizadoras permitiendo generar propuestas y supervisar la disposición de este recurso.

### **5.2.1. (SGPF)-Sistema de Gestión de Purines como Fertilizante**

Una estructura computacional amigable para el usuario, llamado Sistema de Gestión de Purines como Fertilizante (SGPF), se desarrolló considerando la

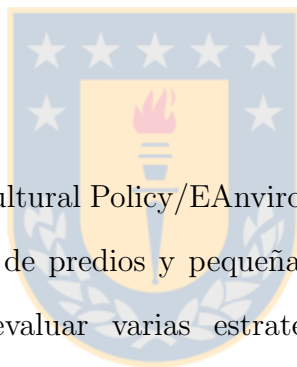
relación suelo, planta, agua y las condiciones climáticas que imperan sobre los predios donde se dispondrán los purines, este sistema de gestión permitiría calcular las tasas de purín que pueden ser aplicadas al suelo, bajo condiciones específicas del área y cultivos. Para determinar la tasa de aplicación del purín es importante contar con información tal como las concentraciones de nitrógeno y fósforo orgánico e inorgánico presente en el purín, el estado nutricional del suelo y contenido de materia orgánica presente en él, además de las recomendaciones nutricionales para un rendimiento de producción determinada según cultivo. La cantidad de purín posible de aplicar esta condicionada por la volatilización, mineralización de materia orgánica, desnitrificación e inmovilización, procesos que son influidos por la actividad microbiológica, textura del suelo, temperatura, entre otros (Higgins et al., 2005).

El sistema de soporte de decisión para la aplicación de purín, integra modelos relacionando los ciclos de nutrientes con los procesos de transporte fuertemente relacionados con el proceso de (Riego, precipitación)-escorrentía, erosión y transporte disuelto y adsorbido de los elementos nitrógeno y fósforo. Este sistema de soporte de decisión, resta o suma las pérdidas y transformaciones potenciales de los nutrientes en el balance general de cada uno, con lo cual se puede conocer la cantidad de nutriente disponible que queda para el cultivo en suelo, además el usuario será capaz de generar rápidamente varios escenarios de aplicaciones de purines futuras, optimizando la utilización de nutrientes y disminuyendo las pérdidas. Este sistema de soporte de decisión fue desarrollado usando las ecuaciones relacionadas con las transformaciones de nutrientes presentes en SWAT Model y el movimiento de cada uno de ellos, con las ecuaciones de APEX Model, he implementado en una interfaz gráfica realizada con el programa Matlab, aún cuando se basan en las mismas ecuaciones que utiliza SWAT Model y APEX

Model, se diferencia en su simplicidad lo que permite la evaluación rápida de los potreros y no el predio completo o pequeñas cuencas.

### Modelo SWAT

SWAT es la sigla de Soil and Water Assessment Tool, un modelo a escala de cuencas desarrollado por USDA, rama del Agricultural Research Service(ARS)(Neitsch et al., 2005), en conjunto con la Universidad de Texas (Luzio et al., 2000). Fue diseñado para evaluar el efecto del manejo de tierras en la cantidad de sedimentos en el agua, así como el efecto que tienen, en la calidad del agua, las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes sobre una cuenca (Saleh et al., 2007).



### Modelo APEX

El modelo Apex (Agricultural Policy/EAenvironmental eXtender) fue desarrollado para usarse en manejo de predios y pequeñas cuencas hidrográficas. El modelo fue construido para evaluar varias estrategias de manejo considerando la sustentabilidad de la zona, permite modelar erosión, suministro y calidad de agua, competición entre plantas, clima y pesticida, manejo de riego, drenaje, terrazas, manejo de fertilización, manejo de abono, lagunas, embalses, rotación de cultivo, selección y aplicación de pesticidas, pastoreo y barbechos, entre otros.(Williams and Izaurralde, 2007; Singh and Frevert, 2006).

#### 5.2.2. Ciclo del Nitrógeno

El ciclo del nitrógeno es un sistema dinámico, las dos mayores formas de nitrógeno encontrado en el suelo son nitrógeno orgánico y mineral, la capacidad del nitrógeno para cambiar de estado lo hace un elemento de gran movilidad, predecir el

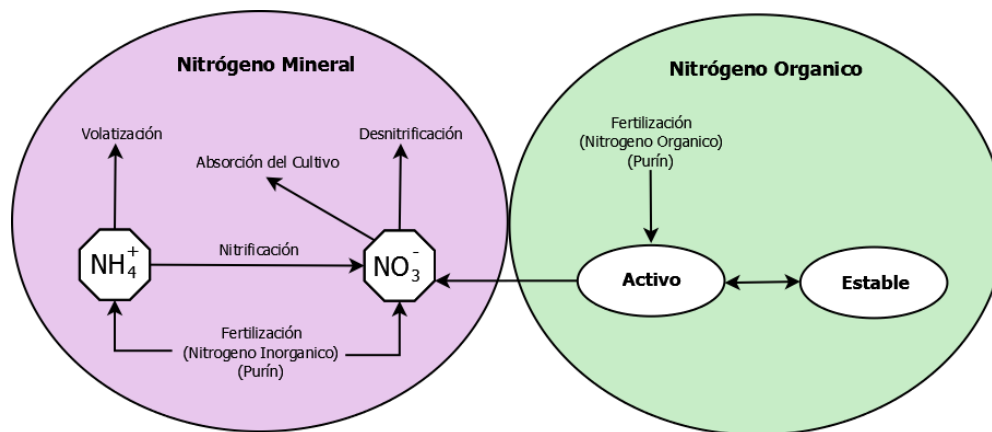


Figura 5.2: Modulo del Nitrógeno

movimiento y cantidad de nitrógeno en el suelo es crítico para realizar un manejo adecuado de este elemento en el medio ambiente.

El ciclo del N en el sistema suelo-planta-atmósfera involucra muchas transformaciones entre formas orgánicas e inorgánicas. Dentro del ciclo del N coexisten procesos de ganancia, pérdidas. Sin embargo, la actividad antrópica puede influir sobre muchos de estos procesos a través de distintas prácticas de manejo de suelo y cultivo. El conocimiento de los procesos del ciclo del N y de cómo la actividad antrópica influye sobre los mismos, permite optimizar la producción de los cultivos sin afectar la calidad del ambiente.

El sistema de soporte de decisión desarrollado, se centra en dos diferentes fuentes de nitrógeno y sus dinámicas Fig(5.2), la inorgánicas  $NH_4^+$  y  $NO_3^-$  y la orgánica que se mueve entre nitrógeno activo y estable.

### 5.2.3. Ciclo del Fósforo

La cantidad de fósforo demandada por las plantas es considerada menor en relación a la del nitrógeno, sin embargo el fósforo cumple un papel fundamental en la transferencia y almacenaje de energía obtenida a través de la fotosíntesis

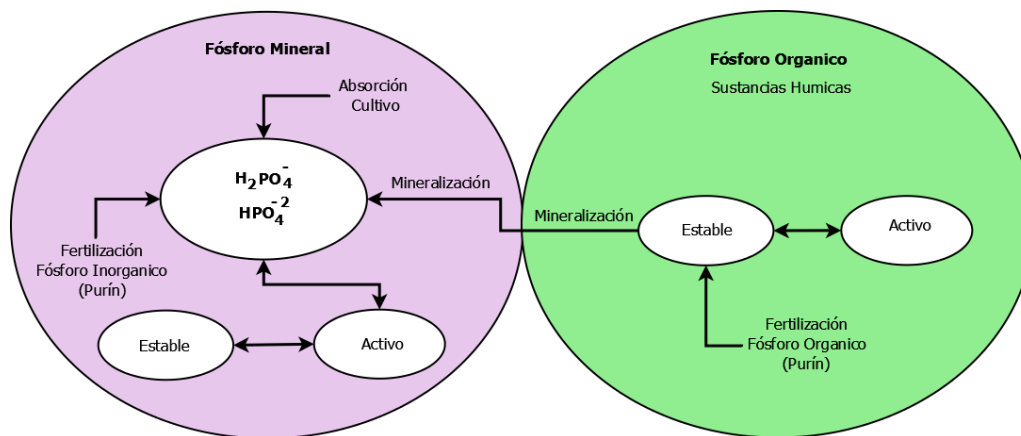


Figura 5.3: Modulo del fósforo

y metabolismo de los carbohidratos, involucrado directamente en el crecimiento vegetativo. Es posible encontrarlo en el suelo, tanto en su forma orgánica como mineral, en estado insoluble y soluble, siendo esta última la forma disponible para las plantas. A diferencia del nitrógeno la movilidad del fósforo en el medio ambiente es limitada, producto de su carga eléctrica positiva permite que se adhieran a los coloides del suelo formando compuestos insolubles que precipitan en la solución, por lo cual el principal mecanismo de transporte y pérdida de este elemento está relacionado a la escorrentía y erosión.

El fósforo orgánico está relacionado a residuos de plantas y biomasa microbiana, encontrarse en estado activo o estable esto asociado a la disponibilidad de sustancias húmicas para la mineralización en el suelo.

#### 5.2.4. Balance de nutrientes

La aplicación de un sistema de balances como un instrumento para obtener una mayor sustentabilidad de las prácticas de manejo nutricionales requiere ser establecido, con ambiental y agronómicos objetivos (Öborn et al., 2003; Hedlund et al., 2003). En este estudio es importante determinar el balance de dos nutrientes,

concretamente N, P (Nkonya et al., 2005). Un balance de nutrientes estima la diferencia entre la cantidad de nutrientes que entran y la que salen de un sistema en particular en una escala espacio y tiempo definida ( $\sum IN - \sum OUT$ ), estos balances en la agricultura consideran la capa de suelo explorada por las raíces como el estanque donde los nutrientes son agregados, transformados y adsorvidos, en general el balance describe el ciclo de los nutrientes en el suelo basados con las relaciones descritas en literatura (Buysse et al., 2005).

La cantidad de nutrientes a reponer es calculado como la diferencia entre la necesidad de N, P del cultivo, disponibilidad en el suelo, Características del purín y las trasformaciones propias de ellos que tienen lugar bajo ciertas condiciones propias de la zona, según Öborn et al. (2003), para llegar a un manejo sustentable de nutrientes, dependerá de como son manejados estos a nivel de campo, siendo los principales focos de atención, la sincronización y localización de la demanda de nutrientes del cultivo.

### 5.2.5. Análisis del sistema

Para desarrollar el sistema de soporte de decisión, el primer paso es la construcción de un modelo conceptual donde se representan las condiciones locales del área de estudio, identificando y jerarquizando las variables claves que pueden afectar directa o indirectamente las condiciones medio ambientales relacionadas con la lixiviación y arrastres de nutrientes, que están asociados a la degradación de los cuerpos de aguas. La Fig(4.4) muestra el modelo conceptual para un predio tipo del Valle central de Chile donde se utilizan purines como un complemento en la fertilización y el riego. En ella se advierte que los factores claves a considerar para conseguir un manejo ambientalmente sustentable, minimizando las pérdidas de nutrientes, y que están asociados tanto a las buenas practicas de fertilización, ya

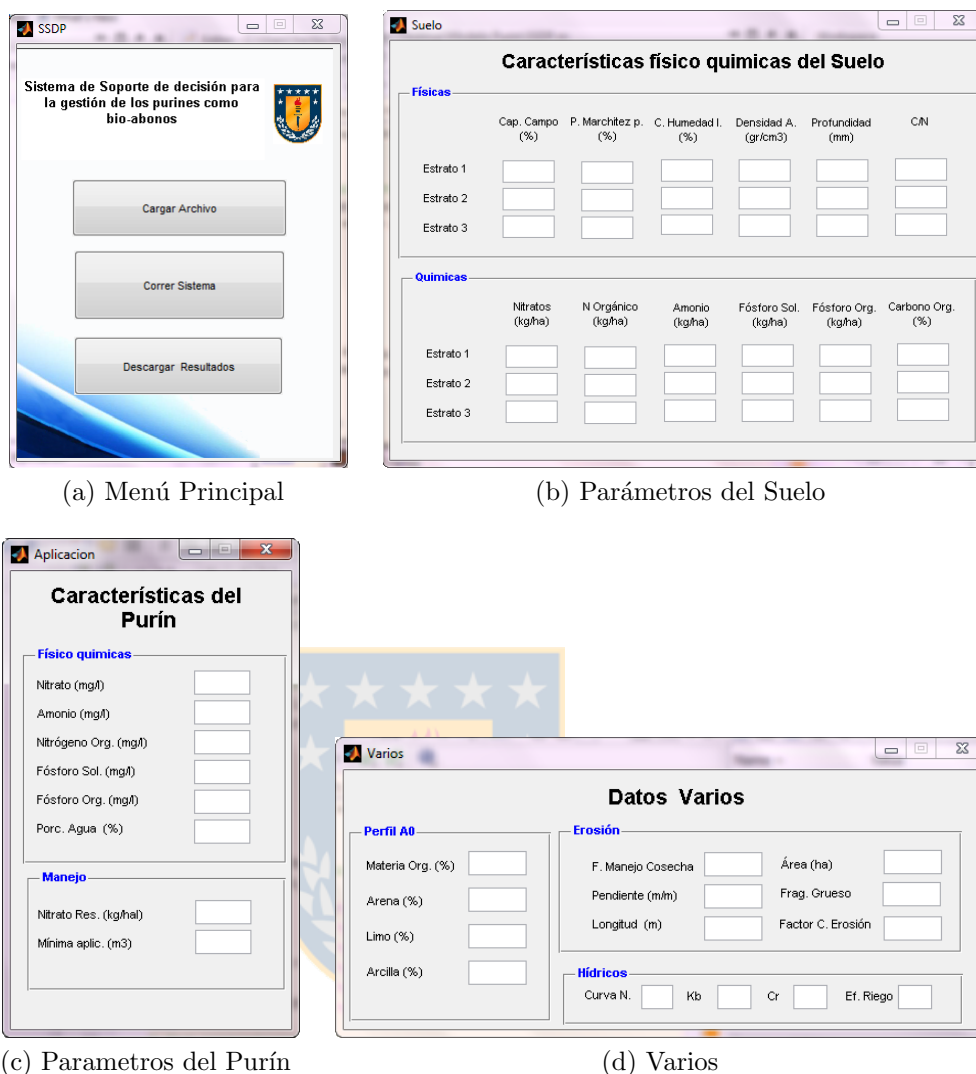


Figura 5.4: Interfaz Gráfica

sea artificial y natural como el manejo del riego.

### 5.2.6. Interfaz Gráfica

Una vez definidas, las ecuaciones (Anexo 7) del Modelo SWAT y APEX, que permiten representar las relaciones e interacciones del sistema de interés, mediante Matlab se generó un sistema de soporte de decisión relacionando cada uno de los procesos involucrados en la gestión predial del purín, para posteriormente integrar todo a una interfaz gráfica de Usuario.

Los datos necesarios para correr el programa hacen referencia a las características físico químicas del Purín y del medio receptor figura(5.4c) y figura(5.4b), las características climáticas del predio, necesidades nutricionales y hídricas del cultivo, como la variación de la temperatura del suelo para las diferentes estratos son leídas desde el menú principal figura(5.4a) y los parámetros hidrológicos son obtenidos de la figura(5.4d)

### 5.3. Área de estudio

Con el propósito de evaluar la metodología, esta se aplicó en un predio ubicado a 22 km al noreste de la ciudad de Chillán, Comuna de Coihueco, provincia de Ñuble, región del Bío-Bío, Chile. Emplazado en la zona hidrológica que conforman los ríos Cato y Ñuble, la principal actividad del valle es la agricultura, con una superficie aproximada de  $459 \text{ km}^2$ , representando un 10 % de la provincia de Ñuble. El área de riego alcanza un 24,7%, es decir, 10.151 ha, y la agricultura de secano un 65,7% equivalente a 19.448 ha.

El área se encuentra bajo la influencia de un bioclima mediterráneo, presentando al menos dos meses consecutivos del período estival con déficit hídrico (D.G.A., 2004). La temperatura promedio anual es de  $14,1^\circ\text{C}$ , con una mínima y máxima promedio anual de  $7,6^\circ\text{C}$  y  $20,6^\circ\text{C}$ , y una precipitación promedio mensual de 85,4 mm que entrega un total anual de agua caída de 1.025 mm.

Los suelos presentes son formados sobre cenizas volcánicas recientes (postglaciales) depositadas sobre material fluviales, fluviograciales, entre otros, pero no cementados. En estos suelos predomina las texturas franca limosa y arcillosas (Torres, 2006). En la zona existe una importante interacción entre el sistema de aguas

subterráneas entre los ríos Cato y Ñuble; el flujo de aguas subterráneas tiende a ser paralela a la red de drenaje superficial del río Ñuble, producto de los rellenos o depósitos de conglomerados de origen coluvial con alta permeabilidad (D.G.A., 2004), drenando sus aguas a través del río Cato. Tanto el río Ñuble como las infiltraciones de aguas lluvias y pérdidas de los sistemas de riego actúan como recarga para el acuífero superficial (Torres, 2006).

### 5.3.1. Descripción del predio

El predio Fundo San Guillermo, Fig(5.5), tiene una superficie de 240 has, presentando dos terrazas, con topografía plana a casi plana y una diferencia de cota de aproximadamente 30 m entre ellas. Su economía se basa en 3 unidades de explotaciones, siendo la principal la explotación porcina para carne con 8.000 cerdos, en la cual se generan una importante cantidad de desechos orgánicos biodegradables ( $96 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$  de purines). Los dueños establecieron como objetivo dar un uso y disposición óptima de los desechos orgánicos, dando la posibilidad de utilizarlos como bio-fertilizantes, para la producción agrícola de maíz, remolacha, trigo, avena y achicoria. Esto permitirá, en el mediano plazo, reducir o suprimir la incorporación de fertilizantes artificiales a los suelos agrícolas.

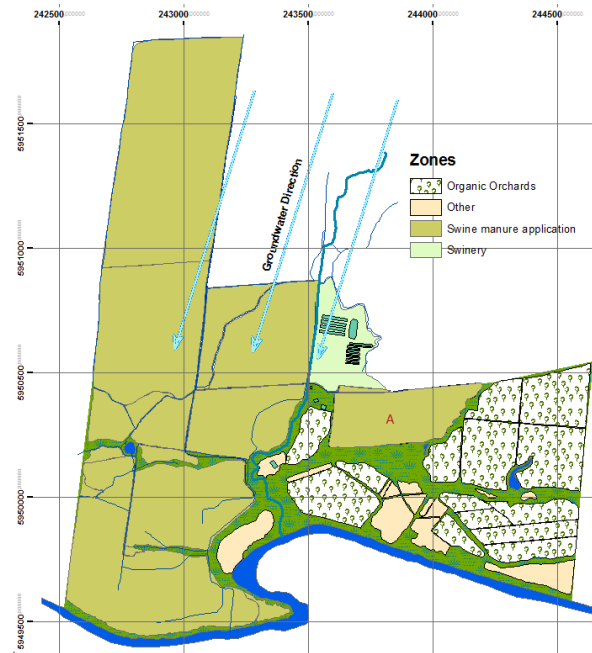


Figura 5.5: Unidades productivas del fundo San Guillermo

La segunda unidad del fundo San Guillermo, donde se destina el 70% de su superficie, representa la explotación de huertos frutales con manejo orgánico. Estas se encuentra protegida ya sea por barreras naturales como el río Cato, por pequeñas quebradas, además de barreras artificiales como canales, que funcionan como biofiltros y amortiguadores naturales, lo que en su conjunto interactúan entre si en el espacio y tiempo con los patrones de manejo (Rivera et al., 2005). La última unidad de explotación consiste en cultivos de rotación, con la finalidad de producir la materia prima para abastecer la alimentación requerida por el plantel y disminuir los costos de producción. Los cultivos son regados con purines previamente tratados. La planificación de riego considera el balance de nutrientes, clima, puntos críticos de manejo, entre otros aspectos, con el fin de evitar la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas.

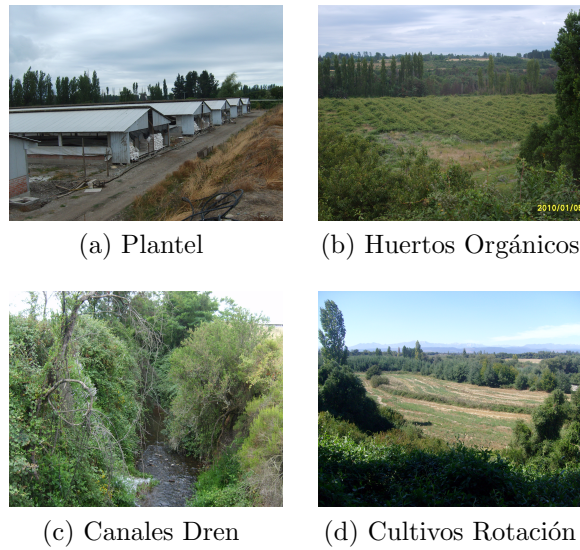


Figura 5.6: Fundo San Guillermo

### 5.3.2. Resultados

Como caso de estudio se analizó la evolución temporal de nitrógeno y fósforo para la parcela A del fundo San Guillermo, siendo el cultivo asumido el maíz por ser típicamente usado para disponer de los purines en la zona centro sur del país, dado su alto requerimiento de nitrógeno. Una vez introducidos la información necesaria para SGPF, como las características físico químicas del purín y del suelo, así también las condiciones climáticas del sector, se ejecuta el programa, el cual entrega en forma gráfica la evolución temporal de los minerales antes descritos, como también el balance de agua y la cantidad recomendada de purín y día en el cual debe ser aplicado.

### 5.3.3. Datos

Para este caso se contempla el cultivo de Maíz forrajero (sea maíz), el cual tiene una importancia relevante en la zona centro sur de Chile y es en gran medida utilizado para disponer de los purines. Este sistema de soporte de decisión

permitiría al usuario evaluar cualquiera sea el cultivo, debiendo tener claridad, la necesidad nutricional de este a diferentes estados fenológicos (Anexo(7)), para el caso de estudio la información del requerimiento nutricional se obtuvo de [Hirzel and Best \(2002\)](#), los coeficientes de cultivos para diferentes estados fenológicos fueron recabados de [Ferreya et al. \(2005\)](#). Los datos meteorológicos fueron recolectados por la estación meteorológica de la Universidad de Concepción Ubicada en la comuna de Chillán, región del Bio-Bio, latitud 36°34'y longitud 72°06', los que se encuentran disponibles en ([Universidad de Concepción, 2012](#)), (Anexo(7)).

para este ejemplo se utilizo el sector A del predio, cuyos características de suelo se muestran en los Cuadros N° [5.1](#) y [5.2](#)

Cuadro 5.1: Contenido Nutricional del Suelo

	Nitrato (kg ha <sup>-1</sup> )	Amonio (kg ha <sup>-1</sup> )	N Orgánico (kg ha <sup>-1</sup> )	Fósforo Sol. (kg ha <sup>-1</sup> )	Fósforo Org. (kg ha <sup>-1</sup> )	Carbono Org. (%)
Espesor 1	35	20	50	20	22	9.2
Espesor 2	30	20	50	20	20	6.7
Espesor 3	20	20	50	20	18	4.8

Cuadro 5.2: Característica física del suelo

	Cap.de Campo (%)	P.March. Perm. (%)	Hum. Inicial (%)	Prof. (mm)	Dens. Aparente (gr cm <sup>-3</sup> )	Relación C/N
Estrato 1	64.7	33.7	49	170	0.8	33
Estrato 2	65.4	36.3	50	400	0.9	33
Estrato 3	64.2	36.5	50	600	0.9	31

las características del purín a ser utilizado esta determinado, por múltiples factores como el tipo de alimentación, sistema de operación del plantel, estado de desarrollo de cerdo, sistemas de tratamientos, entre otros. A continuación se muestra las concentraciones media Cuadro (5.3) de salida del purín previamente tratado y a la salida del Wetland.

Los antecedentes necesarios para calcular la pérdida de suelo por erosión se

Cuadro 5.3: Característica químico física del purín

Nitrato ( $\text{mg L}^{-1}$ )	21.8
Amonio ( $\text{mg L}^{-1}$ )	10
Nitrógeno Orgánico ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1000
Fósforo Soluble ( $\text{mg L}^{-1}$ )	30
Fósforo Orgánico ( $\text{mg L}^{-1}$ )	40
Contenido de Agua (%)	90

entregan en la tabla (5.4) , que tienen relación a la condición del perfil A0 del suelo.

Cuadro 5.4: Característica física del perfil A0 y factores de el calculo de la erosión

Factor Manejo de Cosecha	0.7
Factor Practicas de Control de la Erosión	1
Factor de longitud y pendiente	
Longitud (m)	1000
Pendiente ( $\text{m m}^{-1}$ )	0.03
Factor de Fragmento Grueso	0.2
Factor de Erodabilidad del suelo	
Arena (%)	40
Limo (%)	35
Arcilla (%)	25
Materia Orgánica (%)	15.8

La curva número de esorrentía para tierra cultivada con maíz, con un suelo poco profundo areno-arcilloso se estimo como  $CN = 78$  (Chow et al., 1994), el criterio de riego utilizado sera el 50 % del almacenamiento máximo del suelo, el K de bandeja de 0.85 y la eficiencia de aplicación de riego de 75 % (Cirelli et al., 2009).

#### 5.3.4. Resultados entregados por el SGPF

Para la aplicación del purín se entregaron como variables de decisión la cantidad de nitrógeno residual en el suelo, en este caso cuando el Nitrógeno disponible fuese menor que  $10 \text{ KgN ha}^{-1}$  además se relacionó con la cantidad de aplicación siendo el criterio elegido  $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$  esto ultimo tiene estrecha relación con los costos asociados en la gestión del recurso.

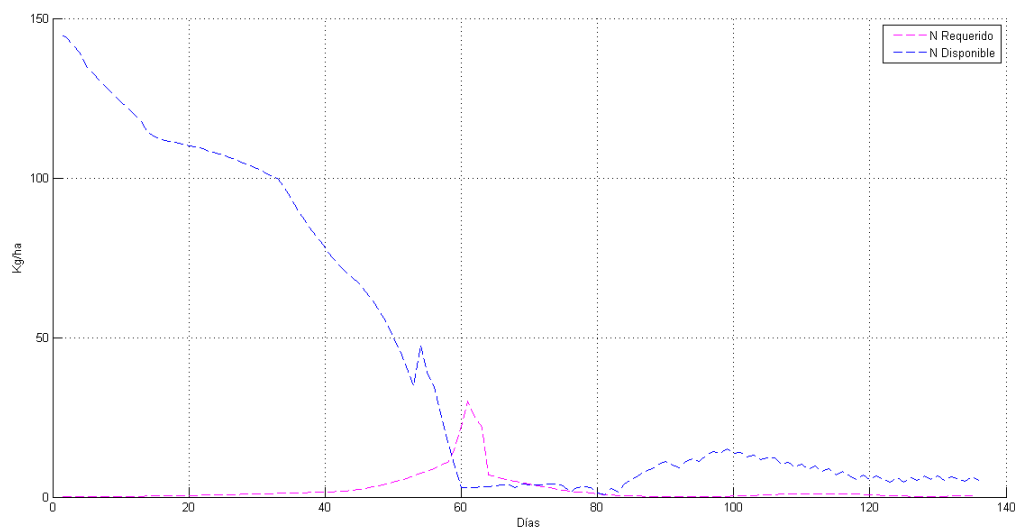


Figura 5.7: Variación temporal del Nitrógeno disponible y requerido por el cultivo

En la figura (5.7) se puede observar que no es posible con la aplicación solo de purín cumplir con el requerimiento del cultivo, esto está relacionado con la capacidad de retención de agua del suelo, dado que el purín es principalmente agua, una mayor aplicación causaría la pérdida de nitratos por lixiviación y por ende no se estaría realizando una gestión ambiental amigable con el medio.

De la Figura(5.8) se desprende que el requerimiento de fósforo del cultivo es posible cubrirlo con la aplicación de purín, esto se debe principalmente al alto contenido de fósforo orgánico y mineral presente en él.

En la Figura(5.9) se puede observar que existe mayor número de eventos de pérdida de nitrógeno por lixiviación que por lavado, esto se debe a que las lluvias fueron leves por lo que el volumen de agua aportado no fue suficiente para producir escorrentías, sin embargo las condiciones de humedad del suelo favorecieron la percolación y por ende la pérdida de nitrógeno por lixiviación.

En la Figura(5.10), se observa que la pérdida de fósforo se produce cuando existe escorrentía superficial, esto se debe a que el fósforo es poco móvil y se encuentra

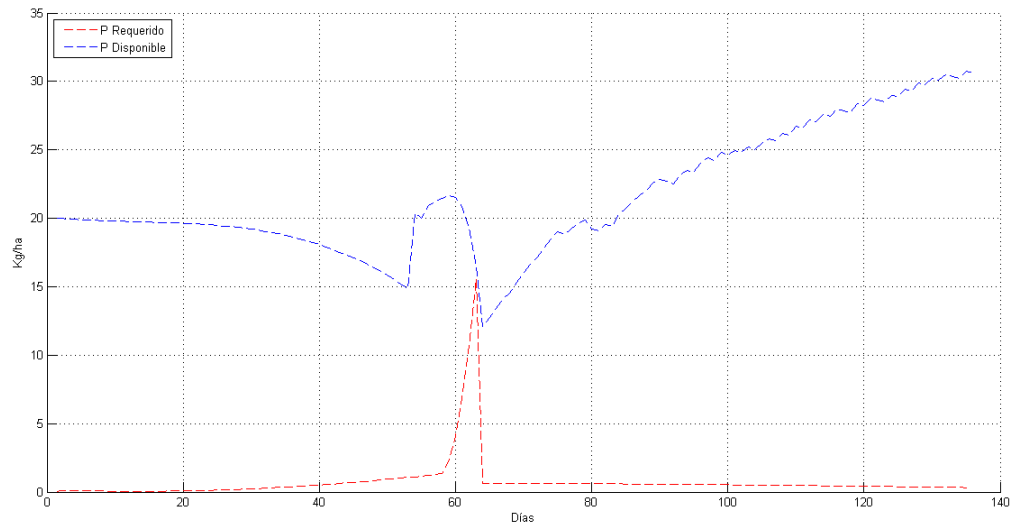


Figura 5.8: Variación temporal del Fósforo disponible y requerido por el cultivo

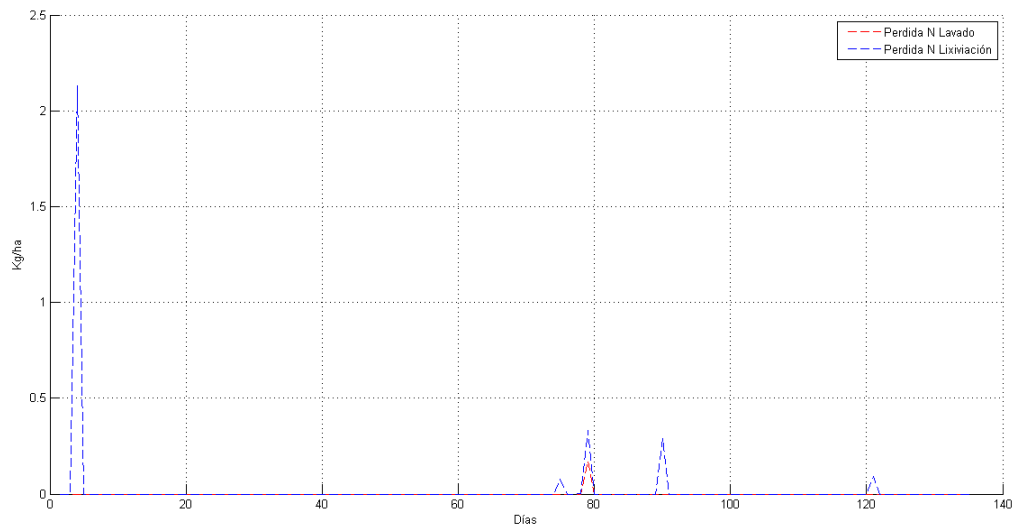


Figura 5.9: Estimación del Nitrógeno removido por lavado y Lixiviación

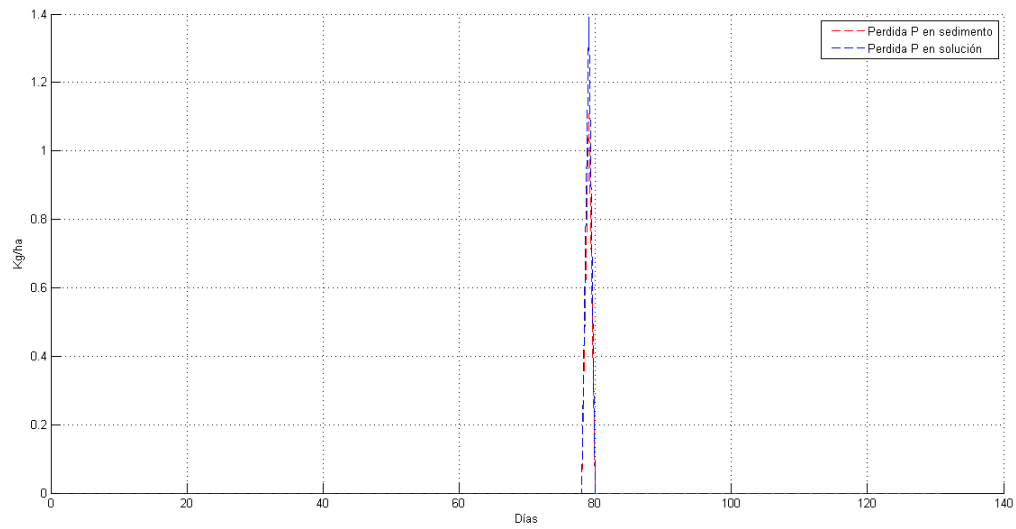


Figura 5.10: Estimación del fósforo removido por arrastre de sedimentos y en solución

principalmente adherido a los coloides del suelo.



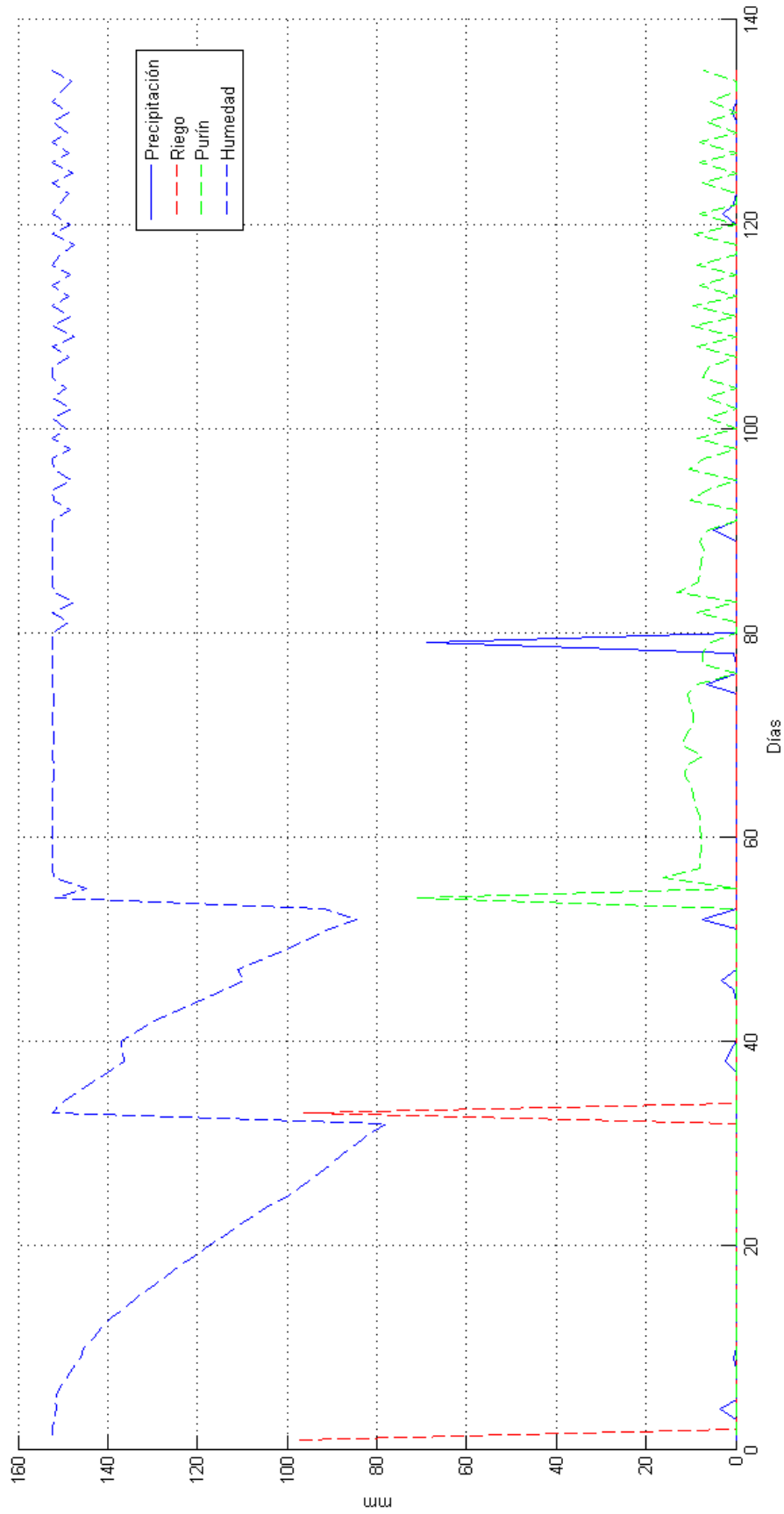


Figura 5.11: Variación temporal del contenido de agua en el suelo

La Figura(5.12), muestra como se comportan las curvas de demanda y oferta del Nitrógeno a diferentes concentraciones de nitratos presente en el purín al momento de la aplicación, se desprende rápidamente que aún cuando el purín presente altas concentraciones de nitrógeno mineral, este no es capaz de satisfacer la demanda del cultivo en el periodo de mayor necesidad, dado principalmente a que la relación carbono nitrógeno favorece la conversión microbiana del nitrógeno inorgánico a nitrógeno orgánico. Un dato importante que es posible observar tiene relación con momento de la aplicación ya que al aplicar purín antes del periodo de máxima demande se obtendría una acumulación que permitiría disminuir la brecha entre oferta y demanda, sin embargo se corre el riesgo de generar la condiciones ideales y latentes para una mayor pérdida al momento de eventos extremos de precipitaciones.



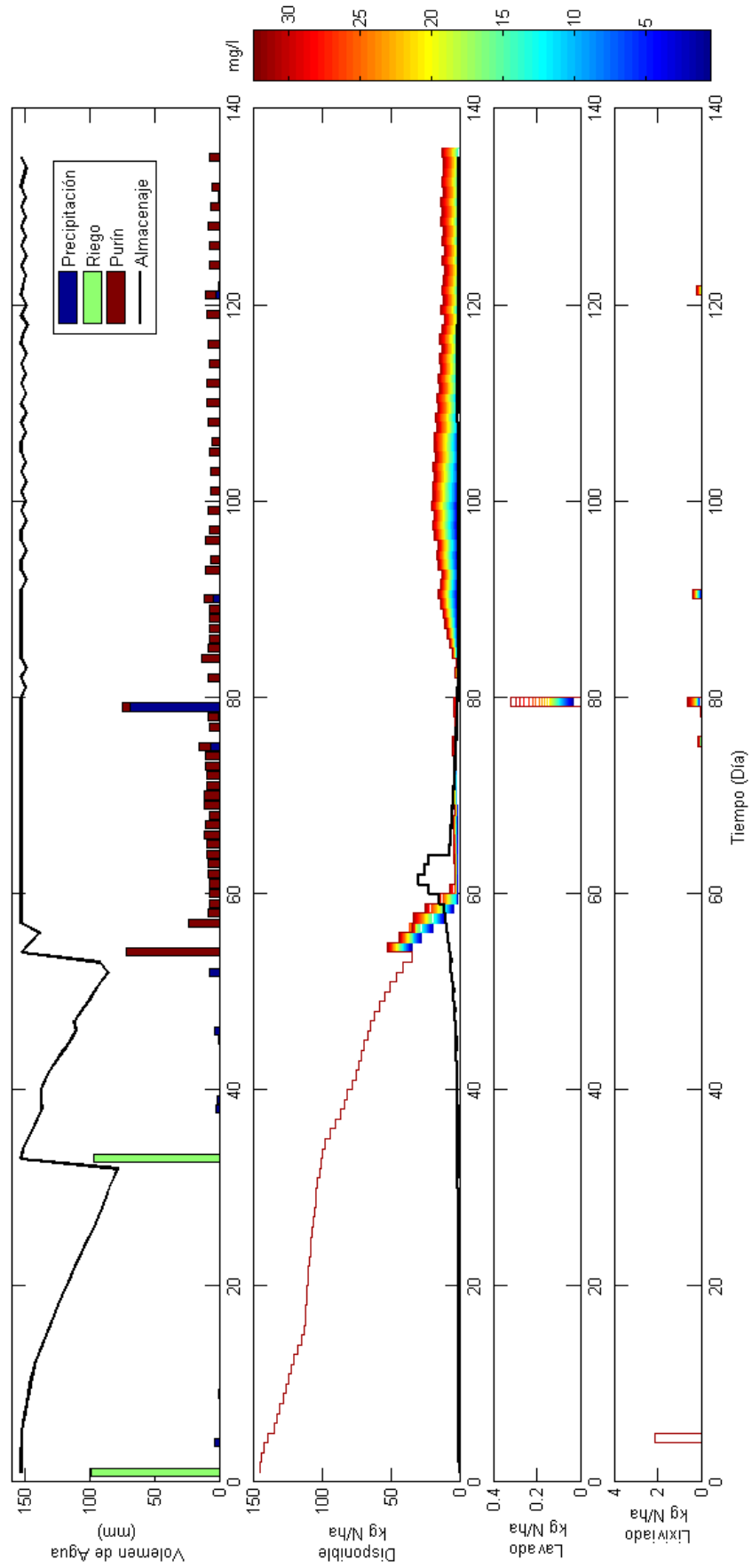


Figura 5.12: Variación de las concentración N disponible en el suelo

La Figura(5.13), muestra una fuerte relación de concentración de fósforo en el purín respecto a la concentración acumulado de fósforo en el suelo, esto se debe en primera medida la baja necesidad del cultivo en relación al nitrato y la poca movilidad y reacción de él con el medio.



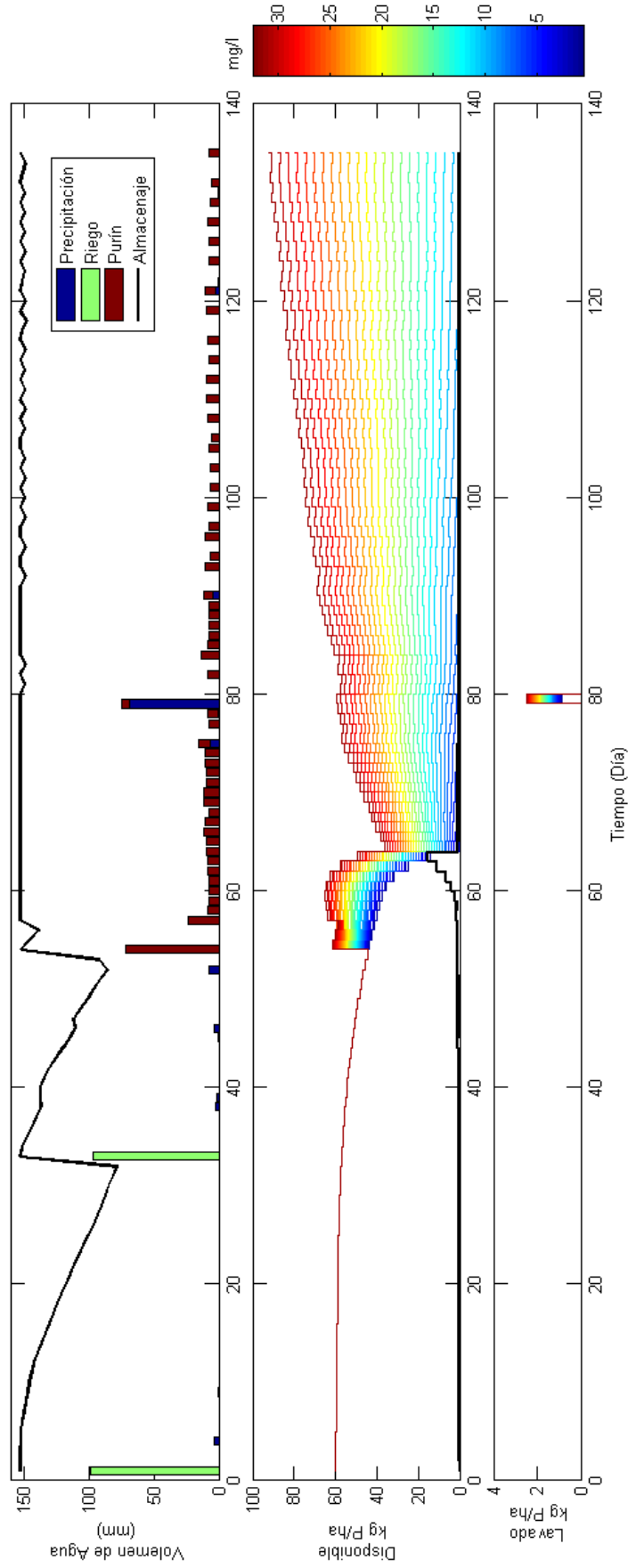


Figura 5.13: Variación de las concentraciones de P soluble en el suelo

Al simular dos pulsos de lluvia de 100 mm para los días 10 y 11, es posible observar en la Figura(5.14), que existe un descenso importante tanto del nitrógeno disponible como del fósforo soluble en el suelo, esto se debe a que las condiciones de humedad presentes en el suelo antes de las lluvia, facilitan e influyen fuertemente en la pérdida de los nutrientes ya sea por lixiviación y/o lavado, lo anterior implica que la aplicación de purín se adelanta alrededor de días en comparación en con la condición natural (figura 5.11), de lo anterior se desprende que un buen manejo de la fertilización en el ciclo del cultivo, evitando una acumulación excesiva de nutrientes en el suelo, permitiría disponer en forma segura de un mayor volumen de purín en el predio y disminuyendo el riesgo de pérdidas importantes de estos nutrientes a cursos de aguas u otros sectores adyacentes al predio.



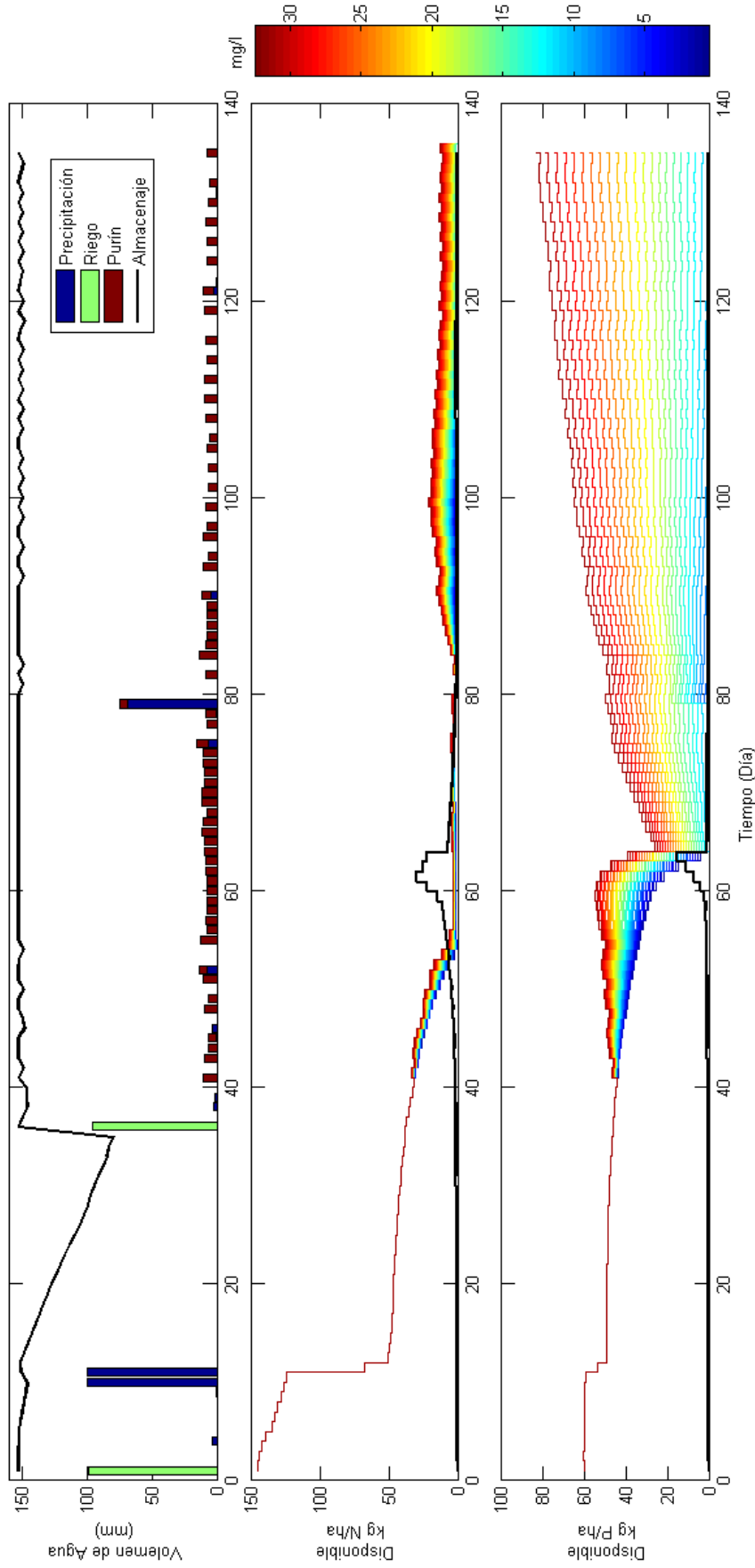


Figura 5.14: Variación de las concentraciones de P soluble en el suelo

Cuadro 5.5: Cantidad de Purín y día de aplicación entregado por SGPF

Día	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Día	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Día	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Día	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>	Día	m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup>
54	713,9	66	112,5	78	75,2	94	60,9	114	79,5
56	159,9	67	109,3	79	55,9	96	102,7	116	85,3
57	81,3	68	74,3	82	86,6	97	71,7	119	93,0
58	78,9	69	119,5	84	130,1	99	85,3	121	81,3
59	76,8	70	111,4	85	82,8	101	62,0	124	74,6
60	75,9	71	96,4	86	79,0	103	63,6	126	79,5
61	78,5	72	94,4	87	76,8	105	74,0	128	81,2
62	80,9	73	101,4	88	72,1	106	57,4	130	66,2
63	89,6	74	106,6	89	79,5	108	86,7	132	56,6
64	95,8	75	87,3	90	62,0	110	96,5	135	71,9
65	99,1	77	72,7	93	102,2	112	94,3		

## 5.4. Recomendaciones

- ✦ En primer lugar es de suma importancia crear un plan de manejo y caracterización de los residuos, que permita conocer la cantidad y concentraciones de los purines en diferentes tiempos.
- ✦ Implementar una metodología de ordenamiento territorial que permita identificar zonas susceptibles a las pérdidas de nutrientes, asociadas a la aplicación de purines de cerdo como bio-abono, la que permitirá conocer los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales en cada sector de los predios.
- ✦ **Reducción de Residuos en el Origen:** (CNPL, 2007) La reducción en el origen elimina o disminuye la necesidad de tratamiento y disposición de los residuos. Incluye el uso racional de los recursos, materias primas, insumos y energía, y el uso de materiales menos nocivos para el medio ambiente. Para

alcanzar este punto destacan:

1. **Cambios en las materias primas o insumos:** Corresponde al uso de materias primas e insumos que no generen o que generen un nivel inferior de residuos indeseables o peligrosos.
2. **Cambios de tecnología:** Esto significa modificar sistemas obsoletos o costosos por tecnologías adecuadas donde la inversión es recuperada en el corto plazo, por el ahorro de materias primas e insumos y/o mejoramiento de la productividad.
3. **Cambios en las prácticas de operación:** La aplicación de buenas prácticas de gestión de operaciones en la empresa se basa en la aplicación de una serie de procedimientos y/o políticas organizacionales y administrativas destinadas a mejorar y optimizar los procesos productivos y a promover la participación del personal en actividades destinadas a lograr la minimización de los residuos.

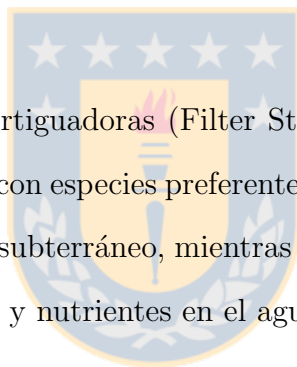
✠ Mantener un sistema de rotación de cultivos que permita aprovechar una mayor cantidad de fertilizantes derivados de purines. Esto implica considerar "cultivos limpiadores o de alto requerimiento nutricional", con el fin que ellos permitan reducir la acumulación de nutrientes en el suelo (Raps, maravilla, entre otros).

✠ Cuando sectores de manejo presenten napas freaticas someras, deberán establecerse cultivos cuya profundidad radicular efectiva se encuentre sobre

este nivel, además se debe evitar aplicar purín en periodo invernal, y época de riego se deberán manejar criterios de riego mas estrictos donde la eficiencia de este sea alta, siendo los riegos realizados por personal capacitado.

- ✠ Las aplicaciones en el otoño o invierno están expuestas a un alto riesgo de lixiviación. Esto implica que las aplicaciones que se realicen en dicha época deberán ser cuidadosamente controladas. Es preferible realizar las mayores aportaciones en primavera cuando las necesidades del cultivo son más elevadas y el riesgo es menor.

- ✠ Definir áreas amortiguadoras (Filter Strip) en los potreros con pendientes media o mayores, con especies preferentemente nativas. Estas zonas filtran el flujo superficial y subterráneo, mientras que las raíces captan y transforman los contaminantes y nutrientes en el agua subterránea poco profunda.



# Conclusiones

---

### 6.1. Conclusión

Frecuentemente los planes de manejo predial consideran los suelos como unidades homogéneas, lo que provoca problemas de degradación y contaminación de las aguas. Esto se produce porque la cantidad de agua y fertilización aplicada es mayor que la capacidad de retención del suelo y las necesidades del cultivo. Por ende, el agua infiltra hacia zonas en las que las raíces del cultivo no pueden acceder, arrastrando consigo los nutrientes, además de producir escorrentías superficiales lo que provocara pérdida de suelo y arrastre de contaminantes. Conocer la textura, profundidad del suelo, entre otras características, además de contar con una adecuada conceptualización del área de interés y sus posibles amenazas es una información valiosa y necesaria para caracterización del riesgo ambiental en un predio agrícola lo que permitiría planificar la aplicación de purín, minimizando la lixiviación y el lavado del suelo, y generando un menor impacto en el ecosistema circundante.

Se desarrolló una metodología utilizando conjuntos difusos, para identificar zonas susceptibles a las pérdidas de nutrientes, asociadas a la aplicación de purines de cerdo como bio-abono, la que permitió conocer los riesgos de contaminación de las aguas subterráneas y superficiales en cada subsector del predio. Una

de las ventajas de la metodología propuesta, es que utiliza combinaciones de aproximaciones cualitativas y cuantitativas, de manera que las particularidades de cada caso pueden ser introducidas a través de interpretaciones valóricas que realice un panel de expertos. En consecuencia, se trata de una metodología sencilla, flexible que resulta fácilmente extrapolable a la realidad de otros predios. La inclusión del factor temporal, en relación a las labores de gestión y manejo predial, deslumbra como una interesante herramienta para la evaluación y planificación predial, posibilitando una rápida interpretación de la naturaleza del riesgo.

La información base necesaria para los análisis de riesgo y vulnerabilidad con la metodología propuesta, existe y se encuentra al alcance de los productores, con lo cual se supera uno de los principales problemas al momento de planificar y gestionar el uso de las tierras, para la disposición de purines. La información por ser proporcionada por el gobierno de Chile, es válida para los organismos fiscalizadores, esto es de gran importancia y hace posible adjuntar y o anexar dicha metodología dentro de los informes ambientales que pudiesen solicitar los estamentos evaluadores de gestión ambiental, como la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), Servicio Nacional de Salud (SNS) y Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).

La aplicación de la metodología, mostró que el predio en general posee un riesgo medio de lixiviación y lavado por escorrentía, por consecuencia, un riesgo medio asociado a la aplicación de purines. Luego las disimilitudes encontradas en el sector D entre las capas temáticas de lixiviación y lavado, confirma que para un proceso extremo la metodología es capaz de caracterizarlo, luego los resultados obtenidos fueron validados en terrenos por un grupo de expertos, lo que permite concluir que con la metodología propuesta, es posible diferenciar los riesgos en un predio,

ligados a la lixiviación y lavado de nutrientes, con lo que se valida los índices de riesgo ambiental asociado a la aplicación de purines.

Estimular la gestión sostenible del ecosistema, a través de mejoras en las actividades de planificación del uso de las tierras y desarrollar una metodología enfocada en reducir riesgo y vulnerabilidades con acento especial en la prevención y mitigación de los riesgos asociados a la aplicación de purines, concierne a múltiples sectores de la sociedad, donde la comunidad, el estado y la empresa privada deben trabajar en forma holística en el contexto del desarrollo sostenible.

El sector agropecuario Chileno debe validar este sistema de soporte de decisión en diferentes condiciones, SGPF les permitirá estimar las posibles pérdidas de los nutrientes lo que les posibilitaría realizar un plan de manejo de residuos adecuado, basado en una carga máxima de aplicación de purín, es por ello que se debe estandarizar los elementos del balance de nutrientes a nivel predial, basando los requerimientos de información en datos de buena calidad, fácilmente disponibles y referenciales, permitirá que el SGPF genere estimaciones robusta, posibilitando una correcta disposición final de los purines.

Esta investigación presenta una importante herramienta de soporte de decisión para la gestión de los purines basado en un conjunto de pantallas amigables para el usuario, este sistema de soporte de decisión es flexible y amigable en cuanto a que puede ser utilizado en áreas con diferentes características tanto de suelo como climática, además puede ser utilizado con diferentes fuentes de purín y usuarios.

El beneficio económico de utilizar el purín (Costo-beneficio) como fuentes de nutrientes para los cultivos es de gran importancia para los productores y

un cambio de mentalidad de la comunidad frente a este recurso, beneficiando directamente el rendimiento efectivo de los cultivos y una sustentabilidad ambiental del medio.



# Bibliografía

---

- Abelardo, V. P. (2003). Tratamiento de aguas residuales mediante métodos naturales. Technical report, Universidad de Concepcion.
- Abelardo, V. P. (2004). Hidrología ambiental. Technical report, Universidad de Concepción.
- Adhikari M. and Paudel K.P. and Martin N.R. and others (2005). Economics of dairy waste use as fertilizer in central Texas. *Waste management*, 25(10):1067–1074.
- Alfaro, M. and Salazar, F. (2005). Livestock production and diffuse pollution, implications for southern chile. *Agricultura técnica*, 65:330–340.
- Allen, S. D. and Embleton, K. M. (2001). The livestock manure storage program.
- Andreu, J., Betrán, J., Delgado, I., Espada, J., Gil, M., Gutiérrez, M., Iguácel, F., Isla, R., Muñoz, F., Orús, F., Pérez, M., Quílez, D., Sin, E., and Yagüe, M. (2006). *Fertilización Nitrogenada*. Talleres Editoriales Cometa, S.A.
- Aquino, S. R. D. (1996). Evaluaciones de impacto ambiental: utilidad de los modelos matemáticos semiempíricos. *Gerencia Ambiental*, 25:410–413.
- Arauzo, M., Díez, J., and Hernáiz, P. (2003). Estimación de balances hídricos y lixiviación de nitratos en sistemas agrícolas. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, VI:39–44.
- Artiola, J. F., Pepper, I. L., and Brusseau, M. L. (2004). *Environmental monitoring and characterization*. Elsevier Academic Press.
- Arumí, J., D.L.Martin, and D.G.Watts (2000). Modelación de las prácticas de manejo agrícola en las aguas subterráneas. University of Nebraska, U.S.A.
- Arumí, J. L., Cortés, A., and Sandoval, L. (2001). Análisis de vulnerabilidad de las aguas subterráneas de la cuenca del río chillan mediante un modelo sig. *Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Agua, Vida y Desarrollo. Santiago de Chile, IICA*, pages 1–10.

- Arumí, J. L. and Jimenez, A. (2000). Uso de buenas prácticas de manejo para controlar el impacto ambiental de la actividad agrícola. Technical report, Universidad de Concepción, Facultad de ingeniería agrícola.
- Arumí, J. L. and Jones, D. (2001). Metodología para el análisis de riesgo en estructuras de riego. *Ingeniería hidráulica en México*, XVI(3):67–74.
- Arumí, J. L. and Silva, F. O. (2002). Estudio de análisis y aplicación de modelos numéricos a problemas de agua subterránea. EULA.
- ASPROCER (2005). Implementación de buenas prácticas agropecuarias en el sector de producción porcino intensiva. Technical report, Consejo Nacional de Producción Limpia (CPL).
- Auge, M. (2004). Vulnerabilidad de acuíferos, conceptos y métodos. Technical report, Universidad de Buenos aires. CONICET.
- Avilés, J. B., Cáceres, E. G., and Campusano, D. M. (2003). Estimación de caudales y sedimentos en la cuenca del río chaguana, mediante el modelo matemático avswat. *Revista Tecnológica*, 17:152–161.
- Bakhsh, A., Kanwar, R., and Karlen, D. (2005). Effects of liquid swine manure applications on NO<sub>3</sub>-N leaching losses to subsurface drainage water from loamy soils in Iowa. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 109(1-2):118–128.
- Behera, S. and Panda, R. (2006). Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model. *Agriculture, Ecosystems and environment*, 113:62–72.
- Belmonte, C., María, A., and García, S. (2008). Peligro, vulnerabilidad y riesgo de inundación en ramblas mediterráneas. *Cuadernos de geografía (Valencia)*, 83(83):1–26.
- Belmonte, S. and Núñez, V. (2006). Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas s.i.g. *International Review of Geographical Information Science and Technology*, 6:17–27.
- Benites, E. T., Mota, J. L. O., and Reynoso, D. S. F. (2000). Aplicación del modelo swat en la cuenca "el tejocote", atacomulco, estado de México. In *Manejo Integral de Cuencas Hidrológicas*. Congreso nacional de irrigación, México.
- Berenguer, P., Santiveri, F., Boixadera, J., and Lloveras, J. (2008). Fertilisation of irrigated maize with pig slurry combined with mineral nitrogen. *European Journal of Agronomy*, 28(4):635–645.
- Beven, K. J. (2001). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. John Wiley & Sons Inc.
- Bingner, R. (1990). Comparison of the components used in several sediment yield models. *Transactions of the ASAE (USA)*, 33:1229–1238.

- Birkmann, J. and Nishara, F. (2008). Measuring revealed and emergent vulnerabilities of coastal communities to tsunami in sri lanka. *Disasters*, 32(1):82–105.
- Birkmann, J. and Wisner, B. (2006). Measuring the un-measurable. the challenge of vulnerability. *United Nations University-Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS)*, 5:10–12.
- Bloschl, G. and Sivapalan, M. (1995). Scales issues in hydrological modelling. *Hydrological Processes*, 9:251–290.
- Buyse, J., Van Huylenbroeck, G., Vanslembrouck, I., and Vanrolleghem, P. (2005). Simulating the influence of management decisions on the nutrient balance of dairy farms. *Agricultural Systems*, 86(3):333–348.
- Cano, Y. C., Arpasi, J. P., Román, H., and Álvarez, G. (2009). Una aproximación de números difusos de tipo trapezoidal. *Ingeniare. Rev. chil. ing*, 17(2):158–165.
- Cardona, O. D. (2001). La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo. una crítica y una revisión necesaria para la gestión. *Centro de Estudios sobre Desastres y Riesgos, Universidad Nacional de Los Andes, Bogotá, Colombia*.
- Carrasco, M. R. Y., de Viteri, D. Q. S., Soteras, F. I., and Pueyo, F. O. (2008). *Métodos rápidos de análisis como herramienta de gestión en la fertilización con purín porcino: conductimetría*. Departamento de Agricultura y Alimentación del Gobierno de Aragón y Unión Europea.
- Castillo, J., Rodríguez, D., Rivera, A. M., Zamorano, G., and Acuña, H. (2000). Uso de tecnologías limpias: Experiencias prácticas en Chile. Technical report, Ministerio de Economía.
- Centro de Ciencias Ambientales, (EULA) (2002). Desarrollo de una metodología para la evaluación y mitigación de la contaminación de aguas y suelo: Aplicación a la cuenca del río chillán. Proyecto sag n.º viii-436-0199, Universidad de Concepción, Chile.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). (1999). *Descripciones de suelos y materiales y símbolos- Estudios Agrológicos de la VII región*. Ciren n.º 121.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill.
- Cirelli, A. F., Holzapfel, E., del Callejo, I., and Billib, M. (2009). *Manejo Sostenible del Agua para Riego en Sudamérica*. Knowledge Assessment on Sustainable Water Management for Irrigation.
- CNPL (2007). Acuerdo de producción limpia sector productores de cerdos.

- C.N.R. (2008). Biofiltros vegetales que purifican las aguas de riego. *Chileriego*, 33:40–45. Comisión nacional de riego.
- Comerma, J., Guenni, L., and Medina, G. (1986). Validación del balance hídrico del modelo cereales maíz en la zona de maracay, estado aragua venezuela. *Agronomía Tropical*, 35:115–132.
- D.G.A. (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos de agua según objetivos de calidad, cuenca del río itata. Informe. Dirección General de Aguas.
- Domínguez, S. O. and Cano, A. F. (2009). Utilización sostenible de purines de cerdo, con y sin tratamiento, como enmienda orgánica en cultivos de almendro. Technical report, Congreso Internacional sobre Desertificación.
- Dumont, J. C. (2000). Impacto ambiental de la actividad ganadera. Technical Report 32, INIA.
- Echavarrí, V. V. (2009). Mercados agropecuarios "la carne de cerdo". Technical report, Oficina de estudios y políticas agrarias.
- Elizondo, W. and Casanova, M. (1994). *Suelos, una visión actualizada del recurso. Morfología de suelos*, volume 38, chapter 3. Universidad de Chile, 2 edition.
- Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., and Arabi, M. (2007). A hydrologic/water quality model application protocol. *American Water Resources Association*, 43(5):1223–1236.
- EPA (2002). *Guidance for Quality Assurance Project Plans for Modeling. EPA QA/G-5M*. Office of Environmental Protection Information, Washington, D.C. United States Environmental Protection Agency.
- Espinosa, M. (2007). Determinación de un índice potencial de erosión para ser utilizado en un sistema de información geográfico. Master's thesis, Universidad de Concepción, Chillan-Chile.
- Faz, A., Llona, M., Tortosa, J., Palop, A., Andujar, M., and Lobera, J. (2003). Utilización de purines de cerdo para fertilización de cultivos hortícolas como sustitución de fertilización mineral en Lorca (Murcia). In *Simposio Nacional sobre control de erosión y degradación del suelo*. Instituto Madrileño de Investigación Agraria. Madrid, España.
- Fernald, A., editor (2002). *Groundwater/Surface Water Interactions*. New Mexico Water Resources Research Institute.
- Ferreira, R., Sellés, G., Ahumada, R., Maldonado, P., Gil, P., and Barrera, C. (2005). *Manejo del Riego Localizado y Fertirrigación*. Number 126. Quillota.
- Gardenas, A., Hopmans, J., Hanson, B., and Simunek, J. (2005). Two-dimensional modeling of nitrate leaching for various fertigation scenarios under micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, 74:219–242.

- Gassman, P. W., Osei, E., Saleh, A., Rodecap, J., Norvell, S., and Williams, J. (2006). Alternative practices for sediment and nutrient loss control on livestock farms in northeast iowa. *Agriculture, Ecosystems and environment*, 117:135–144.
- Gassman, P. W., Williams, J. R., Benson, V. W., Izaurralde, R. C., Hauck, L. M., Jones, C. A., Atwood, J. D., Kiniry, J. R., and Flowers, J. D. (2004). Historical development and applications of the epic and apex models. In *ASAE/CSAE annual international meeting in Ottawa*.
- Gea, M., Gutiérrez, F. L., Garrido, J. L., and Cañas, J. J. (2003). *Teorías y Modelos Conceptuales para un Diseño basado en Grupos*. Universidad de Granada.
- Gevaert, V., Griensven, A. V., Holvoet, K., Seuntjen, P., and Vanrolleghem, P. A. (2008). Swat developments and recommendations for modelling agricultural pesticide mitigation measures in river basins. *Hydrological Sciences*, 53:1075–1089.
- Gómez, J. J. (2001). Vulnerabilidad y medio ambiente. Seminario "Las diferentes expresiones de la vulnerabilidad social en América Latina y el Caribe", Santiago, Chile. Naciones Unidas.
- Gómez, P., Castillo, V., and Albadalejo, J. (1998). Estudio de procesos hidrológicos a diferentes escalas "marco teórico y propuesta metodológica". *Norba. Revista de geografía*, 10:81–94.
- Habit, E. C. and Parra, O. B. (2001). Impacto ambiental de los canales de riego sobre la fauna de peces. *Ambiente y Desarrollo*, 17(3):52–60.
- Harris, B., Hoffman, D., and Mazac, F. (1996). Reducing the risk of ground water contamination by improving livestock manure storage and treatment facilities. Technical report, Texas Agricultural Extension Service, Texas A & M University System.
- Hedlund, A., Witter, E., and Xuan An, B. (2003). Assessment of N, P and K management by nutrient balances and flows on peri-urban smallholder farms in southern Vietnam. *European journal of agronomy*, 20(1-2):71–87.
- Higgins, S., Coyne, M., Shearer, S., and Crutchfield, J. (2005). Determining nitrogen fractions in swine slurry. *Bioresource technology*, 96(9):1081–1088.
- Hirzel, J. and Best, S. (2002). Necesidad nutricional del cultivo del maíz en el valle regado de la viii región. Technical Report 15(3) Pag.49-51, Instituto de Investigación Agropecuarias (INIA).
- Humenik, F., Smolen, M., and Dressing, S. (1987). Pollution from non point sources. *Environ. Sci. Technol.*, 21:737–742.
- INE (2009). Producción pecuaria, informe anual. Technical report, Instituto Nacional de Estadísticas.

Iosu, A. I. and Abaigar, A. (2002). Purin de porcino, ¿fertilizante o contaminante? Technical report, Instituto Técnico y de Gestión Ganadero, España.

IUPA (2008). Contaminación de origen agrícola. <http://www.agua.uji.es/pdf/leccionRH21.pdf>. Instituto Universitario de Plaguicidas y Aguas, Universidad Jaume I de Castellón.

Jarvis, P. and McNaughton, K. (1986). Stomatal control of transpiration: scaling up from field to region. *Advances in Ecological Research*, 15:1–49.

Javaux, M., Vanderborght, J., Kasteel, R., and Vanclooster, M. (2006). Three-dimensional modeling of the scale and flow rate-dependency of dispersion in a heterogeneous unsaturated sandy monolith. *Vadose Zone Journal*, 5:515–528.

Kalma, J. and Sivapalan, M. (1995). *Scale Issues in Hydrological Modelling*. Wiley.

Kemp, M. and Dodds, W. (2001). Spatial and temporal patterns of nitrogen concentrations in pristine and agriculturally influenced prairie streams. *Biogeochemistry*, 53:125–141.

Kirchner, J. W. (2006). Getting the right answers for the right reasons: Linking measurements, analyses, and models to advance the science of hydrology. *Water Resources Research*, 42:W03S04.

Klemes, V. (1983). Conceptualization and sale in hydrology. *Journal of Hydrology*, 65:1–23.

Klohn, W. and Wolter, W. (1998). Perspectives on food and water. In *the International Conference of Water and Sustainable Development*, pages 1–6.

Kohn, R., Dou, Z., Ferguson, J., and Boston, R. (1997). A sensitivity analysis of nitrogen losses from dairy farms. *Journal of Environmental Management*, 50(4):417–428.

Krause, P., Boyle, D., and Base, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5:89–97.

Lantarón, J. H., Rojas, M. R., and Benítez, A. A. (2004). Modelos integrales de cuencas hidrográficas y prognosis de escenarios de gestión. swat aplicado a la cuenca del guadalfeo. Master's thesis, Universidad de Granada.

Lee, C. (1990). Fuzzy logic in control systems: Fuzzy logic controller—part I. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 20(2):404–418.

Legates, D. R. and McCabe, G. J. (1999). Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35:223–241.

- Lewis, D., McGechan, M., and McTaggart, I. (2003). Simulating field-scale nitrogen management scenarios involving fertiliser and slurry applications. *Agricultural Systems*, 76(1):159–180.
- Llano, L., Zapata, G., and Ovalle, D. (2007). Sistema de Inferencia Difuso para Identificar Eventos de Falla en Tiempo Real del STE usando Registros SOE Fuzzy Inference System to Identify Faults Events in Real Time using SOE Registries. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 4(2):125–134.
- Llona, M. C. and Faz, A. C. (2006). Efectos en el sistema suelo-planta después de tres años de aplicación de purín de cerdo como fertilizante en un cultivo de brócoli (*brassica oleracea l.*). *Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*, VI N° 1:41–51.
- Llorens, P. (2003). La evaluación y modelización del balance hidrológico a escala de cuenca. *Ecosistemas*, 12:237–241.
- Lory, J. A., Ray, M., and Bradbury, J. (2002). Using manure as a fertilizer for crop production. Technical report, U.S. Environmental Protection Agency.
- López, A. and Link, O. (2001). Análisis de sensibilidad de un modelo de plaguicidas desde un predio agrícola. *Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica*, 16(1):19–28.
- Luzio, M. D., Srinivasan, R., and Arnold, J. (2000). *Arcview Interface for SWAT 2000 User Guide*.
- Martínez, M., Delgado, P., and Fabregat, V. (1998). Aplicación del método DRASTIC para la evaluación del riesgo de afección a las aguas subterráneas por una obra lineal. *Jornadas sobre la contaminación de las aguas subterráneas: un problema pendiente*. Valencia, AIHGE, 413:420.
- Martínez, Y. M., Karaj, S. U., and Murillo, J. A. (2002). El control de la contaminación por nitratos en el regadío. *Economía Agraria y Recursos Naturales*, 2(2):115131.
- Matta, M. L. (2007). Evaluación de la lixiviación de nitrato en huertos frutales bajo condiciones de riego presurizado. Master's thesis, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola.
- Mayoral, M. A. (2003). Aplicación de purines de cerdo en alfalfa. *MG Mundo ganadero*, 155:42–44.
- McFarland, M., Provin, T., and Feagley, S. (1997). Managing Crop Nutrients Through Soil, Manure, and Effluent Testing. Technical report, Texas Agricultural Extension Service, Texas A&M University System.
- Medellín, F., Ramirez, M., and Rincón, M. (2004). Trichoptera del santuario de iguaque (boyacá, colombia) y su relación con la calidad del agua. *Rev. Colomb. Entomol*, 30(2):197–203.

- Merino, C. O. (2009). Modelación del transporte de agroquímico. Master's thesis, Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola.
- Monari, A. M. (2004). Manual para la aplicación del concepto de vulnerabilidad de acuíferos establecido en la norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Technical report, DGA, Director General de Aguas, Depto. de Conservación y Protec. de Rec. Hídricos. S.D.T.; N° 170.
- Morgan, R. P. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. Mundi-Prensa Libros.
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. V., Bingner, R. L., Harmel, R. D., and Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50:885–900.
- Morin, L. and Rey, J. (2009). Evaluación de la vulnerabilidad a la degradación agroambiental a través del uso del sistema microleis en los suelos de los llanos centrales de Venezuela. *Rev. Int. Contam. Ambient*, 25(1):43–60.
- Naciones Unidas (2005). Conferencia mundial sobre la reducción de los desastres. In *Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015: Aumento de la resiliencia de las naciones y las comunidades ante los desastres*.
- Nash, J. and Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part i, a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10:282–290.
- Nazal, M. M. and Cabezas, B. V. (2008). Guía técnica de buenas prácticas. “recurso natural agua, suelo, aire y biodiversidad”. Technical report, Comisión Nacional de Buenas Prácticas Agrícolas.
- Negahban, B. (1991). Estimating models parameters and validation. Lab Report 1.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., and Williams, J. (2005). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*. Grassland, Soil and Water Research Laboratory O Agricultural Research Service, 808 East Blackland Road O Temple, Texas 76502.
- Nkonya, E., Kaizzi, C., and Pender, J. (2005). Determinants of nutrient balances in a maize farming system in eastern Uganda. *Agricultural Systems*, 85(2):155–182.
- Novotny, V. and Olem, H. (1994). Water quality: Prevention, identification, and management of diffuse pollution. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Öborn, I., Edwards, A., Witter, E., Oenema, O., Ivarsson, K., Withers, P., Nilsson, S., and Richert Stinzing, A. (2003). Element balances as a tool for sustainable nutrient management: a critical appraisal of their merits and limitations within an agronomic and environmental context. *European journal of agronomy*, 20(1-2):211–225.

- ODEPA (2008). Evolución reciente de los precios de los fertilizantes. Technical report, Oficina de Estudios y Políticas Agrarias.
- Olson, B. M. and Kalischuk, A. R. (2008). Application of the ceot model to alberta watersheds. Technical Report Sección 6, Alberta Agriculture and Rural Development, Lethbridge, Alberta, Canada. <http://www1.agric.gov.ab.ca/departament/deptdocs.nsf/all/epw11955/FILE/10report08-modeling.pdf>.
- O'Neill, R. V., Deangelis, D. L., Waide, J. B., and Allen, G. E. (1986). *A Hierarchical Concept of Ecosystems*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- Ongley, E. (1997). *Lucha contra la contaminación agrícola de los recursos hídricos*. Food and Agriculture Organization.
- Payet, N., Findeling, A., Chopart, J., Feder, F., Nicolini, E., Saint Macary, H., and Vauclin, M. (2009). Modelling the fate of nitrogen following pig slurry application on a tropical cropped acid soil on the island of Réunion (France). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 134(3-4):218–233.
- Peralta, J. M., Araya, A., and Herrera, C. (2005). *Recomendaciones Técnicas para la Gestión Ambiental en el Manejo de Purines de la Explotación Porcina*, chapter Manejo de purines porcinos y tecnologías aplicables, pages 5–89. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Peralta, M. (1976). Uso, clasificación y conservación de suelos. Technical report, Santiago: Ministerio de Agricultura, Servicio Agrícola y Ganadero.
- Pinto, M. C., Elizondo, W. V., Leighton, W. L., and Guerrero, O. S. (2004). *Edafología*. Universidad de Chile Departamento de ingeniería y Suelos. Guía de clases prácticas.
- Prechtela, A. and Knabner, P. (2002). Accurate and efficient simulation of coupled water flow and nonlinear reactive transport in the saturated and vadose zone application to surfactant enhanced and intrinsic bioremediation. *Developments in Water Science*, 47:687–694.
- Pruzzo, L. (2006). Introducción al análisis de riesgo ambiental. Technical report, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Pueyo, R. P. (2005). *Procesado y Optimización de Espectros Raman mediante Técnicas de Lógica Difusa: Aplicación a la identificación de Materiales Pictóricos*. PhD thesis, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUNYA.
- Quiñonez, E. and Dal Pozzo Montuchio, F. (2008). Distribución espacial del riesgo de degradación de los suelos por erosión hídrica en el Estado Lara, Venezuela. *Geoenseñanza*, 13:1.

- Rivera, D. (2006). *Influencia de la interacción agua superficial, subterránea y de riego en el transporte de contaminantes de origen agrícola*. PhD thesis, Facultad de Ingeniería Agrícola, Universidad de Concepción.
- Rivera, D., Arumí, J. L., and Holzapfel, E. (2005). Impact analysis of agricultural activities in peumo valley, chile. *Gestión Ambiental*, 11:59–80.
- Rivera, D., Arumí, J. L., and Holzapfel, E. (2007). Efecto de la red de canales y sistemas de riego en la hidrología del valle de peumo, chile. *Ingeniería Hidráulica en México*, 22(4):115–119.
- Rosen, C. and Eliason, R. (1996). *Nutrient management for commercial fruit & vegetable crops in Minnesota*. Minnesota Extension Service, University of Minnesota.
- Saleh, A. (2004). Application of swat and apex models using swap (swat/apex program) for upper north bosque river watershed in texas. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*.
- Saleh, A., Gallego, O., and Osei, E. (2007). *SWAPP user interface guide*. Tarleton State University, tiae edition.
- Saleh, A., Osei, E., and Gallego, O. (2008). Use of ceet-swapp modeling system for targeting and evaluating environmental pollutants. In *Improving Water Quality and Environment*. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 21st Century Watershed Technology.
- Saleh, A., Osei, E., Gassman, P. W., and Hauck, L. M. (2005). Application of the comprehensive economic and environmental optimization tool (ceet) for evaluating bmps. *Water Environment Federation, National TMDL science and policy*, 31:344–374.
- Sans, F. (2007). La diversidad de los agroecosistemas. *Ecosistemas*, 16(1):44–49.
- Sawyer, J. and Mallarino, A. (2008). Using manure nutrients for crop production. Technical report, Iowa State University.
- Óscar, E. (1998). Conceptos básicos de simulación hidrológica. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Agronomía, Campus Maracay, Conservación de Suelos y Aguas.
- Schröder, J., Bannink, A., and Kohn, R. (2005). Improving the efficiency of nutrient use on cattle operations. In Pfeffer, E., editor, *Nitrogen and Phosphorus Nutrition of Cattle, Reducing the Environmental Impact of Cattle Operations*. CABI Publishing.
- Seguí, P. Q. (2007). Una mirada a la modelización en hidrología.

- Sepúlveda, Y. E. G. and Bastida, S. O. S. (2005). Diseño de sistemas de tratamiento y aprovechamiento de purines de origen bovino. Master's thesis, Universidad Católica de Temuco.
- Serna, M., Serna, C., and Ortega, G. (2008). Aplicaciones de lógica difusa a las cadenas de suministro Applicability of fuzzy logic to supply chains. *Revista Avances en Sistemas e Informática*, 5(3):117–130.
- Sheldrick, W., Syers, J., and Lingard, J. (2003). Soil nutrient audits for China to estimate nutrient balances and output/input relationships. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 94(3):341–354.
- Silva, O. (2004). El modelo swat en una cuenca pequeña de altas pendientes: simulación de la producción de agua. *Agronomía tropical*, 54(3):275–291.
- Singh, V. P. and Frevert, D. K. (2006). *Watershed Models*. CRC Press.
- Sivapalan, M. (2005). *Pattern process and function: elements of a unified theory of hydrology at the catchment scale*. John Wiley & Sons.
- Skaggs, T., Trout, T., Simunek, J., and Shouse, P. (2004). Comparison of Hydrus-2d simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 130:304–310.
- Sperberg, F. S. (1996). Impacto ambiental de efluentes de la actividad agropecuaria. Technical report, INIA-Remehue.
- Srinivasan, R., W., B. B., and J.G., A. (1996). *SWAT/GRASS Interface Users Manual, version 96.2*. Texas Agricultural Experiment Station, Blackland Research Center, Temple, Texas.
- Steglich, E. and Williams, J. (2008). *Agricultural Policy/Environmental eXtender Model, User's Manual*. Blackland Research and Extension Center, texas agrilife research edition.
- Szógi, A. and Vanotti, M. (2003). Utilization of nutrients from animal manure: Legislation and technology solutions. *Journal of Soils and Sediments*, 3(4):260–262.
- Torres, A. M. B. (2006). Evaluación de la aplicabilidad de tres métodos para estimar vulnerabilidad de aguas subterráneas a escala predial y regional. Master's thesis, Universidad de Concepcion.
- Universidad de Concepción (2012). Plataforma educativa de innova riego.
- USDA (2010). Integrated farm system model. <http://www.ars.usda.gov/Main/docs.htm?docid=8519>.

- Wang, X., Hoogmoed, W., Cai, D., Perdok, U., and Oenema, O. (2007). Crop residue, manure and fertilizer in dryland maize under reduced tillage in northern China: II nutrient balances and soil fertility. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 79(1):17–34.
- Westerman, P. and Bicudo, J. (2005). Management considerations for organic waste use in agriculture. *Bioresource Technology*, 96:215–221.
- Williams, J. and Izaurralde, R. (2007). *Agricultural Policy/Environmental eXtender Model*. Texas Agricultural Experiment Station.
- Zarandi, M. H., Zarandi, M. M., and Saghiri, S. (2007). Five crisp and fuzzy models for supply chain of an automotive manufacturing system. *International Journal of Management Science and Engineering Management*, 2(3):178–196.
- Zaror, C. A. Z. (2000). Introducción a la ingeniería ambiental para la industria de procesos. Universidad de Concepción-Facultad de Ingeniería, Concepción-Chile.



## 7.1. Primera Publicación

Cuadro 7.1: Valores para cada rango de pendientes según el impacto sobre el lavado de nutrientes del suelo

Grado de pendiente	Pendiente (%)	Valor
Plano	0–1	1
Suavemente Inclinado	1–3	2
Moderadamente Inclinado	3–8	3
Fuertemente Inclinado	8–15	N.apl

(Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)., 1999)

Cuadro 7.2: Valores para cada rango de uso de suelo, según el grado de protección, contra las pérdidas de nutrientes por lavado

Cultivo y plantación	Valor
Bosque	1
Praderas	2
Cereales	3
Hortalizas	4
Pradera natural	4
Barbecho	5

(Peralta, 1976; Centro de Ciencias Ambientales, (EULA), 2002)

Cuadro 7.3: Valores para cada rango de textura, según el impacto sobre el lavado de nutrientes y la lixiviación

Textura	Lavado	Lixiviación
	Valor	
Arenosa , Arenosa gruesa	1	6
Areno Franco Fina, Areno Francosa	2	5
Franco Arenosa, Franco Arenosa Fina	3	4
Franco Limosa, Franca, Franco Arenosa muy Fina	4	3
Franco Arcillosa, Franco Arcillo Limosa, Franco Arcillo Arenosa	5	2
Arcillosa, Arcillo Limosa, Arcillo Arenosa	6	1

(Elizondo and Casanova, 1994; Espinosa, 2007; Peralta, 1976)

Cuadro 7.4: Valores para cada rango de profundidad del suelo según su impacto en el lavado de nutrientes

Grado de Profundidad	Profundidad (cm)	Valor
Profundo	>100	1
Moderadamente Profundo	75–100	2
Ligeramente Profundo	50–75	3
Delgado	25–50	4
Muy Delgado	< 25	N.apl

(Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)., 1999)

Cuadro 7.5: Valores para cada rango de la altura del nivel freáticos según su impacto en la lixiviación

Grado Nivel Freático	Profundidad (m)	Valor
Superficial	0-0.5	N.apl
Alto	0,51-0,8	5
Medio	0,81-2,0	3
Profundo	2,1-6	2
Muy profundo	>6	1

Cuadro 7.6: Valores para cada rango del Método de riego, manejo y aplicación del purín según su impacto en el lavado y lixiviación de nutrientes

Método de riego	Operación	Valor
Pivote	<Vel. Inf. , Oper. Calif. , Crit. Riego	1
	Criterios De riego	2
	Operación Básica	3
Cobertura Total	<Vel. Inf. , Oper. Calif. , Crit. Riego	1
	Criterios De riego	2
	Operación Básica	3
Cañon	<Vel. Inf. , Oper. Calif. , Crit. Riego	2
	Criterios De riego	3
	Operación Básica	4
Tendido	Tecnificado	4
	Operación Básica	5

Cuadro 7.7: Valores de para cada rango de las practicas de conservación según su impacto en el lavado de nutrientes del suelo

Prácticas de conservación	Actividad	Valor
Aplicaciones purín	Sept.-Marzo	1
	Abril	2
	Mayo-Agosto	3
	Indiferente	3
Filter Strip	Si	-1
	No	1
Balances en aplicación	Si	-1
	No	1
Aplic. segun Est. fenológico	Si	-1
	No	1
Curso aguas abajo	Si	1
	No	-1

Cuadro 7.8: Valores para cada rango de la capacidad de campo efectivo del suelo hasta 1 m de profundidad según su impacto en el lavado y lixiviación de nutrientes

CCE (mm) hasta 1,0 m	Valor
>250	1
200-249	2
140-199	3
90-139	4
50-89	5
<49	6

(Monari, 2004)

Cuadro 7.9: Valores para cada rango de las clases de drenajes del suelo según su impacto en la lixiviación y lavado de nutrientes

<b>Denominación</b>	<b>Valor Lavado</b>	<b>Valor Lixiviación</b>
Excesivo	1	N.apl
Bueno	2	5
Moderado	3	4
Imperfecto	4	3
Pobre	5	2
Muy Pobre	N.apl	1

(Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)., 1999)



Cuadro 7.10: Información características de los sectores de un predio

Unidad	Nivel Freáticos	Profundidad	Pendiente	Textura	Drenaje	Cap.C.E.	Cubierta	RyP	prácticas de man.
Primer	2 metros	S. profundo	L. inclinada	Franco limosa	Moderado	272,470	Achicoria	TB-CB	Sep-Abril-no-no-no-no
Arboles	Mayor a 6 m	L. profundo	S. inclinada	Franco limosa	Bueno	213,450	Bosque	TB-CB	Sep-Abril-si-no-no-no
Vega	Mayor a 6 m	Delgado	S. inclinada	Franco arenosa fina	Muy pobre	50,445	Pradera N.	TB-CB	Sep-Abril-no-no-no-no
Chacra	Alto	L. profundo	S. inclinada	Franco limosa	Bueno	213,450	Chacra	TB-CB	Sep-Abril-no-no-no-no
Final	Mayor a 6 m	Profundo	S. inclinada	Franco arenosa muy fina	Bueno	112,770	Pradera nat.	TB-CB	Sep-Abril-no-no-no-si
3sur	Mayor a 6 m	Delgado	Casi plana	Franco limosa	Bueno	71,000	Avena	TB-CB	Sep-Abril-no-no-no-si
Sur A	Mayor a 6 m	Profundo	Plano	Miscelaneo	Muy pobre	100,000	Avena	TB-CB	Sep-Abril-no-no-no-no
13b	3 a 4 metros	Delgado	M. inclinada	Franco arcillosa	Bueno	104,100	Barbecho	TB-TB	Sep-Abril-no-no-no-no
Arboles 2	Mayor a 6 m	L. profundo	M. inclinada	Franco limosa	Bueno	213,450	Bosque	TB-CB	Sep-Abril-no-no-no-si

Cap.C.E. "Capacidad de campo efectiva", RyP "Manejo del Riego y purín", TB "Tendido basico", CB "Cañon básico", M. "Moderadamente", S. "Suavemente"

Cuadro 7.11: Ponderaciones de los sectores y sus índices de riesgo

Unidad	N.F.	Prof.	Pend.	T.-L.	T.-Lx.	D.-L.	D.-Lx.	C.C.E.	Cub.	RyP	Prac.	Tot. Lav.	Tot. Lix.	Lavado	Lixiviación	Riesgo
																A.A.P.
Primer	3	2	3	4	3	3	4	1	4	5	3	75	64	Medio	Medio	Medio
Arboles	1	3	3	4	3	2	5	2	1	5	3	60	66	Medio	Medio	Medio
Vega	1	4	3	3	4	N.apl	1	5	4	5	3	N.apl	64	Excesivo	Medio	Excesivo
Chacra	5	3	3	4	3	2	5	2	4	5	3	75	86	Medio	Alto M.	Alto M.
Final	1	1	3	4	3	2	5	4	4	5	3	83	68	Alto M.	Medio	Alto M.
3sur	1	4	2	4	3	2	5	5	3	5	3	80	81	Alto M.	Alto M.	Alto M.
Sur A	1	1	1	-	-	N.apl	1	4	4	5	3	N.apl	-	Excesivo	-	Excesivo
13b	2	2	3	5	2	2	5	2	5	5	3	83	65	Alto M.	Medio	Alto M.
Arboles 2	1	3	3	4	3	2	5	2	1	5	3	60	66	Medio	Medio	Medio

N.F. "Nivel Freáticos", Prof. "Profundidad", Pend. "pendiente", T.-L. "Textura Lavado", T.-Lx. "Textura Lixiviación", D.-L. "Drenaje-lavado", D.-Lx. "Drenaje-Lixiviación"  
 Cub. "Cubierta", Prac. "Prácticas de manejo", Tot. Lav. "Total Lavado", Tot. Lix. "Total lixiviación", M. "Moderado", A.A.P. "Asociado a la aplicación de purines"

## 7.2. segunda Publicación

### 7.2.1. Base de datos



Cuadro 7.12: Contenido Nutricional del Suelo

Día	Necesidades del cultivo			Ev. B.	Prec.	Temperatura (°c)		
	KN/ha	KP/ha	kc			Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
1	0	0	0,00140016	4,67	0,00	13,446463	10,446463	7,446463
2	0,05781013	0,12690725	0,06139067	4,54	0,00	17,958995	14,958995	11,95899
3	0,07070759	0,11384593	0,11595163	4,78	0,00	18,225707	15,225707	12,22570
4	0,08509192	0,10204613	0,16549766	4,02	3,40	17,326760	14,326760	11,32676
5	0,1009631	0,09150785	0,21042226	5,38	0,00	16,048660	13,048660	10,04866
6	0,11832114	0,0822311	0,25109845	6,72	0,00	16,852861	13,852861	10,85286
7	0,13716603	0,07421587	0,28787943	6,49	0,00	17,352706	14,352706	11,35270
8	0,15749778	0,06746216	0,32109919	6,23	0,00	16,205070	13,205070	10,20507
9	0,17931639	0,06196998	0,35107314	4,02	0,41	16,055798	13,055798	10,05579
10	0,20262185	0,05773932	0,37809874	6,88	0,00	15,308673	12,308673	9,308673
11	0,22741417	0,05477018	0,40245607	4,60	0,00	15,723816	12,723816	9,723816
12	0,25369335	0,05306256	0,42440845	7,20	0,00	17,450938	14,450938	11,45093
13	0,28145938	0,05261647	0,44420302	7,61	0,00	19,506917	16,506917	13,50691
14	0,31071227	0,05343189	0,46207132	7,45	0,00	19,258458	16,258458	13,25845
15	0,34145201	0,05550885	0,47822983	7,45	0,00	18,407480	15,407480	12,40748
16	0,37367861	0,05884732	0,49288056	7,45	0,00	20,515262	17,515262	14,51526
17	0,40739207	0,06344732	0,50621158	7,45	0,00	17,740310	14,740310	11,74031
18	0,44259239	0,06930884	0,51839755	7,45	0,00	18,353279	15,353279	12,35327
19	0,47927956	0,07643188	0,52960028	7,45	0,00	20,158692	17,158692	14,15869
20	0,51745359	0,08481645	0,53996919	7,33	0,00	21,374585	18,374585	15,37458
21	0,55711447	0,09446253	0,5496419	7,26	0,00	22,119943	19,119943	16,11994
22	0,59826221	0,10537014	0,55874465	7,13	0,00	22,009216	19,009216	16,00921
23	0,64089681	0,11753928	0,56739286	7,25	0,00	21,645253	18,645253	15,64525
24	0,68501827	0,13096993	0,57569154	8,78	0,00	20,688778	17,688778	14,68877
25	0,73062658	0,14566211	0,58373583	7,02	0,00	22,840154	19,840154	16,84015
26	0,77772174	0,16161582	0,59161142	6,26	0,00	22,705356	19,705356	16,70535
27	0,82630377	0,17883104	0,59939502	5,79	0,00	22,668392	19,668392	16,66839
28	0,87637265	0,19730779	0,60715478	5,32	0,00	17,906691	14,906691	11,90669

Sigue en la página siguiente.

Día	Necesidades del cultivo			E.B.	Prec.	Temperatura (°c)		
	KN/ha	KP/ha	kc			Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
29	0,92792838	0,21704606	0,61495077	5,68	0,00	17,314242	14,314242	11,314242
30	0,98097098	0,23804585	0,62283537	5,81	0,00	20,53550	17,535507	14,53550
31	1,03550043	0,26030717	0,63085366	6,50	0,00	21,115841	18,115841	15,11584
32	1,09151673	0,28383	0,63904391	5,25	0,00	18,501158	15,501158	12,50115
33	1,1490199	0,30861437	0,64743788	3,15	0,00	13,865629	10,865629	7,865629
34	1,20800991	0,33466025	0,65606128	6,51	0,00	19,509066	16,509066	13,50906
35	1,26848679	0,36196766	0,66493411	6,33	0,00	20,297489	17,297489	14,29748
36	1,33045052	0,39053659	0,67407102	6,15	0,00	17,827757	14,827757	11,82775
37	1,39390111	0,42036704	0,68348171	6,26	0,00	18,690157	15,690157	12,69015
38	1,45883856	0,45145901	0,69317124	3,20	2,24	19,415215	16,415215	13,41521
39	1,52526286	0,48381251	0,70314039	1,71	1,32	17,774847	14,774847	11,77484
40	1,59317402	0,51742753	0,71338599	5,62	0,00	18,731279	15,731279	12,73127
41	1,67107941	0,55230407	0,72390122	6,33	0,00	18,600988	15,600988	12,60098
42	1,79300857	0,58844214	0,73467596	7,85	0,00	21,618001	18,618001	15,61800
43	1,96746886	0,62584173	0,74569706	8,78	0,00	23,083279	20,083279	17,08327
44	2,19446029	0,66450284	0,75694862	8,21	0,00	23,116687	20,116687	17,11668
45	2,47398287	0,70442547	0,76841234	7,56	0,41	19,598987	16,598987	13,59898
46	2,80603658	0,74560963	0,78006771	2,60	3,15	16,915505	13,915505	10,91550
47	3,19062143	0,78805531	0,79189234	7,60	0,00	19,334785	16,334785	13,33478
48	3,62773743	0,83176251	0,80386217	8,50	0,00	20,243605	17,243605	14,24360
49	4,11738456	0,87673124	0,81595176	6,78	0,00	20,644081	17,644081	14,64408
50	4,65956283	0,92296149	0,82813448	7,34	0,00	21,627492	18,627492	15,62749
51	5,25427224	0,97045326	0,84038276	8,25	0,00	22,525941	19,525941	16,52594
52	5,90151279	1,01920655	0,85266832	0,50	7,38	15,255892	12,255892	9,255892
53	6,60128448	1,06922137	0,86496235	5,88	0,00	15,88257	12,882577	9,882577
54	7,35358731	1,12049771	0,87723573	9,23	0,00	19,689922	16,689922	13,68992
55	8,15842128	1,17303557	0,88945921	9,45	0,00	23,678013	20,678013	17,67801
56	9,01578639	1,22683495	0,90160357	9,55	0,00	24,875771	21,875771	18,87577
57	9,92568264	1,28189586	0,91363986	9,23	0,00	22,375535	19,375535	16,37553
58	10,88811	1,33821829	0,92553946	8,87	0,00	23,858052	20,858052	17,85805

Sigue en la página siguiente.

Día	Necesidades del cultivo			E.B.	Prec.	Temperatura (°c)		
	KN/ha	KP/ha	kc			Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
59	14,7595441	2,18422444	0,93727432	8,66	0,00	21,837305	18,837305	15,83730
60	22,3053751	4,03117141	0,94881705	8,85	0,00	22,183781	19,183781	16,18378
61	30	6,87905919	0,96014107	9,01	0,00	25,037115	22,037115	19,03711
62	25	10,7278878	0,97122074	9,88	0,00	26,252617	23,252617	20,25261
63	22	15,5776572	0,98203145	10,44	0,00	25,242510	22,242510	19,24251
64	6,8089171	0,65621987	0,99254975	10,68	0,00	25,303436	22,303436	19,30343
65	6,27958191	0,65378149	1,00275345	12,01	0,00	27,160366	24,160366	21,16036
66	5,77248066	0,65128081	1,01262165	11,54	0,00	26,124812	23,124812	20,12481
67	5,28761333	0,64871783	1,0221349	7,74	0,00	24,236859	21,236859	18,23685
68	4,82497993	0,64609256	1,0312752	12,44	0,00	25,203535	22,203535	19,20353
69	4,38458047	0,64340499	1,04002609	11,45	0,00	24,837068	21,837068	18,83706
70	3,96641493	0,64065513	1,04837267	9,82	0,00	21,266664	18,266664	15,26666
71	3,57048332	0,63784297	1,05630169	9,56	0,00	19,194238	16,194238	13,19423
72	3,19678565	0,63496851	1,06380152	10,20	0,00	21,334099	18,334099	15,33409
73	2,8453219	0,63203176	1,07086221	10,65	0,00	22,359989	19,359989	16,35998
74	2,51609208	0,62903271	1,07747547	8,65	0,00	20,798920	17,798920	14,79892
75	2,20909619	0,62597137	1,0836347	0,00	6,46	17,505484	14,505484	11,50548
76	1,92433423	0,62284773	1,08933497	7,21	0,00	17,728913	14,728913	11,72891
77	1,6618062	0,6196618	1,09457299	7,35	0,00	17,658628	14,658628	11,65862
78	1,4215121	0,61641357	1,09934711	5,44	0,52	16,831573	13,831573	10,83157
79	1,20345193	0,61310304	1,10365724	0,00	68,75	18,985993	15,985993	12,98599
80	1,00762569	0,60973022	1,10750484	3,87	0,00	20,821339	17,821339	14,82133
81	0,83403338	0,6062951	1,11089287	4,56	0,00	21,500584	18,500584	15,50058
82	0,682675	0,60279769	1,1138257	4,88	0,00	19,882907	16,882907	13,88290
83	0,55355055	0,59923798	1,11630903	7,64	0,00	21,588975	18,588975	15,58897
84	0,44666002	0,59561598	1,11834983	7,87	0,00	20,655206	17,655206	14,65520
85	0,36200343	0,59193168	1,11995624	7,54	0,00	20,888258	17,888258	14,88825
86	0,29727171	0,58818508	1,12113746	7,32	0,00	20,292532	17,292532	14,29253
87	0,24322865	0,58437619	1,12190365	6,87	0,00	20,509513	17,509513	14,50951
88	0,1975652	0,580505	1,1222658	7,58	0,00	21,442086	18,442086	15,44208

Sigue en la página siguiente.

Día	Necesidades del cultivo			E.B.	Prec.	Temperatura (°c)		
	KN/ha	KP/ha	kc			Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
89	0,16028134	0,57657152	1,12223557	5,89	0,00	18,439656	15,439656	12,43965
90	0,13137709	0,57257574	1,12182522	0,00	4,86	20,868760	17,868760	14,86876
91	0,11085244	0,56851767	1,1210474	4,21	0,00	18,677272	15,677272	12,67727
92	0,09870739	0,5643973	1,119915	5,64	0,00	20,162405	17,162405	14,16240
93	0,09494195	0,56021463	1,118441	5,78	0,00	21,478554	18,478554	15,47855
94	0,09955611	0,55596967	1,1166383	4,52	0,00	18,308436	15,308436	12,30843
95	0,11254987	0,55166241	1,11451948	5,37	0,00	19,209191	16,209191	13,20919
96	0,13392324	0,54729286	1,11209667	6,87	0,00	20,876235	17,876235	14,87623
97	0,1636762	0,54286101	1,10938129	4,03	0,00	14,572511	11,572511	8,572511
98	0,20180877	0,53836686	1,10638387	4,22	0,00	18,603302	15,603302	12,60330
99	0,24832095	0,53381042	1,1031138	3,00	0,00	22,919154	19,919154	16,91915
100	0,30321272	0,52919169	1,09957911	3,00	0,00	22,877783	19,877783	16,87778
101	0,3664841	0,52451065	1,09578622	4,41	0,00	21,022610	18,022610	15,02261
102	0,43813508	0,51976733	1,0917397	1,81	0,00	20,803241	17,803241	14,80324
103	0,51816567	0,5149617	1,08744198	3,10	0,00	21,849204	18,849204	15,84920
104	0,60657586	0,51009378	1,08289311	4,21	0,00	19,548746	16,548746	13,54874
105	0,70336565	0,50516357	1,07809043	5,68	0,00	21,250889	18,250889	15,25088
106	0,80466737	0,50017106	1,07302835	3,80	0,00	25,125978	22,125978	19,12597
107	0,89501034	0,49511625	1,06769798	4,90	0,00	19,637853	16,637853	13,63785
108	0,97052689	0,48999915	1,06208687	5,23	0,00	18,266140	15,266140	12,26614
109	1,03121701	0,48481975	1,05617865	4,52	0,00	22,319690	19,319690	16,31969
110	1,07708071	0,47957806	1,04995274	4,16	0,00	22,259726	19,259726	16,25972
111	1,10811799	0,47427407	1,04338398	5,48	0,00	21,88252	18,88252	15,8825
112	1,12432885	0,46890778	1,03644231	3,90	0,00	16,653704	13,653704	10,65370
113	1,12571328	0,4634792	1,02909239	4,32	0,00	20,858647	17,858647	14,85864
114	1,11227129	0,45798832	1,02129323	4,56	0,00	19,862666	16,862666	13,86266
115	1,08400288	0,45243515	1,01299784	4,41	0,00	19,404238	16,404238	13,40423
116	1,04090804	0,44681968	1,00415284	1,81	0,00	16,913759	13,913759	10,91375
117	0,98298678	0,44114192	0,99469802	3,90	0,00	18,167506	15,167506	12,16750
118	0,9102391	0,43540186	0,98456602	4,32	0,00	17,596736	14,596736	11,59673

Sigue en la página siguiente.

Día	Necesidades del cultivo			kc	E.B.	Prec.	Temperatura (°c)		
	KN/ha	KP/ha	kc				Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3
119	0,822665	0,4295995	0,97368184	4,56	0,00	19,498591	16,498591	13,49859	
120	0,72026447	0,42373485	0,96196243	4,41	0,00	17,688736	14,688736	11,68873	
121	0,60800524	0,4178079	0,94931631	1,81	2,81	18,492280	15,492280	12,49228	
122	0,5057582	0,41181866	0,93564307	3,10	0,41	16,577799	13,577799	10,57779	
123	0,41849108	0,40576712	0,92083293	4,21	0,00	17,032327	14,032327	11,03232	
124	0,34620387	0,39965329	0,90476631	5,68	0,00	22,262805	19,262805	16,26280	
125	0,28889657	0,39347716	0,88731334	3,80	0,00	21,715404	18,715404	15,71540	
126	0,24656918	0,38723873	0,86833334	4,90	0,00	17,882423	14,882423	11,88242	
127	0,21922171	0,38093801	0,84767442	5,23	0,00	21,948960	18,948960	15,94896	
128	0,20685415	0,37457499	0,82517291	4,52	0,00	20,772128	17,772128	14,77212	
129	0,2094665	0,36814968	0,80065286	4,16	0,00	21,332292	18,332292	15,33229	
130	0,22705876	0,36166207	0,77392557	5,48	0,00	23,586593	20,586593	17,58659	
131	0,25963094	0,35511217	0,744789	3,76	0,86	16,641618	13,641618	10,64161	
132	0,30718303	0,34849997	0,71302728	3,24	0,00	15,021169	12,021169	9,021169	
133	0,36971503	0,34182547	0,67841015	3,86	0,00	16,160475	13,160475	10,16047	
134	0,44722695	0,33508868	0,64069239	4,33	0,00	18,146719	15,146719	12,14671	
135	0,53971878	0,32828959	0,59961328	5,45	0,00	17,433785	14,433785	11,43378	

## 7.2.2. Código Fuentes

```
clc
clear all

%% CARGAR ARCHIVO
[fName, pathname] = uigetfile('*.xlsx', 'Seleccione Archivo');
goodWay = fullfile(pathname,fName);
Informacion=xlsread(goodWay);
%matlabDates=Informacion;
clear goodWay fName matlabDates pathname

% PARÁMETROS DE ENTRADA %
% purín

NO3P=21.8    %mg/l
NH4P=10     %mg/l
COrgNP=1000 %mg/l
PsolP=30    %mg/l
OrgPP=40    %mg/l
dpurin=90   % densidad del purín en porcentaje
fert=10     %kgN/Has
camion=50   %m3

NO31(1)=35;    % Concentración de Nitratos kg/ha primera capa
NO32(1)=30;    % Concentración de Nitratos kg/ha segunda capa
NO33(1)=20;    % Concentración de Nitratos kg/ha tercera capa

COrgN1(1)=50;  % Concentración de Nitrógeno Orgánico kg/has primera capa
COrgN2(1)=50;  % Concentración de Nitrógeno Orgánico kg/has segunda capa
COrgN3(1)=50;  % Concentración de Nitrógeno Orgánico kg/has tercera capa

OrgC1(1)=9.2;  % Porcentaje de carbono Orgánico presente PRIMERA CAPA %
OrgC2(1)=6.7;  % Porcentaje de carbono Orgánico presente SEGUNDA CAPA %
OrgC3(1)=4.8;  % Porcentaje de carbono Orgánico presente TERCERA CAPA %

NH41(1)=20;    % Concentración de Amonio kg/ha primera capa
NH42(1)=20;    % Concentración de Amonio kg/ha segunda capa
NH43(1)=20;    % Concentración de Amonio kg/ha tercera capa

CN1=31;        % Relación Carbono Orgánico y Nitrógeno Orgánico primera capa
CN2=31;        % Relación Carbono Orgánico y Nitrógeno Orgánico segunda capa
CN3=31;        % Relación Carbono Orgánico y Nitrógeno Orgánico tercera capa
```



fra=0.02; % Fracción del Nitrógeno Orgánico activo  
 Btrans=0.00001; % Constante de Transferencia  
 Bmin=0.0003; % Coeficiente de Mineralización del Humus activo  
  
 Psol1(1)=20; % Concentración de fósforo soluble kg/ha primera capa  
 Psol2(1)=20; % Concentración de fósforo soluble kg/ha segunda capa  
 Psol3(1)=20; % Concentración de fósforo soluble kg/ha tercera capa  
  
 OrgP1(1)=22; % concentración de fósforo orgánico kg/ha primera capa  
 OrgP2(1)=20; % concentración de fósforo orgánico kg/ha segunda capa  
 OrgP3(1)=18; % concentración de fósforo orgánico kg/ha tercera capa  
  
 pai=0.4; % Índice de disponibilidad de fósforo  
 Beq=0.0006; % es la constante de equilibrio lento  
  
 PROF1=170; % profundidad del suelo primera capa (mm)  
 PROF2=400; % profundidad del suelo segunda capa (mm)  
 PROF3=600; % profundidad del suelo tercera capa (mm)  
  
 Ci1(1)=49; % Contenido inicial primera capa gr/gr o %  
 Ci2(1)=50; % Contenido inicial segunda capa gr/gr o %  
 Ci3(1)=50; % Contenido inicial tercera capa gr/gr o %  
  
 CC1=64.7; % Capacidad de campo primera capa gr/gr o %  
 CC2=65.4; % Capacidad de campo segunda capa gr/gr o %  
 CC3=64.2; % Capacidad de campo tercera capa gr/gr o %  
  
 PMP1=33.7; % Punto de marchitez permanente primera capa gr/gr o %  
 PMP2=36.3; % Punto de marchitez permanente segunda capa gr/gr o %  
 PMP3=36.5; % Punto de marchitez permanente tercera capa gr/gr o %  
  
 DA1=0.8; % Densidad aparente primera capa gr/cm3  
 DA2=0.9; % Densidad aparente segunda capa gr/cm3  
 DA3=0.9; % Densidad aparente tercera capa gr/cm3  
 ef=75  
 tiempo=24; % escala temporal del modelo (Tiempo PREC. o Riego)  
 area=14.5; % numero de ha  
 MO=15.8; % porcentaje de materia orgánica primera capa  
 SAN=40; % Porcentaje de arena en el suelo primera capa  
 SIL=35; % porcentaje de limo en el suelo primera capa  
 CLA=25; % Porcentaje de arcilla en el suelo primera capa  
 FGC=0.7; % Factor de manejo de cosecha y o cobertura  
 PEND=0.03; % pendiente de la parcela m/m  
 SPLG=1000; % longitud punto mas alto al mas bajo

```

PE=1;          % Factor de practicas de control de la erosión
               % PE=1 si no se realizan practicas
ROK=0.2;      % Porcentaje de fragmento grueso

CN=78;        % Curva Numero 1-100
KB=0.85;     % k de bandeja
KC=Informacion(:,4); % K de cultivo
EB=Informacion(:,5); % Evaporación de bandeja
PP=Informacion(:,6); % Precipitación diaria (mm)
Cr=0.5;      % Criterio de riego
Temp1=Informacion(:,7); % Temperatura del Suelo °C
Temp2=Informacion(:,8); % Temperatura del Suelo °C
Temp3=Informacion(:,9); % Temperatura del Suelo °C

%% máxima capacidad del suelo (mm)

HA1=(CC1-PMP1)/100*DA1*PROF1
HA2=(CC2-PMP2)/100*DA2*(PROF2-PROF1)
HA3=(CC3-PMP3)/100*DA3*(PROF3-PROF2)

HMAX=HA1+HA2+HA3
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

NO3P=NO3P/1000000 %KG/l
NH4P=NH4P/1000000 %KG/l
COrgNP=COrgNP/1000000 %KG/l
PsolP=PsolP/1000000 %KG/l
OrgPP=OrgPP/1000000 %kG/l

for i=1:135

% lamina de agua en el suelo (mm)

HAI1(i)=(Ci1(i)-PMP1)/100*DA1*PROF1
HAI2(i)=(Ci2(i)-PMP2)/100*DA2*(PROF2-PROF1)
HAI3(i)=(Ci3(i)-PMP3)/100*DA3*(PROF3-PROF2)
HIA=HAI1(i)+HAI2(i)+HAI3(i)

AP=(HMAX*Cr)*10000 % litros de agua para llevar el suelo a CC (l/ha)
APO=(HMAX-HIA)*10000

%% Aplicación de purín

if (((NO31(i)+NO32(i)+NO33(i))/3)<=fert && HMAX*Cr>=HIA)

```



```
NO3PA(i)=NO3P*AP      %KG/HA
NH4PA(i)=NH4P*AP      %KG/HA
COrgNPA(i)=COrgNP*AP  %KG/HA
PsolPA(i)=PsolP*AP    %KG/HA
OrgPPA(i)=OrgPP*AP    %KG/HA
```

```
Ci1(i)=CC1
Ci2(i)=CC2
Ci3(i)=CC3
```

```
purin(i)=AP
```

```
elseif (((NO31(i)+NO32(i)+NO33(i))/3)<=fert && HMAX*Cr<HIA) && APO>camion*1000
```

```
NO3PA(i)=NO3P*APO      %KG/HA
NH4PA(i)=NH4P*APO      %KG/HA
COrgNPA(i)=COrgNP*APO  %KG/HA
PsolPA(i)=PsolP*APO    %KG/HA
OrgPPA(i)=OrgPP*APO    %KG/HA
```

```
Ci1(i)=(HAI1(i)+APO/10000*0.33)/(DA1*PROF1)*100+PMP1
Ci2(i)=(HAI2(i)+APO/10000*0.33)/(DA2*(PROF2-PROF1))*100+PMP2
Ci3(i)=(HAI3(i)+APO/10000*0.33)/(DA3*(PROF3-PROF2))*100+PMP3
```

```
purin(i)=APO
```

```
else
```

```
NO3PA(i)=0      %KG/HA
NH4PA(i)=0      %KG/HA
COrgNPA(i)=0    %KG/HA
PsolPA(i)=0     %KG/HA
OrgPPA(i)=0     %KG/HA
```

```
purin(i)=0
```

```
Ci1(i)=Ci1(i)
Ci2(i)=Ci2(i)
Ci3(i)=Ci3(i)
end
```

```
NO31(i)=NO3PA(i)*0.3+NO31(i)  %KG/HA
NO32(i)=NO3PA(i)*0.3+NO32(i)  %KG/HA
NO33(i)=NO3PA(i)*0.3+NO33(i)  %KG/HA
```

```
NH41(i)=NH4PA(i)*0.4+NH41(i)      %KG/HA
NH42(i)=NH4PA(i)*0.3+NH42(i)      %KG/HA
NH43(i)=NH4PA(i)*0.3+NH43(i)      %KG/HA
```

```
COrgN1(i)=COrgNPA(i)*0.4+COrgN1(i)  %KG/HA
COrgN2(i)=COrgNPA(i)*0.3+COrgN2(i)  %KG/HA
COrgN3(i)=COrgNPA(i)*0.2+COrgN3(i)  %KG/HA
```

```
Psol1(i)=PsolPA(i)*0.3+Psol1(i)     %KG/HA
Psol2(i)=PsolPA(i)*0.3+Psol2(i)     %KG/HA
Psol3(i)=PsolPA(i)*0.3+Psol3(i)     %KG/HA
```

```
OrgP1(i)=OrgPPA(i)*0.4+OrgP1(i)     %KG/HA
OrgP2(i)=OrgPPA(i)*0.3+OrgP2(i)     %KG/HA
OrgP3(i)=OrgPPA(i)*0.2+OrgP3(i)     %KG/HA
```

```
HAI1(i)=(Ci1(i)-PMP1)/100*DA1*PROF1
HAI2(i)=(Ci2(i)-PMP2)/100*DA2*(PROF2-PROF1)
HAI3(i)=(Ci3(i)-PMP3)/100*DA3*(PROF3-PROF2)
```

```
HIA=HAI1(i)+HAI2(i)+HAI3(i)
```

```
if HMAX*Cr<HIA
```

```
    riego(i)=0
```

```
else
```

```
    riego(i)=(HMAX-HIA)*(2-ef/100)
```

```
    Ci1(i)=CC1
```

```
    Ci2(i)=CC2
```

```
    Ci3(i)=CC3
```

```
end
```

```
%% Fraccionamiento
```

```
COrgNact1=COrgN1(i)*fra % Nitrogeno Organico Activo
```

```
COrgNest1=COrgN1(i)*(1-fra) % Nitrogeno Organico Activo
```

```
% segunda capa
```

```
COrgNact2=COrgN2(i)*fra % Nitrogeno Organico Activo
```

```
COrgNest2=COrgN2(i)*(1-fra) % Nitrogeno Organico Activo
```

```
% tercera capa
```

```
COrgNact3=COrgN3(i)*fra % Nitrogeno Organico Activo
```

```
COrgNest3=COrgN3(i)*(1-fra) % Nitrogeno Organico Activo
```

```
%% Descomposición: rotura de los residuos orgánicos en componentes mas sencillo
```



```
% Mineralización: es la conversión microbiana de nitrógeno Orgánico a
% nitrógeno Inorgánico
% Inmovilización: es la conversión Microbiana del nitrógeno Inorgánico
% a Orgánico
```

```
%% Relación Mineralización/Inmovilización
% Relación C:N > 30:1 ocurre Inmovilización (Disminuye NH4 y NO3)
% Relación 20:1 <= C:N <= 30:1 Se encuentra en equilibrio
% Relación C:N < 20:1 Ocurre Mineralización (Ganancia de NH4 y NO3)
```

```
%% Efecto de la temperatura y el contenido de agua en el suelo %%
% Mineralización y inmovilización, Ocurren solo si la temperatura del suelo
% es mayor a 0°C
% El nitrógeno se mueve entre activo y estable
```

```
FT1(i)=0.9*(Temp1(i)/(Temp1(i)+exp(9.93-0.312*Temp1(i))))+0.1
% Factor de Temperatura Ciclo, nunca debe ser bajo 0.1 primera capa
FT2(i)=0.9*(Temp2(i)/(Temp2(i)+exp(9.93-0.312*Temp2(i))))+0.1
% Factor de Temperatura Ciclo, nunca debe ser bajo 0.1 segunda capa
FT3(i)=0.9*(Temp3(i)/(Temp3(i)+exp(9.93-0.312*Temp3(i))))+0.1
% Factor de Temperatura Ciclo, nunca debe ser bajo 0.1 tercera capa
```

```
FW1(i)=Ci1(i)/CC1 % Factor de Humedad Ciclo, Nunca debe ser bajo 0.05 primera capa
FW2(i)=Ci2(i)/CC2 % Factor de Humedad Ciclo, Nunca debe ser bajo 0.05 segunda capa
FW3(i)=Ci3(i)/CC3 % Factor de Humedad Ciclo, Nunca debe ser bajo 0.05 tercera capa
```

```
%% Mineralización y inmovilización (1° capa)
```

```
if CN1 < 20 & Temp1(i) > 0
```

```
    % Cantidad de nitrógeno transferido kg/ha
    Ntrans1=COrgNact1*Btrans*(1/fra-1)-COrgNest1
    Ntrans1=abs(Ntrans1)
    if Ntrans1 < 0
        COrgNact1=COrgNact1+Ntrans1
        COrgNest1=COrgNest1-Ntrans1
    else
        COrgNact1=COrgNact1-Ntrans1
        COrgNest1=COrgNest1+Ntrans1
    end
```

```
    % Mineralización del Nitrógeno Humico Activo %%
    Nmin1=Bmin*sqrt(FT1(i)*FW1(i))*COrgNact1
    Nmin1=abs(Nmin1)
    NO31(i+1)=NO31(i)+Nmin1
```

```
COrgN1(i+1)=COrgN1(i)-Nmin1
COrgN1(COrgN1<0)=0;
```

```
elseif CN1 > 30 & Temp1(i) > 0
```

```
% Cantidad de nitrógeno transferido kg/ha
Ntrans1=COrgNact1*Btrans*(1/fra-1)-COrgNest1
Ntrans1=abs(Ntrans1)
if Ntrans1 < 0
COrgNact1=COrgNact1+Ntrans1
COrgNest1=COrgNest1-Ntrans1
else
COrgNact1=COrgNact1-Ntrans1
COrgNest1=COrgNest1+Ntrans1
end
```

```
% inmovilización del Nitrógeno mineral
Nmin1=Bmin*sqrt(FT1(i)*FW1(i))*COrgNact1
Nmin1=abs(Nmin1)
NO31(i+1)=NO31(i)-Nmin1
NO31(NO31<0)=0;
```

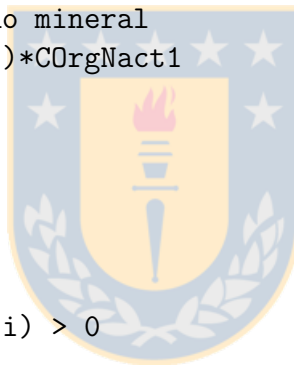
```
COrgN1(i+1)=COrgN1(i)+Nmin1
```

```
elseif 20<=CN1<=30 & Temp1(i) > 0
NO31(i+1)=NO31(i)
COrgN1(i+1)=COrgN1(i)
end
```

```
%% Mineralización y inmovilización (2° capa)
```

```
if CN2 < 20 & Temp2(i) > 0
```

```
% Cantidad de nitrógeno transferido kg/ha
Ntrans2=COrgNact2*Btrans*(1/fra-1)-COrgNest2
Ntrans2=abs(Ntrans2)
if Ntrans2 < 0
COrgNact2=COrgNact2+Ntrans2
COrgNest2=COrgNest2-Ntrans2
else
COrgNact2=COrgNact2-Ntrans2
COrgNest2=COrgNest2+Ntrans2
end
```



```

% Mineralización del Nitrógeno Humico Activo %%
Nmin2=Bmin*sqrt(FT2(i)*FW2(i))*COrgNact2
Nmin2=abs(Nmin2)
NO32(i+1)=NO32(i)+Nmin2
COrgN2(i+1)=COrgN2(i)-Nmin2
COrgN2(COrgN2<0)=0;

elseif CN2 > 30 & Temp2(i) > 0

% Cantidad de nitrógeno transferida kg/ha
  Ntrans2=COrgNact2*Btrans*(1/fra-1)-COrgNest2
  Ntrans2=abs(Ntrans2)
  if Ntrans2 < 0
    COrgNact2=COrgNact2+Ntrans2
    COrgNest2=COrgNest2-Ntrans2
  else
    COrgNact2=COrgNact2-Ntrans2
    COrgNest2=COrgNest2+Ntrans2
  end

% inmovilización del Nitrógeno mineral
Nmin2=Bmin*sqrt(FT2(i)*FW2(i))*COrgNact2
Nmin2=abs(Nmin2)
NO32(i+1)=NO32(i)-Nmin2
NO32(NO32<0)=0;
COrgN2(i+1)=COrgN2(i)+Nmin2

elseif 20<=CN2<=30 & Temp2(i) > 0

NO32(i+1)=NO32(i)
COrgN2(i+1)=COrgN2(i)

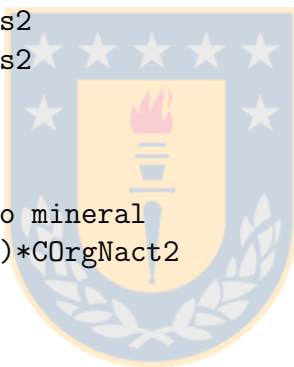
end

%% Mineralización y inmovilización (3° capa)

if CN3 < 20 & Temp3(i) > 0

% Cantidad de nitrógeno transferido kg/ha
  Ntrans3=COrgNact3*Btrans*(1/fra-1)-COrgNest3
  Ntrans3=abs(Ntrans3)
  if Ntrans3 < 0
    COrgNact3=COrgNact3+Ntrans3

```



```

COrgNest3=COrgNest3-Ntrans3
else
COrgNact3=COrgNact3-Ntrans3
COrgNest3=COrgNest3+Ntrans3
end

% Mineralización del Nitrogeno Humico Activo %%
Nmin3=Bmin*sqrt(FT3(i)*FW3(i))*COrgNact3
Nmin3=abs(Nmin3)
NO33(i+1)=NO33(i)+Nmin3
COrgN3(i+1)=COrgN3(i)-Nmin3
COrgN3(COrgN3<0)=0;

elseif CN3 > 30 & Temp3(i) > 0

% Cantidad de nitrógeno transferido kg/ha
Ntrans3=COrgNact3*Btrans*(1/fra-1)-COrgNest3
Ntrans3=abs(Ntrans3)
if Ntrans3 < 0
COrgNact3=COrgNact3+Ntrans3
COrgNest3=COrgNest3-Ntrans3
else
COrgNact3=COrgNact3-Ntrans3
COrgNest3=COrgNest3+Ntrans3
end

% inmovilización del Nitrógeno mineral
Nmin3=Bmin*sqrt(FT3(i)*FW3(i))*COrgNact3
Nmin3=abs(Nmin3)
NO33(i+1)=NO33(i)-Nmin3
NO33(NO33<0)=0;

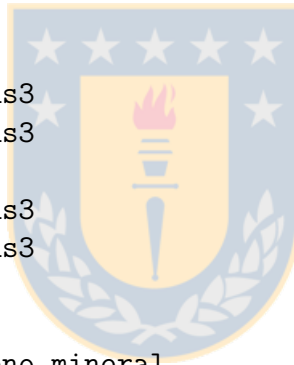
COrgN3(i+1)=COrgN3(i)+Nmin3
elseif 20<=CN3<=30 & Temp3(i) > 0

NO33(i+1)=NO33(i)
COrgN3(i+1)=COrgN3(i)

end

%% Nitrificación y Volatización %%
% La Nitrificación esta en función del contenido de agua en el
% suelo y la temperatura
% La Volatización esta en función de la temperatura del suelo y

```



```

% su profundidad
% La nitrificación y volatización ocurren siempre i cuando las
% temperaturas del suelo sean superior a 5°C

%% Volatización (1° capa)

if Temp1(i) > 5
Ftemp1=0.41*(Temp1(i)-5)/10 % Factor de temperatura nitrificación/volatización

if Ci1(i)-PMP1<0.25*(CC1-PMP1)
    FWat1=(Ci1(i)-PMP1)/(0.25*(CC1-Ci1(i))) % Factor del contenido de agua en el suelo pa
else
    FWat1=1
end

PROFM1=PROF1/2
FVol1= 1-(PROFM1/(PROFM1+exp(4.706-0.305*PROFM1))) % Factor de Volatización

%% Regulador de la Nitrificación %%
Rnit1=Ftemp1*FWat1
%% Regulador de la Volatización %%
Rvol1=Ftemp1*FVol1

%% LA CANTIDAD DE AMONIO NH4 PERDIDO POR VOLATIZACIÓN/NITRIFICACIÓN %%

Nvolnit1=NH41(i)*(1-exp(-Rnit1-Rvol1))
%% Particion entre Volatización y Nitrificación %%

FracNit1=1-exp(-Rnit1) % Fracción de amonio removido por Nitrificación
FracVol1=1-exp(-Rvol1) % Fracción de amonio removido por Volatización

%% Cantidad de Amonio Removido por Nitrificación a NO3 %%

Nnit1=(FracNit1/(FracNit1+FracVol1))*Nvolnit1
Nnit1=abs(Nnit1)
NO31(i+1)= NO31(i)+Nnit1
NH41(i+1)=NH41(i)-Nnit1
NH41(NH41<0)=0;

%% Cantidad de Amonio Removido por Volatización a NH3 (AMONIACO)%

Nvol1=(FracVol1/(FracNit1+FracVol1))*Nvolnit1
Nvol1=abs(Nvol1)
NH31(i)=Nvol1

```

```

NH41(i+1)=NH41(i+1)-Nvol1
NH41(NH41<0)=0;
end

%% Volatización (2° capa)

if Temp2(i,1) > 5

Ftemp2=0.41*(Temp2(i)-5)/10 % Factor de temperatura nitrificación/volatización

if Ci2(i)-PMP2<0.25*(CC2-PMP2)
    FWat2=(Ci2(i)-PMP2)/(0.25*(CC2-Ci2(i))) % Factor del contenido de agua en el suelo pa
else
    FWat2=1
end

PROFM2=(PROF2-PROF1)/2
FVol2= 1-(PROFM2/(PROFM2+exp(4.706-0.305*PROFM2))) % Factor de Volatización

%% Regulador de la Nitrificación %%
Rnit2=Ftemp2*FWat2

%% Regulador de la Volatización %%
Rvol2=Ftemp2*FVol2

%% LA CANTIDAD DE AMONIO NH4 PERDIDO POR VOLATIZACIÓN/NITRIFICACIÓN %%

Nvolnit2=NH42(i)*(1-exp(-Rnit2-Rvol2))

%% Partición entre Volatización y Nitrificación %%

FracNit2=1-exp(-Rnit2) % Fracción de amonio removido por Nitrificación
FracVol2=1-exp(-Rvol2) % Fracción de amonio removido por Volatización

%% Cantidad de Amonio Removido por Nitrificación a NO3 %%

Nnit2=(FracNit2/(FracNit2+FracVol2))*Nvolnit2
Nnit2=abs(Nnit2)
NO32(i+1)=NO32(i+1)+Nnit2
NH42(i+1)=NH42(i)-Nnit2
NH42(NH42<0)=0;
%% Cantidad de Amonio Removido por Volatización a NH3 %%

Nvol2=(FracVol2/(FracNit2+FracVol2))*Nvolnit2
Nvol2=abs(Nvol2)

```

```

NH32(i)=Nvol2
NH42(i+1)=NH42(i+1)-Nvol2
NH42(NH42<0)=0;
end

%% Volatización (3° capa)

if Temp3(i) > 5

Ftemp3=0.41*(Temp3(i)-5)/10 % Factor de temperatura nitrificación/volatización

if Ci3(i)-PMP3<0.25*(CC3-PMP3)
    FWat3=(Ci3(i)-PMP3)/(0.25*(CC3-Ci3(i))) % Factor del contenido de agua en el suelo pa
else
    FWat3=1
end

PROFM3=(PROF3-PROF2)/2
FVol3= 1-(PROFM3/(PROFM3+exp(4.706-0.305*PROFM3))) % Factor de Volatización

%% Regulador de la Nitrificación %%

Rnit3=Ftemp3*FWat3

%% Regulador de la Volatización %%

Rvol3=Ftemp3*FVol3

%% LA CANTIDAD DE AMONIO NH4 PERDIDO POR VOLATIZACIÓN/NITRIFICACIÓN %%

Nvolnit3=NH43(i)*(1-exp(-Rnit3-Rvol3))

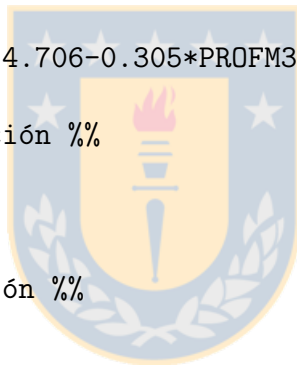
%% Partición entre Volatización y Nitrificación %%

FracNit3=1-exp(-Rnit3) % Fraccion de amonio removido por Nitrificación
FracVol3=1-exp(-Rvol3) % Fraccion de amonio removido por Volatización

%% Cantidad de Amonio Removido por Nitrificación a NO3 %%

Nnit3=(FracNit3/(FracNit3+FracVol3))*Nvolnit3
Nnit3=abs(Nnit3)
NO33(i+1)=NO33(i+1)+Nnit3
NH43(i+1)=NH43(i)-Nnit3
NH43(NH43<0)=0;

```



```
%% Cantidad de Amonio Removido por Volatización a NH3 %%
```

```
Nvol3=(FracVol3/(FracNit3+FracVol3))*Nvolnit3  
Nvol3=abs(Nvol3)  
NH33(i+1)=Nvol3  
NH43(i+1)=NH43(i+1)-Nvol3  
NH43(NH43<0)=0;  
end
```

```
%% Desnitrificación %%
```

```
% Las bacterias reducen bajo anaerobica condicon el Nitrato a N2 (Nitrogeno Gaseoso) y  
% La desnitrificación es funcion del contenido de agua, temperatura, fuente  
% de carbono la cantidad de agua en el suelo
```

```
%% DESNITRIFICACIÓN (1° CAPA)
```

```
if FW1(i) >=0.95  
    Ndesn1=NO31(i)*(1-exp(-1.4*FT1(i)*OrgC1/100)) %%%%%%%%%%%  
else  
    Ndesn1=0  
end
```

```
Ndesn1=abs(Ndesn1)  
NO31(i+1)=NO31(i+1)-Ndesn1  
NO31(NO31<0)=0;
```

```
%% DESNITRIFICACIÓN (2° CAPA)
```

```
if FW2(i) >=0.95  
    Ndesn2=NO32(i)*(1-exp(-1.4*FT2(i)*OrgC2/100))  
else  
    Ndesn2=0  
end
```

```
Ndesn2=abs(Ndesn2)  
NO32(i+1)=NO32(i+1)-Ndesn2  
NO32(NO32<0)=0;
```

```
%% DESNITRIFICACIÓN (3° CAPA)
```

```
if FW3(i) >=0.95  
    Ndesn3=NO33(i)*(1-exp(-1.4*FT3(i)*OrgC3/100))  
else  
    Ndesn3=0  
end
```

```
Ndesn3=abs(Ndesn3)
```



```
N033(i+1)=N033(i+1)-Ndesn3
N033(N033<0)=0;
```

```
%% Modulo del Fósforo %%
```

```
%% El Fósforo Mineral es particionado entre activo y estable
```

```
% concentración de fósforo activo en la fuente mineral
```

```
MinPact1= Psol1(i)*(1-pai)/pai % kg/ha
```

```
MinPact2= Psol2(i)*(1-pai)/pai % kg/ha
```

```
MinPact3= Psol3(i)*(1-pai)/pai % kg/ha
```

```
% Concentración de fósforo estable en la fuente mineral
```

```
MinPest1=4*MinPact1 % kg/ha
```

```
MinPest2=4*MinPact2 % kg/ha
```

```
MinPest3=4*MinPact3 % kg/ha
```

```
%% Mineralización y descomposición/inmovilización %%
```

```
% La descomposición es la disgregación de residuos orgánicos frescos en componentes orgá
```

```
% La mineralización es la conversión microbiana del fósforo orgánico disponible en el pl
```

```
% La mineralización y la descomposición se dan solo si la temperatura de la capa del sue
```

```
%% Humus Mineralización %%
```

```
% El Fósforo Orgánico es particionado entre activo y estable
```

```
% La cantidad de fósforo activo es calculado %%
```

```
COrgPact1=OrgP1(i)*(COrgNact1/(COrgNact1+COrgNest1))
```

```
COrgPact2=OrgP2(i)*(COrgNact2/(COrgNact2+COrgNest2))
```

```
COrgPact3=OrgP3(i)*(COrgNact3/(COrgNact3+COrgNest3))
```

```
% La cantidad de fósforo estable es calculado %%
```

```
COrgPest1=OrgP1(i)*(COrgNest1/(COrgNact1+COrgNest1))
```

```
COrgPest2=OrgP2(i)*(COrgNest2/(COrgNact2+COrgNest2))
```

```
COrgPest3=OrgP3(i)*(COrgNest3/(COrgNact3+COrgNest3))
```

```
%% Mineralización del fósforo activo orgánico %%
```

```
Pmin1=1.4*Bmin*sqrt(FT1(i)*FW1(i))*COrgPact1
```

```
Pmin2=1.4*Bmin*sqrt(FT2(i)*FW2(i))*C0rgPact2
Pmin3=1.4*Bmin*sqrt(FT3(i)*FW3(i))*C0rgPact3
```

```
%% Se suma lo mineralizado a la fuente de fósforo soluble en el suelo
```

```
Pmin1=abs(Pmin1)
Pmin2=abs(Pmin2)
Pmin3=abs(Pmin3)
```

```
Psol1(i+1)=Psol1(i)+Pmin1
Psol2(i+1)=Psol2(i)+Pmin2
Psol3(i+1)=Psol3(i)+Pmin3
```

```
C0rgPact1=C0rgPact1-Pmin1
C0rgPact2=C0rgPact2-Pmin2
C0rgPact3=C0rgPact3-Pmin3
```

```
OrgP1(i+1)=C0rgPest1+C0rgPact1
OrgP2(i+1)=C0rgPest2+C0rgPact2
OrgP3(i+1)=C0rgPest3+C0rgPact3
```

```
%% Sorción de el inorgánico Fósforo %%
```

```
% Mucho estudios han demostrado que después de una aplicación de fertilizante de p solu
% reacción con el suelo. Esta reacción rápida inicial es seguida por un descenso mas len
% Fox, 1976; Rajan y Fox, 1972; Sharpley, 1982)
% El movimiento del fósforo entre el pool de solución mineral activo y estable es regula
```

```
%% Fósforo en solución Activo (1° Capa)
```

```
% CPact se la cantidad de fósforo transferido entre la solución y la fuente de fósforo
```

```
if Psol1(i) > MinPact1*(pai/(1-pai))
    CPact1=Psol1(i)-MinPact1*(pai/(1-pai))
else
    CPact1=0.1*(Psol1(i)-MinPact1*(pai/(1-pai)))
end
```

```
if CPact1 > 0
    Psol1(i+1)=Psol1(i+1)-CPact1
    Psol1(Psol1<0)=0;
```

```
else
    Psol1(i+1)=Psol1(i+1)+CPact1
end
```

```

%% Fósforo en solución Activo (2° Capa)
% CPact se la cantidad de fósforo transferido entre la solución y la fuente de fósforo

if Psol2(i) > MinPact2*(pai/(1-pai))
    CPact2=Psol2(i)-MinPact2*(pai/(1-pai))
else
    CPact2=0.1*(Psol2(i)-MinPact2*(pai/(1-pai)))
end

    if CPact2 > 0
        Psol2(i+1)=Psol2(i)-CPact2
        Psol2(Psol2<0)=0;
    else
        Psol2(i+1)=Psol2(i)+CPact2
    end

%% Fósforo en solución Activo (3° Capa)
% CPact se la cantidad de fósforo transferido entre la solución y la fuente de fósforo

if Psol3(i) > MinPact3*(pai/(1-pai))
    CPact3=Psol3(i)-MinPact3*(pai/(1-pai))
else
    CPact3=0.1*(Psol3(i)-MinPact3*(pai/(1-pai)))
end

    if CPact3 > 0
        Psol3(i+1)=Psol3(i)-CPact3
        Psol3(Psol3<0)=0;
    else
        Psol3(i+1)=Psol3(i)+CPact3
    end

%% MODULO HIDROLÓGICO %%

agua=PP(i)

HAMax=(CC1-PMP1)/100*DA1*PROF1+(CC2-PMP2)/100*DA2*(PROF2-PROF1)+(CC3-PMP3)/100*DA3*(PROF
HAI(i)=(Ci1(i)-PMP1)/100*DA1*PROF1+(Ci2(i)-PMP2)/100*DA2*(PROF2-PROF1)+(Ci3(i)-PMP3)/100

if agua~=0

% MÉTODO DE LA CURVA NUMERO

```

```

s = 254*((100/CN)-1)

% Escorrentía

if agua > 0.2*s
Q(i) = (agua-0.2*s)^2/(agua+0.8*s) %mm
else
Q(i)=0 % "No hay escorrentía"
end

%% Tasa máxima de escorrentía
R=agua/tiempo
bq = Q(i)/agua % COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO
qp = (bq*R*area)/360 % tasa máxima de escurrimiento m3/s
qp2 = (bq*R) % tasa máxima de escurrimiento mm/hr

%% Erosión

X = 1.586*((Q(i)*qp2)^0.56)*(area^0.12) % factor del componente de energía

% Calculo del factor de erodabilidad del suelo

C =MO/1.67 %contenido de fósforo orgánico
SN1=1-0.01*SAN
X1=0.2+0.3*exp(-0.0256*SAN*(1-SIL/100))
X2 = (SIL/(CLA + SIL))^0.3
X3 = 1-0.25*C/(C + exp(3.72-2.95*C))
X4 = 1-0.7*SN1/(SN1+exp(-5.51+22.9*SN1))
EK = X1 * X2 * X3 * X4 % factor de erodabilidad del suelo

% Factor de longitud y pendiente

XM=(0.3*PEND/(PEND+exp(-1.47-61.09*PEND)))+0.2
SL=(SPLG/22.127)^(XM)*(PEND+(65.41*PEND+4.56)+0.065)

% Factor de fragmentos gruesos

ROKF = exp(-0.03*ROK)
Y(i) =X*EK*SL*FGC*PE*ROKF % producción de sedimentos ton/ha

%% Pérdidas de nitrato por percolación y escurrimiento %%
% volumen percolado

if (agua-Q(i))-(HAMax-HAi(i))<=0
QT(i)=0;

```

```
else
```

```
QT(i) =(agua-Q(i))-(HAMax-HAi(i))
```

```
end
```

```
QF(i)=Q(i)+QT(i) % VOLUMEN TOTAL PERDIDO
```

```
%%
```

```
% Pérdidas de Nitrógeno inorgánico
```

```
NO3=NO31(i+1)+NO32(i+1)+NO33(i+1)
```

```
if QF(i)~=0
```

```
QNO3 =NO3*(1- exp(-QF(i)/HAMax))/QF(i) % fracción de nitrato en movimiento en el agua K
```

```
else
```

```
QNO3 =0 % fracción de nitrato en movimiento en el agua Kg N/mm H2O
```

```
end
```

```
QH(i) = QNO3*Q(i) % pérdida de nitrato kg/ha por escorrentía
```

```
NO31(i+1)=NO31(i+1)-QH(i)
```

```
NO31(NO31<0)=0;
```

```
QTN03(i) = QNO3*QT(i) % pérdida kg/ha de nitrato por percolación
```

```
NO31(i+1)=NO31(i+1)-QTN03(i)/3
```

```
NO32(i+1)=NO32(i+1)-QTN03(i)/3
```

```
NO33(i+1)=NO33(i+1)-QTN03(i)/3
```

```
NO31(NO31<0)=0;
```

```
NO32(NO32<0)=0;
```

```
NO33(NO33<0)=0;
```

```
% Pérdidas de Nitrógeno orgánico
```

```
CON=COrgN1(i)*10/(PROF1/10*DA1) % CONCENTRACIÓN DE NITRÓGENO G/TON
```

```
CON=abs(CON)
```

```
if Y(i)==0
```

```
ER=0
```

```
YON(i)=0
```

```
YSP(i)= 0
```

```
YP(i) = 0
```

```
else
```

```
ER = exp(1.21-0.16*log(Y(i)*1000)) % relación de enriquecimiento
```

```
YON(i) = 0.001 *Y(i)*CON* ER % pérdida de nitrógeno orgánico debido al escurrimiento k
```

```
COrgN1(i+1)=COrgN1(i)-YON(i)
```

```
COrgN1(COrgN1<0)=0;
```

```
% Pérdidas de fósforo por escorrentía
```

```

YSP(i) = 0.01 * Y(i) * (Psol1(i) / (2 * DA1)) * Q(i) / 100    %KG/HA transporte de fósforo en soluci
YP(i) = 0.001 * Y(i) * (OrgP1(i) / (2 * DA1)) * ER    %KG/HA transporte de fósforo por sediment
Psol1(i+1) = Psol1(i) - YSP(i)
OrgP1(i+1) = OrgP1(i) - YP(i)
Psol1(Psol1 < 0) = 0;
OrgP1(OrgP1 < 0) = 0;
end

```

```

else
    Q(i) = 0
    QT(i) = 0 % VOLUMEN TOTAL PERDIDO
    QF(i) = 0
    QH(i) = 0
    QTNO3(i) = 0
end

```

%%EVAPOTRASPIRACIÓN

```
EVT(i) = KC(i) * KB * EB(i)
```

%% máxima capacidad del suelo

```

HA1 = (CC1 - PMP1) / 100 * DA1 * PROF1
HA2 = (CC2 - PMP2) / 100 * DA2 * (PROF2 - PROF1)
HA3 = (CC3 - PMP3) / 100 * DA3 * (PROF3 - PROF2)    %(mm)

```

%% contenido actual del suelo

```

HAI1(i) = (Ci1(i) - PMP1) / 100 * DA1 * PROF1
HAI2(i) = (Ci2(i) - PMP2) / 100 * DA2 * (PROF2 - PROF1)
HAI3(i) = (Ci3(i) - PMP3) / 100 * DA3 * (PROF3 - PROF2)    %(mm)

```

```
infiltrado = agua - QF(i)
```

```
if infiltrado > HA1 + HA2 + HA3
```

```

Ci1(i+1) = CC1
Ci2(i+1) = CC2
Ci3(i+1) = CC3

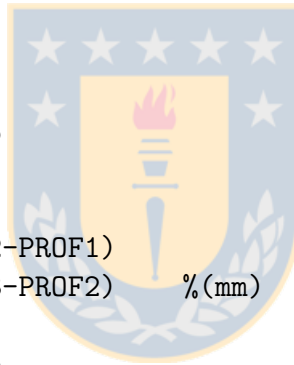
```

```
elseif infiltrado > HA1 + HA2 & infiltrado < HA1 + HA2 + HA3
```

```

Ci1(i+1) = CC1
Ci2(i+1) = CC2
Disponibile = infiltrado - HA1 - HA2

```



```
Ci3(i+1)=(HAI3(i)+Disponible-EVT(i)*0.2)/(DA3*(PROF3-PROF2))*100+PMP3
```

```
elseif infiltrado>HA1 & infiltrado<HA1+HA2
```

```
Ci1(i+1)=CC1
```

```
Disponible=infiltrado-HA1
```

```
Ci2(i+1)=(HAI2(i)+Disponible-EVT(i)*0.3)/(DA2*(PROF2-PROF1))*100+PMP2
```

```
Ci3(i+1)=(HAI3(i)-EVT(i)*0.2)/(DA3*(PROF3-PROF2))*100+PMP3
```

```
elseif infiltrado<HA1 & infiltrado>0
```

```
Disponible=infiltrado
```

```
Ci1(i+1)=(HAI1(i)+Disponible-EVT(i)*0.5)/(DA1*PROF1)*100+PMP1
```

```
Ci2(i+1)=(HAI2(i)-EVT(i)*0.3)/(DA2*(PROF2-PROF1))*100+PMP2
```

```
Ci3(i+1)=(HAI3(i)-EVT(i)*0.2)/(DA3*(PROF3-PROF2))*100+PMP3
```

```
elseif infiltrado<=0
```

```
Ci1(i+1)=(HAI1(i)-EVT(i)*0.33)/(DA1*PROF1)*100+PMP1
```

```
Ci2(i+1)=(HAI2(i)-EVT(i)*0.33)/(DA2*(PROF2-PROF1))*100+PMP2
```

```
Ci3(i+1)=(HAI3(i)-EVT(i)*0.33)/(DA3*(PROF3-PROF2))*100+PMP3
```

```
end
```

```
% consumo de las plantas
```

```
N031(i+1)=N031(i)-Informacion(i,2)*0.33
```

```
N032(i+1)=N032(i)-Informacion(i,2)*0.33
```

```
N033(i+1)=N033(i)-Informacion(i,2)*0.33
```

```
if N031(i+1)<0
```

```
    N031(i+1)=0
```

```
end
```

```
if N032(i+1)<0
```

```
    N032(i+1)=0
```

```
end
```

```
    if N033(i+1)<0
```

```
N033(i+1)=0
```

```
    end
```

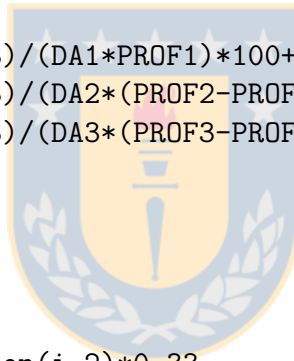
```
Psol1(i+1)=Psol1(i)-Informacion(i,3)*0.33
```

```
Psol2(i+1)=Psol2(i)-Informacion(i,3)*0.33
```

```
Psol3(i+1)=Psol3(i)-Informacion(i,3)*0.33
```

```
Psol1(Psol1<0)=0;
```

```
Psol2(Psol2<0)=0;
```



```

Psol3(Psol3<0)=0;

NO3t(i)=NO31(i)+NO32(i)+NO33(i)
Psolt(i)=Psol1(i)+Psol2(i)+Psol3(i)
end

%%gráficos

diaP=(1:1:length(PP))'
puringraf=purin/10000*(200-dpurin)/100

necesidadN=Informacion(:,2)
PromNitrato=(NO31+NO32+NO33)
PromNH4=(NH41+NH42+NH43)
Nitrodis=PromNitrato+PromNH4

figure
hold on
plot(necesidadN,'--m')
plot(Nitrodis,'--b')
xlabel('Días')
ylabel('Kg/ha')
legend('N Requerido','N Disponible',2,'Location','NorthEast')
title('Variacion de la disponibilidad de Nitrogeno')
grid

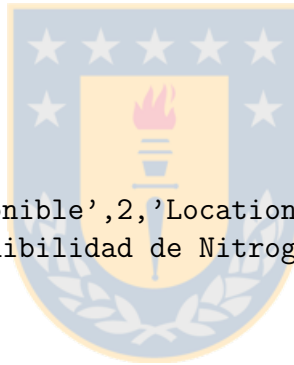
Nitrodis(136)=[]
Agregado=NO3PA+NH4PA

figure
hold on
[AX,H1,H2]=plotyy(diaP,Nitrodis,diaP,HAi)
set(get(AX(1),'Ylabel'),'String','(Kg/ha)')
set(AX(1),'Ycolor','k')
set(AX(2),'Ycolor','k')
set(get(AX(2),'Ylabel'),'String','(mm)')
set(H1,'LineStyle','--')
set(H1,'Color','g','LineWidth',2)

set(H2,'LineStyle','--','Marker','d')
set(H2,'Color','b','LineWidth',1)
plot(puringraf,'--m','LineWidth',2)
%plot(necesidadN,':r','LineWidth',2)

xlabel('Días')

```



```
legend('N disponible (kg/ha)', 'Purin Aplicado (mm)', 'Agua en el suelo (mm)', 3, 'Location',  
grid
```

```
necesidadP=Informacion(:,3)  
PromPsol=(Psol1+Psol2+Psol3)/3  
PromPOrg=(OrgP1+OrgP2+OrgP3)/3
```

```
figure  
hold on  
plot(necesidadP, '--r')  
plot(PromPsol, '--b', 'LineWidth', 1, 'MarkerFaceColor', 'c', 'MarkerEdgeColor', 'k')  
xlabel('Días')  
ylabel('Kg/ha')  
legend('P Requerido', 'P Disponible', 2, 'Location', 'NorthWest')  
title('Variación de la disponibilidad de fósforo')  
grid
```

```
% percolación lavado
```

```
figure  
hold on  
plot(QH, '--r')  
plot(QTNO3, '--b')  
xlabel('Días')  
ylabel('Kg/ha')  
legend('Pérdida N Lavado', 'Pérdida N Lixiviación', 2, 'Location', 'NorthEast')  
grid
```



```
figure  
hold on  
plot(YP, '--r')  
plot(YSP, '--b')  
xlabel('Días')  
ylabel('Kg/ha')  
legend('Pérdida P en sedimento', 'Pérdida P en solución', 2, 'Location', 'NorthEast')  
grid
```

```
% humedad de suelo, precipitación, riego, purín
```

```
precipitacion=PP  
Riego=riego  
purin=purin/10000*(200-dpurin)/100  
Aguasuelo=HAi
```

```
AguaMaxsuelo=HAMax
```

```
figure  
hold on  
plot(precipitacion,'-b')  
plot(Riego,'--r')  
plot(purin,'--g')  
plot(Aguasuelo,'--b')  
xlabel('Días')  
ylabel('mm')  
legend('Precipitación','Riego','Purín','Humedad',2,'Location','NorthWest')  
grid
```

```
purin=purin'  
a=find(purin==0)  
purin(a)=[]  
dia=(1:1:length(PP))'  
dia(a)=[]
```

```
Aplicacionpurin=[dia purin.*10]
```



## 7.3. Ecuaciones

### 7.3.1. Modulo Nitrógeno

El N orgánico es particionado entre las fuentes activas y estables usando las siguientes ecuaciones:

$$CorgNact_{ly} = CorgNhum_{ly} \cdot fractN \quad (7.1)$$

$$CorgNsta_{ly} = CorgNhum_{ly} \cdot \frac{1}{fractN} \quad (7.2)$$

donde  $CorgNact_{ly}$  es la concentración de nitrógeno orgánico en la fuente activa (mg/kg),  $CorgNhum_{ly}$  es la concentración de nitrógeno orgánico húmico en la capa,  $fractN$  es la fracción de nitrógeno húmico en la fuente activa, y  $CorgNsta_{ly}$  es la concentración de nitrógeno en la fuente estable (mg/kg).

### Relación Mineralización/Inmovilización

Si la relación  $C : N > 30 : 1$  ocurre Inmovilización (Disminuye  $NH_4$  y  $NO_3$ ), si la relación  $20 : 1 \leq C : N \leq 30 : 1$  el sistema se encuentra en equilibrio y si la relación  $C : N < 20 : 1$  ocurre Mineralización (Ganancia de  $NH_4$  y  $NO_3$ ).

La mineralización o la inmovilización, ocurren solo si la temperatura del suelo es mayor a 0°C , además de ser dependiente del contenido de humedad del suelo.

Factor de Temperatura

$$FT_{ly} = 0,9 * \frac{(Temp.S_{ly})}{Temp.S_{ly} + exp(9,93 - 0,312 * Temp.S_{ly}))} + 0,1 \quad (7.3)$$

donde  $FT_{ly}$  es el factor temperatura del ciclo de nutrientes para la capa  $ly$ , y  $Temp.S_{ly}$  es la temperatura de la capa  $ly$  (°C).

Factor de Humedad

$$FW_{ly} = Ci_{ly}/CC_{ly} \quad (7.4)$$

donde  $FW_{ly}$  es el factor agua del ciclo de nutrientes para la capa  $ly$ ,  $Ci_{ly}$  es el contenido de agua en la capa  $ly$  en un día dado (mm H<sub>2</sub>O), y  $CC_{ly}$  es el contenido de agua de la capa  $ly$  en capacidad de rendimiento (mm H<sub>2</sub>O).

### Mineralización y inmovilización

$$Ntrans_{ly} = COrgNact_{ly} * Btrans * \frac{1}{fra - 1} - COrgNsta_{ly} \quad (7.5)$$

$Ntrans_{ly}$  es la cantidad de nitrógeno transferida entre las fuentes orgánico activo y estables (kg N/ha),  $Btrans$  es la constante del índice ( $1 \times 10^{-5}$ ),  $COrgNact_{ly}$  es la cantidad de nitrógeno en la fuente orgánica activa (kg N/ha),  $fra$  es la fracción de nitrógeno húmico en la fuente activo (0.02), y  $COrgNsta_{ly}$  es la cantidad de nitrógeno en la fuente orgánico estable (kg N/ha). Cuando  $Ntrans_{ly}$  es positivo, el nitrógeno se mueve de activo al estable.

$$Nmin_{ly} = Bmin * \sqrt{FT_{ly} * FW_{ly} * COrgNact_{ly}} \quad (7.6)$$

$Nmin_{ly}$  es el nitrógeno mineralizado del humus de la fuente de N orgánico activo (kg N/ha),  $Bmin$  es el coeficiente para la mineralización del humus de los nutrientes orgánicos activos,  $FT_{ly}$  es el factor temperatura del ciclo de nutrientes para la capa  $ly$ ,  $FW_{ly}$  es el factor agua en el ciclo de nutrientes para la capa  $ly$ ,  $COrgNact_{ly}$  es la cantidad de nitrógeno en la fuente activa orgánico (kg N/ha). El nitrógeno mineralizado del humus orgánico activo es agregado a la fuente de nitrato en la capa del suelo.

### Nitrificación y Volatilización del Amonio

La nitrificación/volatilización ocurre solo cuando la temperatura del suelo excede los 5°C. El factor temperatura de la nitrificación /volatilización se calcula:

$$Ftemp_{ly} = 0,41 * \frac{Temp.S_{ly} - 5}{10} \quad (7.7)$$

Donde  $Ftemp_{ly}$  es el factor temperatura de la nitrificación/volatilización, y  $Temp.S_{ly}$  es la temperatura de la capa  $ly$  ( $^{\circ}C$ ).

Factor del contenido de agua en el suelo para nitrificación

$$FWat_{ly} = \frac{Ci_{ly} - PMP_{ly}}{(0,25 * (CC_{ly} - PMP_{ly}))} \quad \text{si } Ci_{ly} < 0,25CC_{ly} - 075.PMP_{ly} \quad (7.8)$$

$$FWat_{ly} = 1 \quad \text{si } Ci_{ly} \geq 0,25CC_{ly} - 075.PMP_{ly}$$

Donde  $FWat_{ly}$  es el factor del contenido de agua de nitrificación en el suelo,  $Ci_{ly}$  es el contenido de agua del suelo en la capa  $ly$  (mm H<sub>2</sub>O),  $PMP_{ly}$  es la cantidad de agua mantenida en la capa del suelo en punto de marchitamiento (mm H<sub>2</sub>O), y  $CC_{ly}$  es la cantidad de agua mantenida en la capa del suelo a capacidad de una extensión de agua (mm H<sub>2</sub>O).

El factor profundidad de la volatilización

$$FVol_{ly} = 1 - \frac{PROF_{ly/2}}{PROF_{ly/2} + \exp(4,706 - 0,305 * PROF_{ly/2})} \quad (7.9)$$

Donde  $FVol_{ly}$  es el factor profundidad de la volatilización, y  $PROF_{ly/2}$  es la profundidad desde la superficie del suelo a la mitad de la capa (mm).

El impacto de los factores ambientales en la nitrificación y la volatilización del amoníaco en una capa se definen por el regulador de la nitrificación y el regulador de la volatilización.

Regulador de la Nitrificación

$$Rnit_{ly} = Ftemp_{ly} * FWat_{ly} \quad (7.10)$$

Regulador de la Volatilización

$$Rvol_{ly} = Ftemp_{ly} * FVol_{ly} \quad (7.11)$$

La cantidad total de amoníaco perdido en la nitrificación y la volatilización se calcula

$$N_{nit|vol}^{ly} = NH4_{ly} * (1 - \exp[-Rnit_{ly} - Rvol_{ly}]) \quad (7.12)$$

donde  $N_{nit|vol}^{ly}$  es la cantidad de amoníaco convertido a través de la nitrificación y la volatilización en la capa  $ly$  (kg N/ha),  $NH4_{ly}$  es la cantidad de amoníaco presente en la capa  $ly$  (kg N/ha),  $Rnit_{ly}$  es el regulador de la nitrificación, y  $Rvol_{ly}$  es el regulador de la volatilización.

Fración de amoníaco removido por cada proceso:

$$frnit_{ly} = 1 - \exp[-Rnit_{ly}] \quad (7.13)$$

$$frvol_{ly} = 1 - \exp[-Rvol_{ly}] \quad (7.14)$$

Donde  $frnit_{ly}$  es la fracción estimada de nitrógeno perdido por la nitrificación,  $frvol_{ly}$  es la fracción estimada de nitrógeno perdido por la volatilización. La cantidad de nitrógeno eliminado del charco de amoníaco por la nitrificación se calcula:

$$Nnit_{ly} = \frac{frNit_{ly}}{(frcnit_{ly} + frcvol_{ly})} * N_{nitvol}^{ly} \quad (7.15)$$

y la cantidad de nitrógeno eliminado de la fuente de amoníaco por la volatilización es:

$$Nvol_{ly} = \frac{frvol_{ly}}{(frcnit_{ly} + frcvol_{ly})} * N_{nitvol}^{ly} \quad (7.16)$$

Donde  $Nnit_{ly}$  es la cantidad de nitrógeno convertido de  $NH_4$  a  $NO_3$  en la capa ly (kg N/ha),  $Nvol_{ly}$  es la cantidad de nitrógeno convertido de  $NH_4$  a  $NH_3$  en la capa ly (kg N/ha).

### Desnitrificación

la cantidad de perdida de nitrato en la desnitrificación:

$$Ndesn_{ly} = NO3_{ly} * (1 - \exp(-1,4 * FT_{ly} * OrgC_{ly})) \quad \text{si} \quad FW_{ly} \geq 0,95$$

$$Ndesn_{ly} = 0 \quad \text{si} \quad Ci_{ly} \geq FW_{ly} < 0,95 \quad (7.17)$$

Donde  $Ndesn_{ly}$  es la cantidad de nitrógeno perdido en la desnitrificación (kg N/ha),  $NO3_{ly}$  es la cantidad cantidad de nitrato es la capa ly (kg N/ha),  $FT_{ly}$  es el factor temperatura del ciclo de nutrientes para la capa ly,  $FW_{ly}$  es el factor de agua del ciclo de nutrientes para la capa ly,  $orgC_{ly}$  es la cantidad carbón orgánico en la capa (%).

### 7.3.2. Fósforo

La concentración de fósforo en la fuente mineral activo es inicializada por

$$MinPact_{ly} = Psol_{ly} * \frac{1 - pai}{pai} \quad (7.18)$$

Donde  $MinPact_{ly}$  es la cantidad de fósforo en la fuente mineral activo (kg P/ha),  $Psol_{ly}$  es la cantidad de fósforo en solución (kg P/ha), y  $pai$  es el índice de de disponibilidad del fósforo (0,4).

La concentración de fósforo en la fuente mineral estable es

$$MinPsta_{ly} = 4 * MinPact_{ly} \quad (7.19)$$

donde  $minPsta_{ly}$  es la cantidad de fósforo en la fuente mineral estable (kg P/ha).

### Mineralización y descomposición/inmovilización

La descomposición es la disgregación de residuos orgánicos frescos en componentes orgánicos más simples. La mineralización es la conversión microbiana del fósforo orgánico disponible en el plancton a fósforo inorgánico. La mineralización y la descomposición se dan solo si la temperatura de la capa del suelo es sobre encima de 0°C.

#### Humus Mineralización

El Fósforo Orgánico es particionado entre activo y estable

$$COrgPact_{ly} = OrgP_{ly} * \frac{COrgNact_{ly}}{(COrgNact_{ly} + COrgNsta_{ly})} \quad (7.20)$$

$$COrgPsta_{ly} = OrgP_{ly} * \frac{COrgNsta_{ly}}{(COrgNact_{ly} + COrgNsta_{ly})} \quad (7.21)$$

donde  $COrgPact_{ly}$  la cantidad de fósforo en la fuente orgánica activo (kg P/ha),  $COrgPsta_{ly}$  es la cantidad de fósforo en la fuente orgánica estable (kg P/ha),  $OrgP_{ly}$  es la concentración de fósforo orgánico en la capa (kg P/ha).

La mineralización de la fuente orgánica activa se calcula:

$$Pmin_{ly} = 1,4 * Bmin * sqrt(FT_{ly} * FW_{ly}) * COrgPact_{ly} \quad (7.22)$$

donde  $Pmin_{ly}$  es el fósforo mineralizado de de la fuente orgánica activa (kg P/ha),  $Bmin$  es el coeficiente para la mineralización del humus del de los nutrientes orgánicos activos y  $OrgPact_{ly}$  es la cantidad de fósforo en la fuente orgánica activa (kg P/ha). El fósforo mineralizado se agrega a la fuente de fósforo en solución.

### Sorción de el inorgánico Fósforo

Mucho estudios han demostrado que después de una aplicación de fertilizante de fósforo soluble, la concentración de la solución disminuye rápidamente con el tiempo debido a la reacción con el suelo. Esta reacción rápida inicial es seguida por un descenso mas lento en la solución del p que puede continuar por muchos años (Barrow y Shaw, 1975; Munns y Fox, 1976; Rajan y Fox, 1972; Sharpley, 1982)

La cantidad de fósforo transferido entre la solución y la fuente de fósforo mineral activo

$$CPact_{ly} = Psol_{ly} - MinPact_{ly} * \frac{pai}{(1-pai)} \quad \text{si } Psol_{ly} > MinPact_{ly} * \frac{pai}{(1-pai)}$$

$$CPact_{ly} = 0,1 * (Psol_{ly} - MinPact_{ly} * \frac{pai}{(1-pai)}) \quad \text{si } Psol_{ly} < MinPact_{ly} * \frac{pai}{(1-pai)} \quad (7.23)$$

donde  $CPact_{ly}$ , es la cantidad de fósforo transferida entre la fuente mineral activo y soluble (kg P/ha),  $Psol_{ly}$  es la cantidad de fósforo en solución (kg P/ha),  $MinPact_{ly}$  es la cantidad de fósforo en la fuente mineral activo (kg P/ha). Cuando  $CPact_{ly}$ , es positivo, el fósforo es transferido desde la solución a la fuente mineral activo. Cuando  $CPact_{ly}$ , es negativo, el fósforo es transferido desde la fuente mineral activo a la solución.

### 7.3.3. General

#### Escorrentía de Superficie

En el modelo utilizado en este estudio el escurrimiento en superficie para lluvia diaria se obtiene mediante el método de Número de Curva. Este método fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos (SCS) en base a numerosas cuencas que fueron observadas en ese país.

$$Q = \frac{(RFV-0,2*S)^2}{RFV+0,8*S} \quad \text{si } RFV > 0,2 * S \quad (7.24)$$

$$Q = 0 \quad \text{si } RFV < 0,2 * S$$

Donde Q es el escurrimiento diario y RFV es la lluvia diaria, ambos expresados en mm. El parámetro de retención máxima del suelo S, está relacionado con el valor de número de curva CN, que es un número adimensional que varía entre 0 y 100, (100 para superficies impermeables), según la siguiente relación:

$$S = 254 * \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (7.25)$$

#### Erosión de suelo

En el proceso erosivo del suelo pueden distinguirse 3 etapas generales; la disgregación del suelo ocasionado por el impacto de las gotas de lluvia, el arrastre del suelo debido al escurrimiento superficial y el transporte del suelo.

$$Y = X * EK * CVF * PE * SL * ROKF \quad (7.26)$$

Donde Y es la producción de sedimentos en ton  $ha_{-1}$ , EK es el factor de erodabilidad de suelo, CVF es el factor de manejo de cosecha, PE es el factor de práctica de control de erosión, SL es el factor de longitud y pendiente y ROKF es el factor de fragmentos gruesos. La confiabilidad de este modelo dependerá de la rigurosidad con que se ha estimado cada uno de estos seis parámetros.

El factor X es un componente de energía, esto es lo único que diferencia a los modelos predictivos anuales (USLE) de los diarios (MUSLE).

$$X = 1,586 * (Q * qp)^{0,56} * WSA^{0,12} \quad (7.27)$$

Donde qp es la tasa de máximo escurrimiento en mm/hr.

### **Pérdidas de nitrato por lixiviación y escurrimiento**

la fracción de nitrato en movimiento en el agua Kg N/mm H<sub>2</sub>O

$$QNO3_{ly} = NO3_{ly} * (1 - exp(-QT/HAm_{ax}))/QT \quad (7.28)$$

Las cantidades de nitrato en el escurrimiento y en la percolación se calculan multiplicando la fracción de nitrato en movimiento por sus respectivos flujos.

pérdida de nitrato kg/ha por escurrimiento

$$N_{esc} = QNO3 * Q \quad (7.29)$$

pérdida kg/ha de nitrato por lixiviación

$$N_{lix} = QNO3 * Q_{perc} \quad (7.30)$$

Donde Q<sub>perc</sub> es cantidad de agua que pasa el sector donde el cultivo puede extraerla

### **Transporte de Nitrógeno orgánico por sedimentación**

Para la aplicación a acontecimientos de escurrimientos individuales

$$YON = 0,001 * Y * CON * ER \quad (7.31)$$

Donde YON es la pérdida de nitrógeno orgánico debido al escurrimiento en  $kg\ ha^{-1}$ , Y es la producción de sedimentos en  $ton\ ha^{-1}$ , CON es la concentración de N orgánico en el estrato de suelo en g ton<sup>-1</sup> y ER es la relación de enriquecimiento.

La relación de enriquecimiento puede ser estimada a partir de la producción de sedimentos, mediante la ecuación:

$$ER = exp(1,21 - 0,16 * ln(Y)) \quad (7.32)$$

Donde Y es la producción de sedimentos en  $kg\ ha_{-1}$ .

## Transporte de Fósforo

La absorción máxima  $Q_o(\mu g g^{-1})$  de fósforo por un suelo esta dada por:

$$Q_o = -3,5 + 10,7 * (arcilla) + 49,4(carbonoorg.) \quad (7.33)$$

Donde el contenido de arcilla y el carbono orgánico están en %

## Transporte de Fósforo soluble

La ecuación propuesta para determinar el fósforo soluble transportado es:

$$YSP = 0,01 * CSP * \frac{Q}{KD} \quad (7.34)$$

Donde YSP es el fósforo soluble perdido en  $kg ha^{-1}$ , Q es el escurrimiento en mm, CSP es la concentración de fósforo en el suelo  $g ton^{-1}$  y KD es la concentración de los sedimentos dividido por el agua de escurrimiento. Para Apex Model esta variable propone un valor de 100.

## Trasporte de Fósforo por sedimentación

El transporte de fósforo en los sedimentos es simulado con una función de carga al igual a la descrita en el transporte de nitrógeno orgánico.

$$YP = 0,001 * Y * CP * ER \quad (7.35)$$

Donde YP es el fósforo perdido en  $kg ha^{-1}$  en el sedimento, debido al escurrimiento; Y es la producción de sedimentos en  $ton ha^{-1}$ , CP es la concentración de P en el estrato de suelo en  $g ton^{-1}$  y ER es la relación de enriquecimiento.

## 7.4. acknowledgements

Se agradece al Fondo de Innovación Tecnológica de la Región del Bio Bio, “Generación de información para el diseño y operación de sistema de tratamiento de bajo costo y ambientalmente sustentable para planteles porcinos”, 07-PC S1-198, Cargo del departamento de Recursos Hídricos de la Facultad de Ingeniería Agrícola y centro de ciencias ambientales (EULA) pertenecientes a la universidad de Concepción y FONDECYT 11090032.