

DEFINICIÓN DE ÁREAS DE RIESGO EN AGUAS SUBTERRÁNEAS POR APLICACIÓN DE NITRÓGENO

INFORME FINAL

CAPÍTULO 5 – APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA A REGIONES V, RM Y VIII

CONTENIDOS	Página
1 INTRODUCCIÓN _____	136
2 BASES DE DATOS E INFORMACIÓN UTILIZADA _____	137
3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA _____	143
3.1 GENERALIDADES _____	143
3.2 APLICACIÓN A LA REGIÓN DEL BÍO BÍO _____	143
3.2.1 Cálculos para la generación del mapa de riesgo por carga de nitrógeno de origen agrícola _____	143
3.2.2 Cálculos para la generación del mapa de riesgo por carga de nitrógeno de origen pecuaria _____	156
3.2.3 Cálculos para la generación del mapa de riesgo por carga de nitrógeno de origen agropecuario _____	161
3.3 APLICACIÓN A LA REGIÓN DE VALPARAÍSO _____	163
3.4 APLICACIÓN A LA REGIÓN METROPOLITANA _____	169
3.5 EJEMPLO PARA LA REGIÓN DEL BÍO BÍO DE INCLUSIÓN DE LA VARIABLE SUELO _____	175

1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la aplicación de la metodología desarrollada para la determinación del riesgo de acumulación de nitrato en aguas subterránea por nitrógeno de origen agropecuario, en las tres regiones piloto que contempla el estudio (Metropolitana, de Valparaíso y del Bío Bío).

La descripción se presenta ordenada de la misma manera en que se describe la metodología propuesta (Cáp. 4), es decir, se presenta el procesamiento de la información y los resultados (mapas temáticos) para cada uno de los pasos de metodológicos definidos. De esta forma, primero se realiza la determinación de la carga bruta, después la corrección de esta carga considerando las reacciones del balance del nitrógeno obteniéndose la carga potencialmente lixiviable, y el mapa de riesgo 1 o riesgo potencial para nitratos. Luego, se realiza la corrección por manejo agrícola y condiciones de riego, y la corrección por factores locales de precipitación, pendiente y textura del suelo mediante una matriz edafotopoclimática generada a partir de bases de datos regionales. Por último, se elabora el mapa final de riesgo a la acumulación de nitratos en aguas subterráneas considerando también la vulnerabilidad intrínseca del acuífero. Este mapa presenta 5 rangos de riesgo que son función de las condiciones agropecuarias, hidrogeológicas y otros factores locales de cada sector.

Previo a la decisión de cómo diseñar, elaborar y desarrollar la metodología, como parte de este estudio, se identificó, revisó y analizó la información disponible que pudiese ser de interés. Dado que uno de los objetivos del estudio es desarrollar una metodología que pueda ser aplicada a nivel nacional, uno de los aspectos medulares de la revisión de la información disponible consistió en evaluar si ésta existía para todas las regiones.

Esta información se obtuvo de diversas fuentes, tales como MINAGRI, SAG, CIREN, DGA, SERNAGEOMIN, CONAMA, INIA, Universidades, CNR, agencias gubernamentales regionales y servicios institucionales de estudios y desarrollo agropecuario como ODEPA, INE, PROCHILE y CORFO, entre otras.

La temática general del estudio la componen variables espaciales, dentro de las cuales las más relevantes son la vulnerabilidad de los acuíferos, y las actividades agropecuarias que generan una determinada carga nitrogenada.

Estas variables espaciales se trabajan en capas o coberturas con información territorial georeferenciada, por lo que el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es fundamental para la adecuada y eficiente aplicación de la metodología propuesta.

2 BASES DE DATOS E INFORMACIÓN UTILIZADA

El estudio consideró una extensa revisión y evaluación de información nacional e internacional, como también de bases de datos y estudios específicos provistos por diferentes agencias gubernamentales, información que se resume en la Tabla 2.1.

Las bases de datos más relevantes y las principales coberturas utilizadas son las siguientes:

- Censo Agronómico 1997 (SAG), polígonos de distritos agrocensales que contienen la información silvoagropecuaria de superficie de riego y secano por tipo de rubro y cultivos, y también, el número de cabezas de animales por rubro pecuario. Ésta ha sido la información básica para la determinación de la carga nitrogenada bruta y potencialmente lixiviable por rubro productivo y distrito censal regional.
- Mapa Agroclimático 1980 (CIREN), polígonos con los distintos distritos agroclimáticos. De estos se obtuvo la variable precipitación para generar la matriz edafotopoclimática junto a la pendiente y textura en la determinación del riesgo potencial a la acumulación de nitrógeno.
- Modelos de elevación regionales, permiten generar un MDT (Modelo Digital del Terreno), y luego un mapa de pendientes.
- Estudios agrológicos 2002 (CIREN), planillas Excel con información de textura y tipo de suelo. Esta variable es incluyente de la matriz edafotopoclimática junto a las variables precipitación y pendiente, cuando esta información está disponible geográficamente.
- Mapas de Vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos (SERNAGEOMIN), cobertura de polígonos con las vulnerabilidades regionales. Esta variable fue parte de la determinación del riesgo final a la acumulación de nitratos en aguas subterráneas.

- Datos específicos disponibles en cada región en base a estudios locales o regionales.
- Referencias nacionales y/o internacionales para variables específicas de producción en algunos rubros agrícolas, variables del ciclo del nitrógeno, manejo agropecuario, como también, valores tabulados y promedios nacionales para algunos parámetros como coeficientes de demanda de nitrógeno, eficacia de uso del nitrógeno agrícola y ganadero, pérdidas en residuos pecuarios y, eficiencia de uso del agua en métodos de riego tradicionales y tecnificados.

La Tabla 2.2, siguiendo el mismo orden de la guía metodológica, describe la fuente de información para cada variable. Estas se han ordenado en 5 niveles:

- Carga bruta agrícola de N aplicada,
- Carga bruta pecuaria de N generada,
- Balance de N en el suelo sobre la carga total,
- Factores locales por disponibilidad de riego,
- Factores edafotopoclimáticos.

En la Tabla 2.3 se identifica las principales características de los mapas de vulnerabilidad en las regiones de estudio realizados por el SERNAGEOMIN y utilizados para la aplicación de la metodología.

Como parte fundamental de la revisión y procesamiento de información generada en el país en temas sensibles, tales como el manejo de especies pecuarias y residuos ganaderos como también referentes a las emisiones identificadas en los rubros primarios pecuarios, los servicios gubernamentales centralizados a través de SAG como organismo catalizador de la información, ha provisto de los siguientes estudios ambientales y técnicos, los cuales sirvieron de referencia para algunas variables básicas de cálculo en la presión pecuaria:

- Estudio: “Evaluación de las emisiones de amoníaco, actividades ganaderas RM”. Marzo 2006. Poch Ambiental S.A. Desarrollado por encargo de SAG para los rubros aves, porcinos y bovinos para construir un inventario actualizado de las fuentes emisoras de amoníaco en el sector ganadero de la RM. 124 p.

- Estudio: “Diagnóstico de la problemática ambiental de los residuos generados por la producción de aves y vacunos de leche en Chile y capacitación en la evaluación de planteles pecuarios”. Enero 2006. Desarrollado por SAG para desarrollar la línea base que permita establecer la plataforma de la futura normativa, y entregar elementos que puedan ser utilizados en forma inmediata por el sector productor para el mejor manejo ambiental de los residuos en sus explotaciones. 73 p.
- Proyecto: “Desarrollo de una metodología para la evaluación y mitigación de la contaminación de aguas y suelos: aplicación a la cuenca del río Aconcagua”. Mayo 2005. Universidad Mayor. Desarrollado por encargo de SAG para desarrollar una metodología para evaluar y establecer medidas de mitigación para la contaminación de diversos agentes agroquímicos e industriales en agua y suelo en el valle de Aconcagua. 241 p.
- Proyecto: “Análisis de vulnerabilidad de las aguas subterráneas de la cuenca del río Chillán mediante un modelo SIG”. Realizado por el Centro EULA Chile de la Universidad de Concepción y el SAG. Elaborado para desarrollar una metodología simplificada para la evaluación de la vulnerabilidad de un sistema de aguas subterráneas y el riesgo de que éstas se contaminen por percolación de contaminantes agropecuarios.
- Estudio: “Recomendaciones técnicas para la gestión ambiental en el manejo de purines de la explotación porcina”. Diciembre 2005. INIA-MINAGRI. Elaborado para recopilar todas las recomendaciones técnicas para la gestión ambiental en el manejo de purines en planteles porcinos.
- Estudio: “Guía de recomendaciones. Manejo de purines de lechería”. Julio 2006. FEDELECHE, Superintendencia de Servicios Sanitarios y SAG. Desarrollado para entregar a los usuarios recomendaciones técnicas para el correcto manejo de los purines generados en plantas de bovinos lecheros.
- Estudio: "Especificaciones técnicas de buenas prácticas agrícolas para la producción ovina". Abril 2004. Comisión Nacional de Buenas Prácticas Agrícolas (BPA), MINAGRI Chile. Este estudio tuvo por objeto definir las especificaciones técnicas mínimas que deben ser consideradas en la elaboración de un programa de BPA. 41 p.

Además y como ya se ha señalado, se ha revisado numerosa bibliografía especializada, tanto a nivel nacional como internacional. En el Capítulo 7 se presenta el listado completo de las referencias consultadas.

Tabla 2.1. Información utilizada para el desarrollo y aplicación de la metodología.

Antecedentes	Acceso
Cartografía territorial y regional 1:50.000 y 1:10.000	IGM/SAG
Modelos de elevación digital regionales	SAG
Estudios y mapas de vulnerabilidad del acuífero regionales	SERNAGEOMIN
Catastro de pozos de riego y otros usos	CIREN
Estudios agrológicos regionales, de suelo y uso	CIREN/SAG
Distritos agroclimáticos regionales con base de datos	CIREN/SAG
Censo agropecuario 1997, bases de datos regionales por rubros productivos, uso del suelo y caracterización sector	INE/ODEPA/SAG
Censo agropecuario 2007, planillas de levantamiento datos	SAG
Caracterización tipo de productores y distribución regional	ODEPA
Caracterización nacional actividades agropecuarias, rubros agrícolas, pecuarios y forestales	ODEPA/INE/SAG INIA/ProChile
Catastro frutícola regionales 2002	CIREN
Manejo y existencias de purines por rubro pecuario	SAG/INIA/Consultores
Descripción y caracterización tipos fertilizantes inorgánicos generales y nitrogenados	Fabricantes Consultores/Otros

Tabla 2.2 Fuentes de información para distintas variables utilizadas en la guía metodológica.

Nivel	Variable	Fuente	Origen
1	Rubro productivo agrícola o pecuario (j)	Consultor	Consultor
	Especie de cultivo o tipo animal (i)	Consultor	Consultor
	Coefficiente demanda N por cultivo (Cd_i)	Estudio Min. Medio Ambiente, España	SAG
	Producción promedio por cultivo (P_i)	Censo agropecuario 1997	SAG/ODEPA
	Superficie sembrada cultivo (S_i)	Censo agropecuario 1997	SAG
2	N° cabezas por especie por animal (Nc_i)	Censo agropecuario 1997	SAG
	N° cabezas por rubro animal (Nc_j)	Censo agropecuario 1997	SAG
	Peso promedio por animal por especie (PA_i)	Estudio Poch Ambiental	SAG
	Tasa emisión N por animal por especie (TE_i)	Poch/Oregón State Univ.	Consultor
	Producción de N por rubro animal (P_{Nj})	Poch/Oregón State Univ.	Consultor
3	Eficiencia de uso N por rubro agrícola (U_i)		
	Eficiencia de uso N por pecuario por país (U)		
	Pérdida N_ volatilización agrícola (V_A)	Comunicación Personal, Universidad de Chile	Consultor
	Pérdida N por volatilización pecuaria por excreta (V_P)		
	Pérdida N por desnitrificación por país (D)		
	Mineralización N org por rubro animal (M)	Purdue University/ Estudio Fertiliz. N, Aragón	Consultor
	Porcentaje N por excreta por rubro ($\%N_Puri_Est$)	Estudio Fertiliz. N, Aragón	Consultor
4	Porcentaje N orgánico por rubro por excreta ($\%Norg$)	Purdue University	Consultor
	Factor Riego/Secano (F_{RS})	Consultor	Consultor
	Factor Método de Riego (F_{TR})	Agenda del salitre 2001	Consultor
	Porcentaje superficie con riego ($\%Riego$)		
	Porcentaje superficie con secano ($\%Secano$)		
	Superficie riego tradicional ($ha\ R_{Trad}$)	Censo agropecuario 1997	SAG/Consultor
	Superficie riego mecanizado ($ha\ RMec$)		
5	Superficie riego microirrigación ($ha\ RMirr$)		
	Precipitación (P)	Distritos agroclimáticos	CIREN/SAG
	Pendiente (m)	Modelo de elevación	SAG
	Textura de suelo (s)	Estudios agrológico	CIREN/SAG

Tabla 2.3. Estudios y mapas de vulnerabilidad de acuíferos elaborados por Sernageomin.

Región / Ciudad	Escala	Método	Observaciones
V	1:250.000	BGR	Para su elaboración se recopiló información de pozos de la DGA, estudios geológicos, hidrogeológicos, y de niveles estáticos levantada en SERNAGEOMIN para el valle del Aconcagua durante los años 2001-2003. El cálculo de la recarga se realizó con datos de precipitaciones y evapotranspiración de la DGA.
VIII	1:250.000	GOD	Para su elaboración se recopiló información de pozos de la Dirección General de Aguas y estudios geológicos e hidrogeológicos. La vulnerabilidad se calculó sobre la base de 100 pozos con información estratigráfica.
RM	1:250.000	GOD	Se considera para su elaboración información de pozos de la DGA, estudios geológicos, hidrogeológicos e información levantada por SERNAGEOMIN durante los años 2001-2003. La vulnerabilidad se calculó sobre la base de 702 pozos con información estratigráfica.
Santiago	1:100.000	GOD	Se evalúa la vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos, considerando el espesor que alcanza la zona no saturada y la composición de ésta en relación con la facilidad de propagación de sustancias contaminantes a través de ella.

3 APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

3.1 Generalidades

La aplicación de la metodología diseñada, que se ha propuesto en este estudio para determinar áreas de riesgo de acumulación de nitrato en aguas subterráneas por aplicación de nitrógeno, está basada íntegramente en los conceptos y pasos metodológicos expuestos en el Capítulo 4. Ésta tiene como principales variables: la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, la presión de la carga de nitrógeno tanto de origen agrícola como pecuario, su ciclo y balance en el suelo, como también, algunas condiciones de riego, edafológicas, de clima y topografía del área.

A continuación se describen detalladamente los pasos individuales que deben ejecutarse a lo largo de toda la aplicación de la metodología, la cual se realizó en las tres regiones piloto definidas en el proyecto, a partir de las bases de datos e información disponible. En una primera etapa, se presentan los cálculos y mapas temáticos para llegar a la determinación del mapa final de riesgo de acumulación de nitrógeno de origen agrícola, seguidos de los pasos para generar el mapa de riesgo pecuario y por último, se describen metódicamente los pasos para obtener el mapa de riesgo final de acumulación en aguas subterráneas por nitrógeno de origen agropecuario.

Los programas informáticos utilizados para su aplicación han sido el Microsoft Excel como hoja de cálculo para el tratamiento de las bases de datos y primeros cálculos de la metodología, y el ArcGis como herramienta SIG para la representación gráfica de los mapas como también para los cálculos de riesgo señalados en la guía metodológica.

3.2 Aplicación a la Región del Bío Bío

3.2.1 Cálculos para la generación del mapa de riesgo por carga de nitrógeno de origen agrícola

Carga Bruta de N Aplicada: Estos cálculos se realizan en una hoja de Excel con los valores de las bases de datos del Censo Agropecuario 1997 de la superficie cultivada por cada especie y a la vez, éstas agrupadas por cada rubro productivo, junto con los valores de producción obtenidos del mismo censo o en algunos casos de la ODEPA, la CORFO, el SAG.

En cada distrito censal, para cada especie y según las fórmulas especificadas en la guía, se calcula en una hoja Excel, su rendimiento a partir de su producción en el área en el caso de los cultivos anuales, que se dispone de información de Superficie Cultivada y Producción por distrito agrocensal, mientras que para los otros rubros, frutícola, hortícola, praderas, el rendimiento se calcula con valores promedio nacionales, puesto que sólo se dispone de información de superficie sembrada. Posteriormente, este valor de rendimiento obtenido para cada especie es multiplicado por su coeficiente de demanda (valores según tablas de la guía) para establecer qué cantidad de N es lo que necesita la especie para entregar la producción prevista en la superficie cultivada.

La sumatoria de las dosis de demanda de N de todas las especies de un mismo distrito censal es lo que resulta en la carga bruta de N de origen agrícola aplicada en cada uno de esos distritos. Estos valores pueden representarse en la herramienta SIG (ArcGis) aunque para efectos de los siguientes cálculos de la metodología no es necesario. Sin embargo, la visualización de este mapa temático permite tener un primer diagnóstico de las zonas donde podría ser posible encontrar mayores problemas de concentración de nitratos por esta actividad.

Para la región del Bío Bío, se ha representado un mapa (CN) con estas cargas divididas en 5 rangos (Figura 3.1a). Se puede observar que los distritos agrocensales que presentan mayores cargas (rango más alto, mayores a 240 Kg de N / ha /año) se encuentran en el valle central, donde se desarrollan la mayoría de las actividades agrícolas de la región debido principalmente a las características edafológicas, hídricas y climáticas imperantes en la zona. Así, la Carga bruta de N disminuye en los distritos, de manera directamente proporcional con la disminución de la presión de las actividades agrícolas.

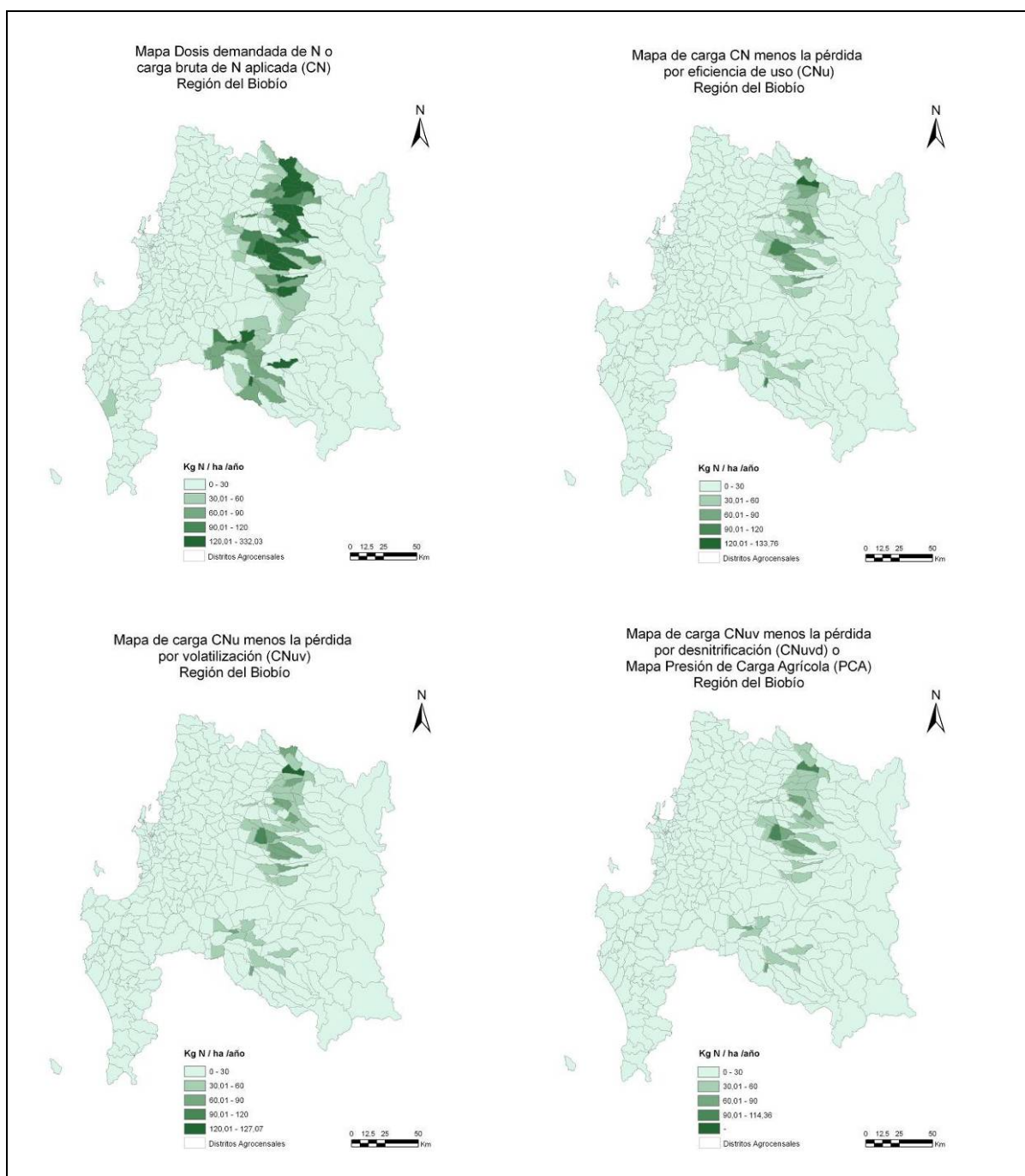


Figura 3.1. Algunos de los mapas temáticos que se obtienen a lo largo de la aplicación de la metodología. a) Mapa de Carga Bruta de Nitrógeno Aplicada (CN); b) Mapa de carga de N considerando la eficiencia de uso (CNU); c) Mapa de carga de N considerando también la volatilización (CNUV); d) Mapa de carga de N considerando además la desnitrificación (CNUVD).

Correcciones por el balance de N en el Suelo: Los cálculos que considera la guía para el balance de N en el suelo (eficiencia de uso, volatilización y desnitrificación) se realizan en hojas de cálculo Excel, aunque también los distintos resultados que se van obteniendo pueden representarse en el SIG como mapas temáticos para su visualización y estudio.

Para considerar las pérdidas de nitrógeno del sistema por la *absorción de las plantas*, los cálculos se realizan sobre los valores de la demanda de N de cada rubro agrícola por separado, los cuales consideran el valor de eficiencia de uso de un 60% para el rubro praderas y de un 50% para los restantes (cultivos anuales, hortícola, frutícola). Es decir, para cada distrito censal se calcula cómo afecta este proceso sobre la carga bruta de N de cada rubro, la cual se obtiene a partir de la sumatoria de las dosis demandada de N de todas las especies de un mismo rubro.

De esta manera en una hoja de Excel, se calculan las pérdidas por absorción de N en los cultivos para cada distrito y para cada rubro, considerando la carga bruta de N (demandada por ese rubro), el porcentaje de hectáreas sembradas de ese rubro respecto el total de área cultivada y la eficiencia de uso considerada. La sumatoria de los valores calculados para cada rubro agrícola representa la pérdida de N total en el distrito por este proceso y se resta a la carga bruta de N calculada anteriormente.

Para la región del Bío Bío el mapa temático (CN_U) que se obtiene de la carga de N aplicada después de considerar las pérdidas por eficiencia de uso de los cultivos se presenta en la Figura 3.1b. Comparando este mapa con el mapa anterior (CN), se observa efectivamente una disminución significativa de la Carga de N en la mayoría los distritos.

Las pérdidas por *volatilización* de la carga agrícola son consideradas constantes de un 5% para todo el país, para todos los rubros y todas las especies de cultivos. Por lo tanto, en cada distrito, estas pérdidas son consideradas sobre la carga bruta menos la eficiencia de uso (CN_U), pudiéndose calcular en una hoja de Excel o en SIG. El resultado es el mapa CN_{UV} , el cual demuestra una segunda disminución de la carga de N en todos los distritos (Figura 3.1c).

Las pérdidas por *desnitrificación* también son consideradas iguales en todo el país (valor conservador del 10%) aplicable a todos los rubros agrícolas; esto permite que los cálculos puedan realizarse tanto en una hoja Excel como en el SIG. Este 10% de pérdidas por desnitrificación es sustraído de la carga CN_{UV} (Carga N bruta menos Eficiencia de Uso y

pérdidas por Volatilización) obteniendo como resultado el mapa de carga CN_{UVD} que equivale a la Carga de N agrícola potencialmente lixiviable (PCA), el cual todavía no incluye los factores de corrección por disponibilidad de riego y tipo de riego.

En este punto de la metodología se obtiene la menor Carga de N en cada distrito, la cual es producto del balance de N en el suelo. La información que entrega este mapa es la cantidad de N disuelto que potencialmente puede lixiviarse y llegar hasta el acuífero (Figura 3.1d).

Correcciones por los factores locales por disponibilidad de riego: Para la carga agrícola, existen además dos factores a considerar que pueden, en este caso, aumentar o dejar con el mismo valor el valor de la carga potencialmente lixiviable. Estos son el Factor Riego/Secano y el Factor Tipo o método de Riego, los cuales se calculan para cada distrito censal y se aplican sobre el valor de la carga PCA. Todos estos cálculos se realizan en hojas de cálculo Excel.

Para calcular el Factor Riego/Secano (F_{RS}) de un distrito censal, para cada rubro productivo se calcula el porcentaje de superficie sembrada bajo riego y bajo secano a los cuales se les aplica el factor de 1,3 para riego y de 1 para secano, respectivamente. La sumatoria de estos valores de todos los rubros involucrados siguiendo la fórmula presentada en la guía, equivale al Factor Riego/Secano total de cada distrito agrocensal.

Para calcular el Factor Tipo de Riego (F_{TR}), es importante señalar que éste se calcula solamente sobre el total de áreas cultivadas bajo riego, las cuales incluyen tres tipos de método de riego definidos en las bases de datos censales. Así, para cada distrito censal, se calcula este factor a partir de las hectáreas cultivadas bajo riego Tradicional, Mecanizado y Micro-Irrigación con respecto a las hectáreas totales cultivadas bajo riego, a cada uno de los tipos de riego señalados anteriormente se les aplica un factor de 1,3, 1,15 y 1, respectivamente, según indica la fórmula presentada en la guía.

En este paso es necesario considerar que las bases de datos del censo agropecuario, desde donde se obtienen los datos de las hectáreas cultivadas presentan algunas discrepancias que obligan a realizar un cálculo previo intermedio. Es decir, las hectáreas totales cultivadas bajo riego en un mismo distrito censal obtenidas a partir de las tablas parciales del censo, no coinciden con las hectáreas de la tabla general regional, la cual sí entrega la información de la tecnología de riego utilizada.

Por este motivo, el número de hectáreas cultivadas bajo cada tipo de riego se han recalculado proporcionalmente desde la tabla general al total de hectáreas cultivadas bajo riego de las tablas parciales por cada región.

En Excel se realiza el cálculo de ambos factores de Tipo de Riego y Riego/Secano, los cuales multiplican, en el SIG, el valor de la carga CN_{UVD} o PCA y se obtiene un nuevo mapa de la Carga de N corregida por los factores de balance de N del suelo y de disponibilidad de riego, el cual se denomina Mapa de Presión de Carga Agrícola Potencialmente Lixiviable (PCAR).

Con este nuevo cálculo, los valores de carga de N de cada distrito aumentan ligeramente por la corrección de disponibilidad de riego que afecta solamente a las superficies regadas. Mientras, en los sectores de secano la carga de N no cambia debido al factor 1 que se le aplica, dado que en sectores de secano existe un riesgo menor de lixiviación de agentes contaminantes.

Este mapa PCAR presenta las cargas valoradas en 5 rangos como describe la guía, entregando la información final respecto a Carga de N de origen Agrícola por distrito aplicando todos los cálculos de balance en el suelo y de factores de riego (Figura 3.2).

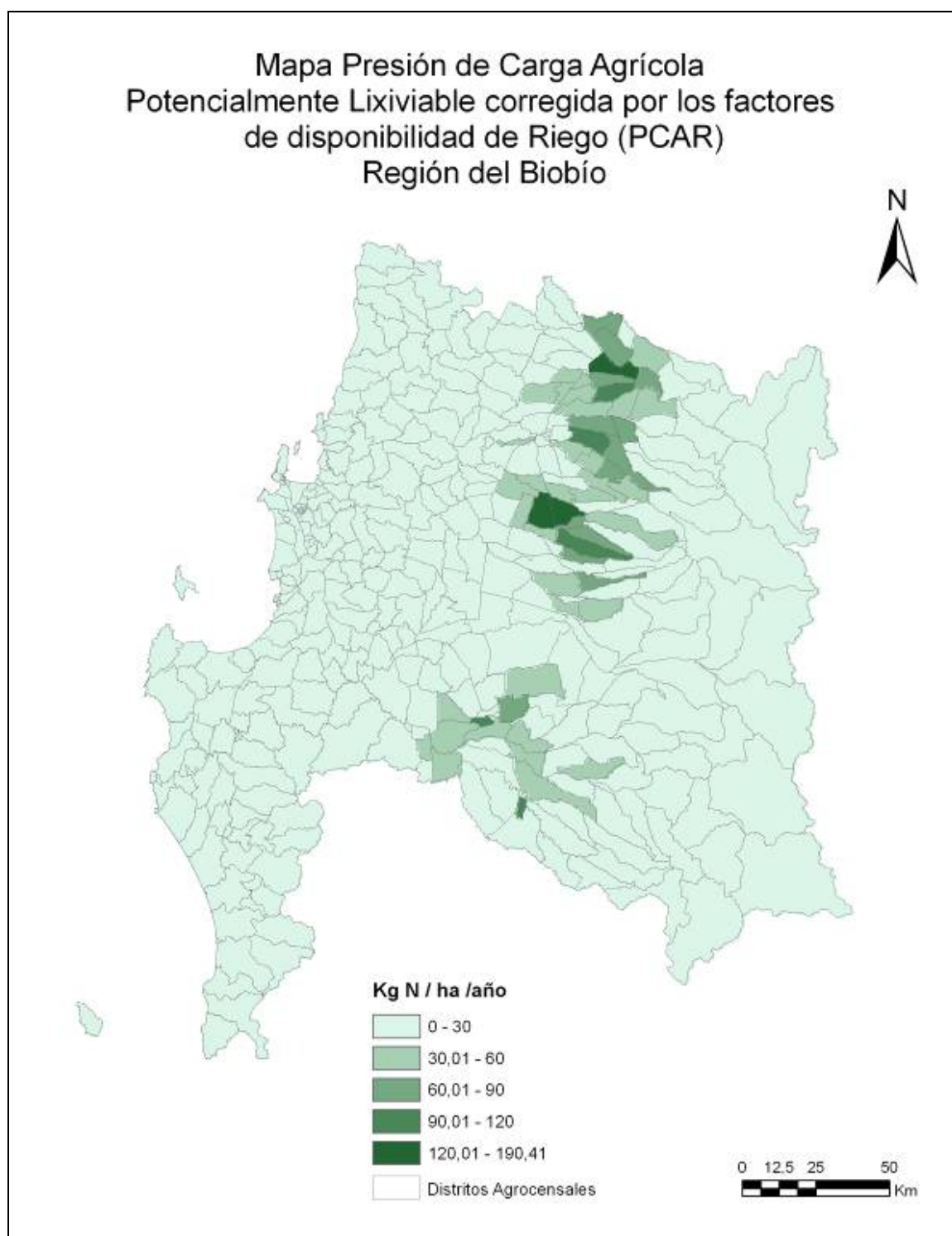


Figura 3.2. Mapa Presión de Carga Agrícola Potencialmente Lixiviable Corregida por los Factores de Disponibilidad de Riego (PCAR).

Cálculo de la matriz topoclimática: La matriz topoclimática evalúa el riesgo local de mayor o menor infiltración de la carga Agrícola y/o Pecuaria hacia los acuíferos producto de la precipitación, textura del suelo y pendiente del terreno. Este índice de riesgo se calcula en la herramienta SIG, utilizando una celda unitaria de $90 \times 90\text{m}$, definida a partir de la resolución de los modelos digitales de elevación cuya resolución es de 90 m (celdas de $90 \times 90\text{m}$ que entregan la información de altitud).

Para el cálculo de esta matriz, tal y como se explica en el capítulo 4, a cada celda unitaria se le asigna un valor numérico matemático (definido según la tabla 5.5 del capítulo 4) que representa uno de los siete rangos de riesgo en que se ha dividido la escala de mayor o menor precipitación anual promedio. Igualmente, para el factor textura de suelo la celda unitaria recibe también un valor numérico según la misma escala anterior, y que representa uno de los siete rangos de riesgo que supone la textura de suelo de las bases de datos de CIREN. La pendiente, se ha dividido en los mismos siete rangos, asignando a cada celda su valor correspondiente. La incorporación de estos valores matemáticos en el software ArcGis se realiza con la herramienta *Reclassify* de la extensión *Spatial Analyst*. Un ejemplo se puede ver en la Figura 3.3 en donde se muestra la correspondencia entre los rangos de precipitación expresados en mm y los valores matemáticos en que se han reclasificado.

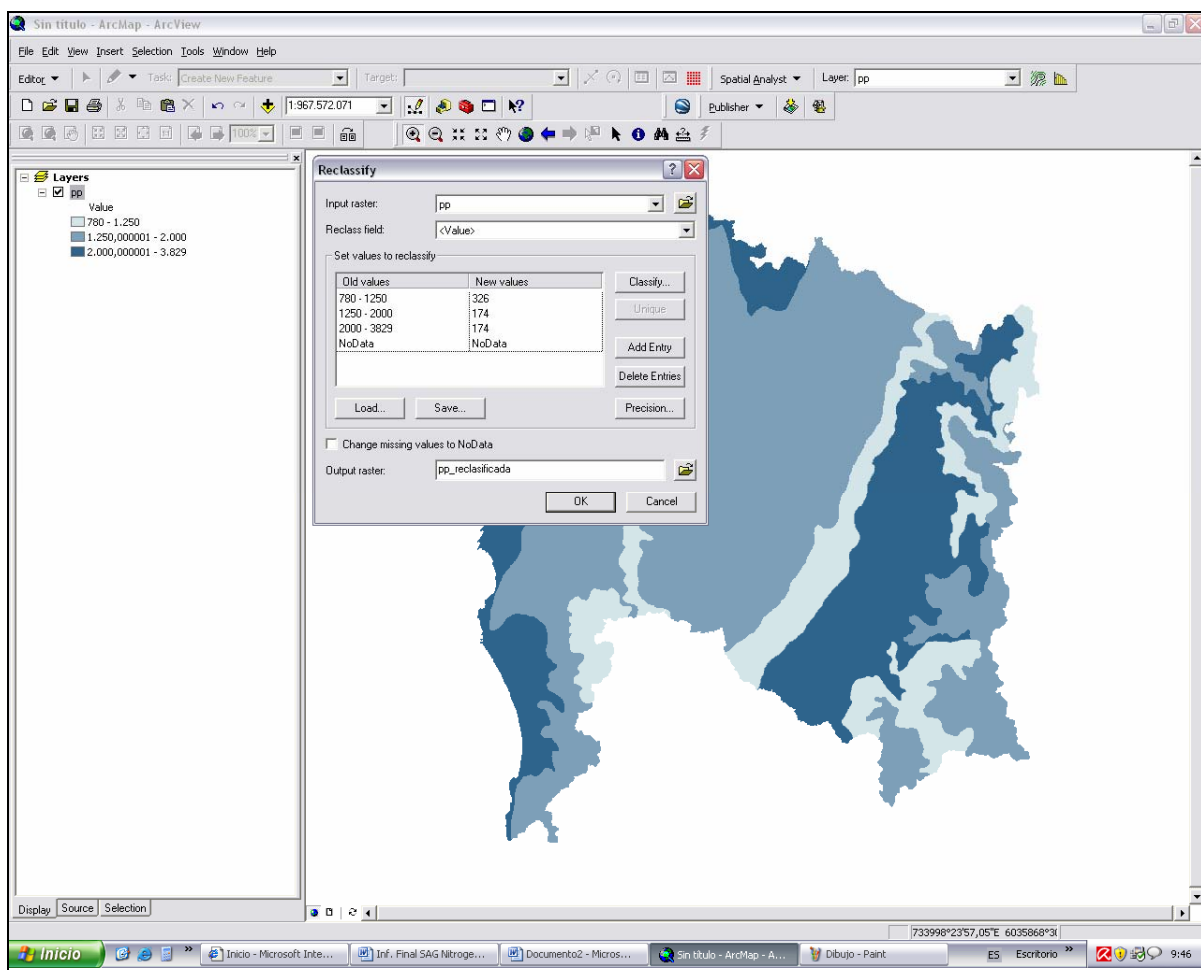


Figura 3.3. Reclasificación de rangos de precipitación

La multiplicación, en el SIG, de estos tres factores ponderados según su importancia relativa como factores capaces de producir una menor o mayor infiltración de nitratos se calcula con la herramienta *Raster Calculator* de la extensión *Spatial Analyst* (Figura 3.4). Este cálculo da como resultado el Índice final de riesgo de la matriz para cada celda unitaria. Este índice es un factor que potencia o debilita la carga de N en cada distrito y que se reclasifica también en 7 rangos de muy alto, alto, medio alto, medio, medio bajo, bajo y muy bajo.

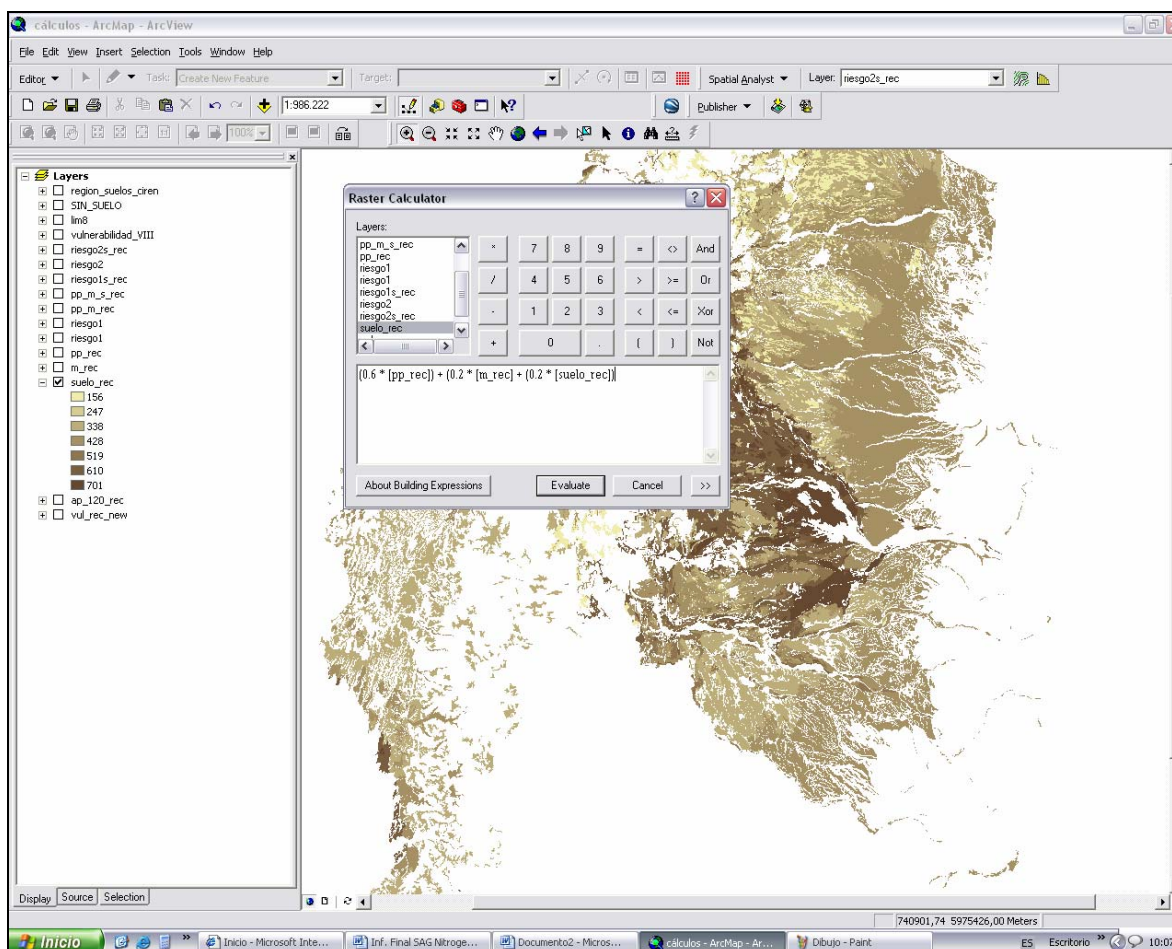


Figura 3.4. Cálculo matriz topoclimática, suma ponderada en aplicación *Raster Calculator*

Dado que no existe información completa de textura de suelo para la totalidad de la superficie de las tres regiones en estudio, la metodología actual ha sido validada solamente a partir de una matriz topoclimática que incluye solamente las variables de precipitación y pendiente. Para la Región del Bío Bío el resultado de esta matriz se presenta en la Figura 3.5a, sin embargo al final de este capítulo se presenta un ejemplo no validado de esta región, en donde se incluye la variable suelo en todos los pasos y mapas de la metodología diseñada.

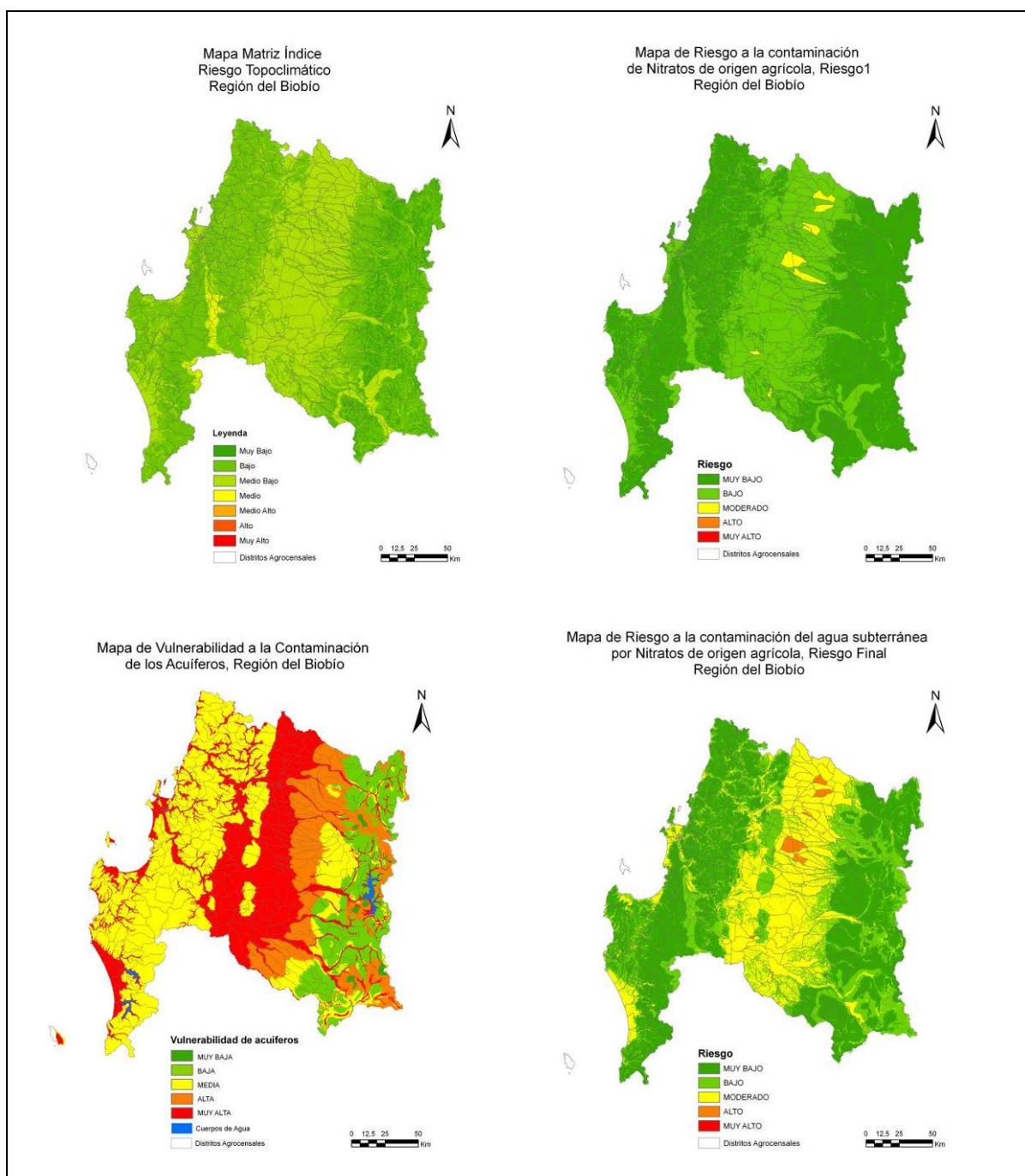


Figura 3.3. Otros mapas que se obtienen o se utilizan en la aplicación de la metodología para el cálculo del riesgo a la acumulación de N de origen agrícola en aguas subterráneas. a) Mapa Índice de riesgo obtenido de la matriz topoclimática; b) Mapa temático de Riesgo 1; c) Mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero; d) Mapa de riesgo final de acumulación de N de origen agrícola en aguas subterráneas.

Es importante mencionar que los valores de ponderación de los tres factores de la matriz propuesta en la metodología, no han sido validados. Estos se podrían ajustar en el momento en que se dispongan de los datos de suelo completos para la superficie total de las tres regiones, permitiendo realizar la calibración y validación de la metodología con esta variable.

Mapa de riesgo 1 a la acumulación de nitratos de origen agrícola: A partir del mapa PCAR (Presión de Carga Agrícola Potencialmente Lixiviable corregida por los factores de disponibilidad de Riego) y el índice de riesgo de la Matriz Topoclimática, se calcula este mapa en el SIG. Con la herramienta *Reclassify* de la extensión *Spatial Analyst* se ingresa el valor numérico matemático que le corresponde a cada rango de carga según la tabla 5.6 del capítulo 4, correspondiente al mapa PCAR. Este valor se multiplica con el valor numérico de la celda que corresponde a su índice de riesgo de la matriz topoclimática. Esta multiplicación de Carga x Matriz se realiza con la herramienta *Raster Calculador* de la extensión *Spatial Analyst* y se traduce en cinco rangos de riesgo inicial o Riesgo 1, los cuales representan si una celda presenta un mayor o menor riesgo potencial a la acumulación de nitrógeno a nivel suelo (Figura 3.5b).

Los valores obtenidos de esta multiplicación son reclasificados nuevamente con la herramienta *Reclassify* de la extensión *Spatial Analyst*, en 5 valores numéricos siguiendo como base los valores tabulados de la guía, con el fin de generar el cálculo del Riesgo Final de aumento de carga de nitrato en los acuíferos.

Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos: El Mapa de vulnerabilidad de los acuíferos se basa en el mapa desarrollado por el SERNAGEOMIN (método BGR). Éste presenta 8 rangos de vulnerabilidad intrínseca, los que se han reclasificado en 5 nuevos rangos según la Tabla 3.1 y como se presenta en la Figura 3.5c. A cada uno de estos nuevos rangos se le otorga también un valor numérico matemático en *Reclassify* de la extensión *Spatial Analyst*, según las tablas de la guía. Estos valores sirven para los cálculos de los mapas finales de riesgo de concentración de nitratos de aguas subterráneas por nitrógeno de origen agrícola, pecuario o agropecuario.

Tabla 3.1. Reclasificación de los 8 rangos de vulnerabilidad intrínseca del mapa del SERNAGEOMIN de la región del Bío Bío en 5 nuevos rangos para la presente metodología.

DNC: Depósitos no consolidados. R: Rocas.

BGR VIII Región	Rangos vulnerabilidad considerados para esta metodología
Muy Alta (DNC)	MUY ALTA
Alta (DNC)	
Moderada a Alta (DNC)	ALTA
Moderada a Alta (R)	
Moderada (DNC)	MODERADA
Moderada (R)	
Moderada a Baja (R)	BAJA
Baja (R)	MUY BAJA

Mapa de Riesgo Final a la acumulación de nitratos de origen agrícola: Este último mapa de Riesgo Final es el resultado del cruce del mapa de Riesgo 1 (carga de Nitratos de origen agrícola) con el mapa de la Vulnerabilidad de los acuíferos. El cálculo se realiza también en la herramienta SIG con *Raster Calculador* de la extensión *Spatial Analyst*, multiplicando los valores matemáticos asignados al mapa de Riesgo 1 y al de Vulnerabilidad intrínseca. Los resultados, en *Reclassifly* de la extensión *Spatial Analyst*, son clasificados en 5 rangos de muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo que representan el riesgo final de las aguas subterráneas por aplicación superficial de una carga de nitrógeno de origen agrícola considerando los factores de balance del suelo, de manejo de riego, factores locales de precipitación, pendiente y textura de suelo y de vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

En el mapa Final de riesgo de concentración de nitrógeno de origen agrícola de la región del Bío Bío (Figura 3.5d) se puede apreciar que la zonificación de las áreas con distintos riesgos sigue un patrón similar a la imagen que entrega el mapa de vulnerabilidad intrínseca pero con la influencia de las áreas de Riesgo 1 anteriormente calculadas.

3.2.2 Cálculos para la generación del mapa de riesgo por carga de nitrógeno de origen pecuaria

Carga de N generada por distrito: Al igual que en la Carga Agrícola, los cálculos para la Carga Pecuaria generada en cada distrito se realizan en una hoja Excel con los valores de las bases de datos del censo agropecuario 1997. Éste entrega la información del número de animales para los rubros bovinos, porcinos, ovinos, caprinos, equinos, y aves, distinguiendo en los bovinos los que son para carne o para leche, y en aves especifica las que son reproductoras, ponedoras y las de engorda. Así, la producción de N generada por los rubros bovino y aves se determina con el número de animales por especie y tipo, su peso promedio y la tasa de emisión de N (ver tablas de la Guía), y para los demás rubros en que no existe información más específica del número de animales según su tipo, se calcula mediante los valores de producción de nitrógeno promedio por cada rubro.

La suma del N generado por todos los rubros en cada distrito puede representarse con la herramienta SIG para visualizar las cargas totales generadas en cada distrito y que se supone que son también aplicadas en los campos del sector. En este mapa temático de Nitrógeno Excretado (NE), las cargas se dividen en los mismos 5 rangos que los utilizados en el mapa de carga bruta Agrícola.

Para la región del Bío Bío, (Figura 3.4a) podemos observar como las cargas de N generadas en la región son mucho menores, en general, que las aplicadas como fertilizantes sintéticos y que, las de origen pecuario se concentran en determinados distritos alcanzando en ellos valores muy elevados de carga de nitrógeno.

Correcciones por el balance de N en el Suelo: Los cálculos que considera la guía para el balance de N en el suelo sobre los rubros pecuarios (volatilización, no-mineralización, eficiencia de uso y desnitrificación) se realizan también en hojas de cálculo Excel, aunque los resultados obtenidos pueden ser calculados y representados también en el SIG para su visualización.

Las pérdidas de nitrógeno por *volatilización*, distintas según la composición de la excreta, se calculan sobre los Kg de nitrógeno excretado por cada rubro productivo y/o tipo de animal, sobre su porcentaje de N excretado como estiércol o como purín, y considerando la concentración de nitrógeno en los purines y estiércoles generados de cada tipo de animal o

rubro según se especifica en la Guía. Una vez se han realizado estos cálculos en una hoja Excel, puede trasladarse el valor de la suma de los Kg de nitrógeno excretados residuales de cada rubro y por cada distrito censal a la herramienta SIG para visualizar el mapa NE_v (Figura 3.4b). Éste muestra una disminución de la Carga de N de origen pecuario que es aplicada en los campos.

El proceso de mineralización depende también del porcentaje de N excretado como estiércol o como purín, y de la concentración de N orgánicos de la excreta. Así, las pérdidas por *no-mineralización* se calculan también en una hoja Excel, para cada rubro y/o tipo animal por separado según indica la Guía. Su representación en la herramienta SIG genera el mapa de carga pecuaria considerando las pérdidas por volatilización y no-mineralización NE_{VM} (Figura 3.4c).

La porción de nitrógeno que utilizan las plantas para su crecimiento a través de la descomposición en el suelo de los estiércoles y purines se considera un valor constante de referencia, del 33% para todos los tipos de excretas y para todo el país (*eficacia de uso*). Por lo tanto, estas pérdidas pueden calcularse para cada distrito sobre los valores de NE_{VM} en la herramienta SIG. El nuevo mapa NE_{VMU} que se genera (Figura 3.4d) refleja una nueva reducción de la carga nitrogenada generada en cada distrito.

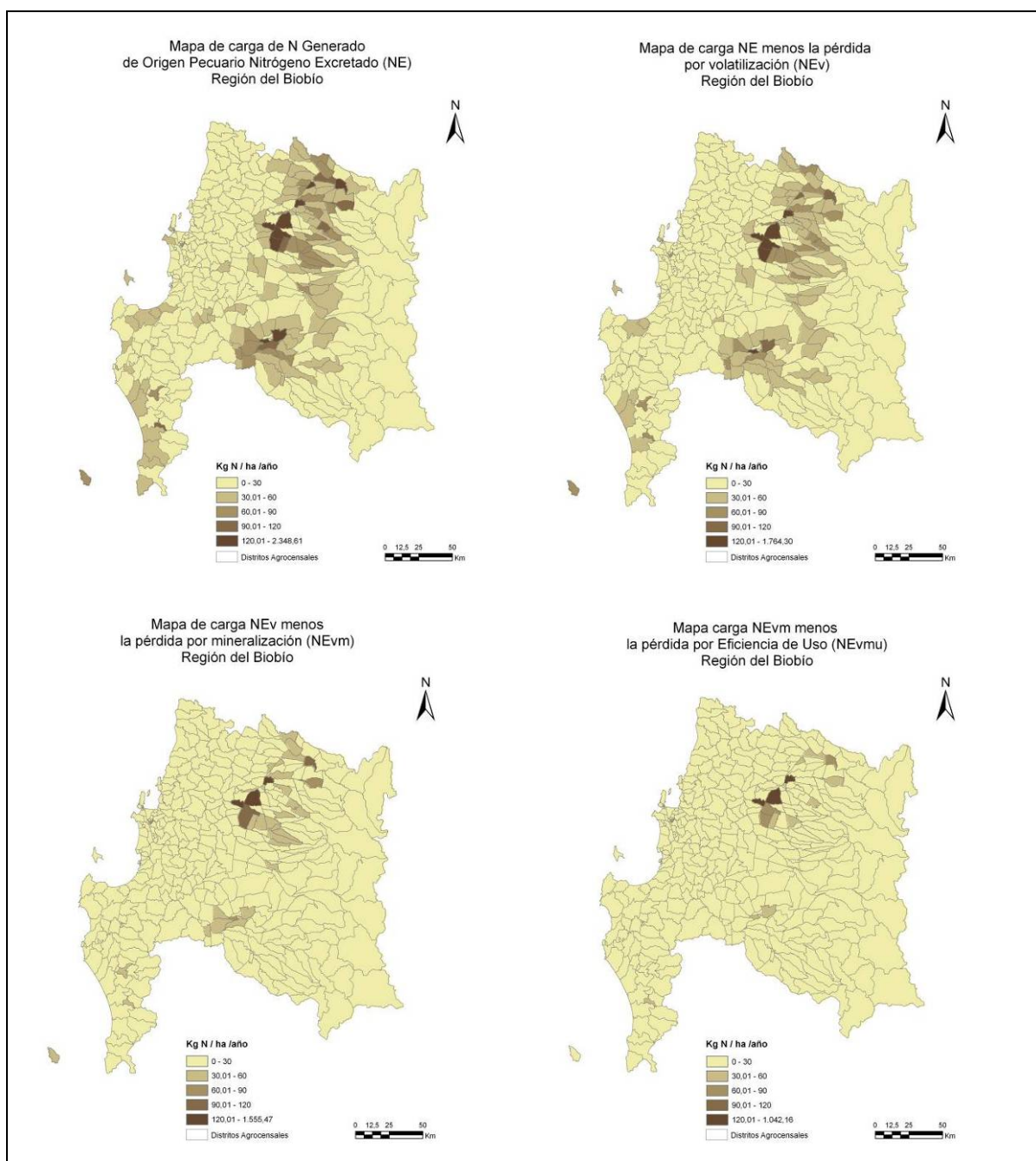


Figura 3.4. Mapas temáticos- a) Mapa Nitrógeno Excretado (NE); b) Mapa del nitrógeno generado considerando las pérdidas por volatilización (NE_v); c) Mapa del nitrógeno excretado considerando además las pérdidas por no-mineralización (NE_{vm}); d) Mapa considerando la absorción o eficacia de uso (NE_{vmu}).

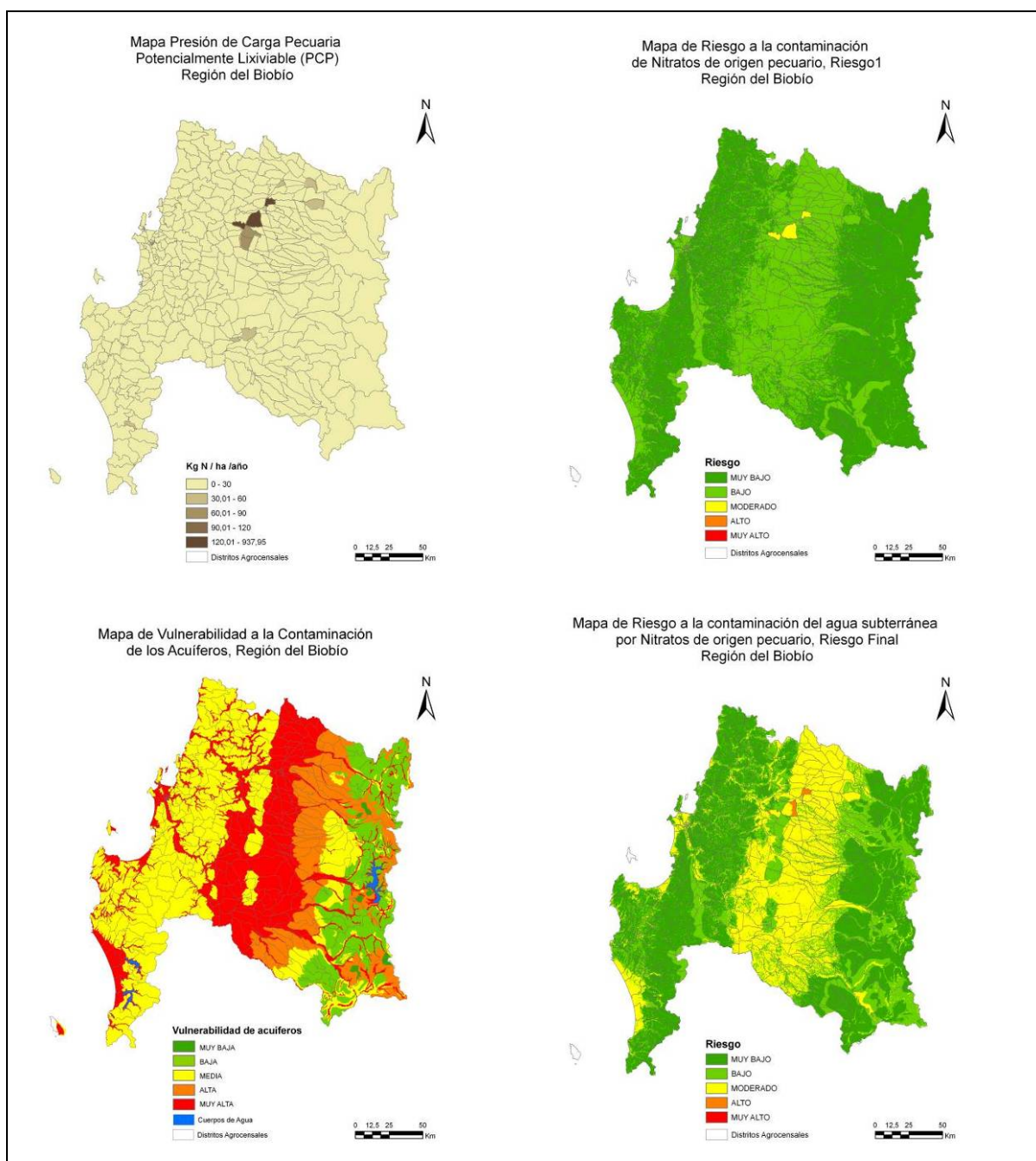


Figura 3.5. Otros mapas de la aplicación de la metodología para el cálculo del riesgo a la carga de N de origen pecuario en aguas subterráneas. a) Mapa de carga que considera también las pérdidas por desnitrificación (NEVMUD); b) Mapa temático de Riesgo 1; c) Mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero; d) Mapa de riesgo final de N de origen pecuario en aguas subterráneas

Del mismo modo que para las Cargas Agrícolas, las pérdidas por desnitrificación se calculan en la herramienta SIG y se consideran también del 10% de la carga de N residual de cada distrito. El resultado, es el mapa NE_{VMUD} que considera todas las pérdidas de balance en el suelo y que representa la Presión de Carga Pecuaria Potencialmente Lixiviable (PCP) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a)** en el cual, las cargas, se dividen en los mismos 5 rangos que en mapa agrícola PCAR.

En este mapa se observa también que casi la totalidad de los distritos presentan un valor de carga PCP en el primer rango inferior de Carga que corresponde a entre 0 y 30 Kg de N/ha/año, mientras solamente cuatro distritos presentan rangos mayores al límite más alto, de más de 120 Kg de N/ha/año.

Mapa de riesgo 1 a la acumulación de nitratos de origen pecuario: Este mapa se obtiene a partir de la superposición en la herramienta SIG del Mapa del Índice de riesgo de la matriz topoclimática (Figura 3.3a) con el Mapa Presión de Carga Pecuaria Potencialmente Lixiviable (PCP) (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.a)**). El cálculo se realiza mediante la multiplicación de los valores matemáticos asignados a los índices de riesgo de la matriz y a los rangos de carga tabulados en la guía. A pesar de la homogeneidad del mapa PCP, como resultado de esta superposición, el mapa de riesgo 1 que se obtiene (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b)**) sí presenta una mayor variación en áreas con distintos rangos de riesgo. A los 5 rangos de riesgo de este mapa se les asigna en el SIG un valor numérico según las tablas de la guía para efectos de los siguientes cálculos.

Mapa de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos: Se utiliza el mismo mapa de vulnerabilidad utilizado en los cálculos del riesgo de nitratos de origen agrícola (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.c)**), donde se han reclasificado los 8 rangos de vulnerabilidad iniciales en 5, y se les ha otorgado un valor matemático según las tablas de la guía para los siguientes cálculos.

Mapa Final de Riesgo a la acumulación de nitratos de origen pecuario: Este último Mapa de Riesgo Final (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.d)**) es el resultado del cruce del mapa de Riesgo 1 por carga de nitratos de origen pecuario (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.b)**) con el mapa de Vulnerabilidad de los acuíferos modificados de los originales de SERNAGEOMIN (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.c)**). El

cálculo se realiza igualmente en la herramienta SIG, mediante la multiplicación de los valores matemáticos asignados al mapa de Riesgo 1 y al de Vulnerabilidad intrínseca, clasificando los resultados en los mismos 5 rangos que representan el riesgo final de concentración de las aguas subterráneas por aplicación superficial de una carga de nitrógeno de origen pecuaria considerando los factores de balance del suelo, los factores locales de precipitación, pendiente y textura de suelo y de vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

En el mapa Final de riesgo a la acumulación de nitrógeno de origen pecuario de la región del Bío Bío (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se puede apreciar una zonificación similar a la vulnerabilidad intrínseca medianamente influenciado por las áreas de Riesgo 1 anteriormente calculadas.

3.2.3 Cálculos para la generación del mapa de riesgo por carga de nitrógeno de origen agropecuario

Mapa de Carga Agropecuaria potencialmente lixiviable o Mapa Presión de Carga Agropecuaria (PCAP): Este mapa, se elabora para el cálculo de los mapas de Riesgo 1 y de Riesgo Final que consideran las cargas de nitrógeno de origen agropecuario. Por lo tanto, corresponde a la suma de la carga de N potencialmente lixiviable de origen agrícola y de origen pecuario, teniendo en cuenta las pérdidas por los procesos de balance en el suelo y los factores de manejo de riego. Es decir, corresponde a la suma de los mapas PCAR y PCP, cuyo cálculo se realiza directamente en el SIG. Para la región del Bío Bío este mapa se presenta en la Figura 3.6a reflejando efectivamente los resultados de los mapas de carga agrícola y pecuaria.

Mapas de Riesgo 1 y Riesgo Final a la acumulación en aguas subterráneas por nitratos de origen agropecuario: Para la obtención de los mapas de Riesgo 1 y Riesgo Final se aplican los mismos pasos metodológicos (cruce con la matriz topoclimática y la vulnerabilidad intrínseca) que se utilizaron para obtener los mapas de Riesgo 1 y de Riesgo Final para las cargas de origen Agrícola y Pecuaria. Así, para las cargas agropecuarias los mapas obtenidos se muestran en la Figura 3.6b (Riesgo 1 agropecuario) y Figura 3.6d (Riesgo Final agropecuario).

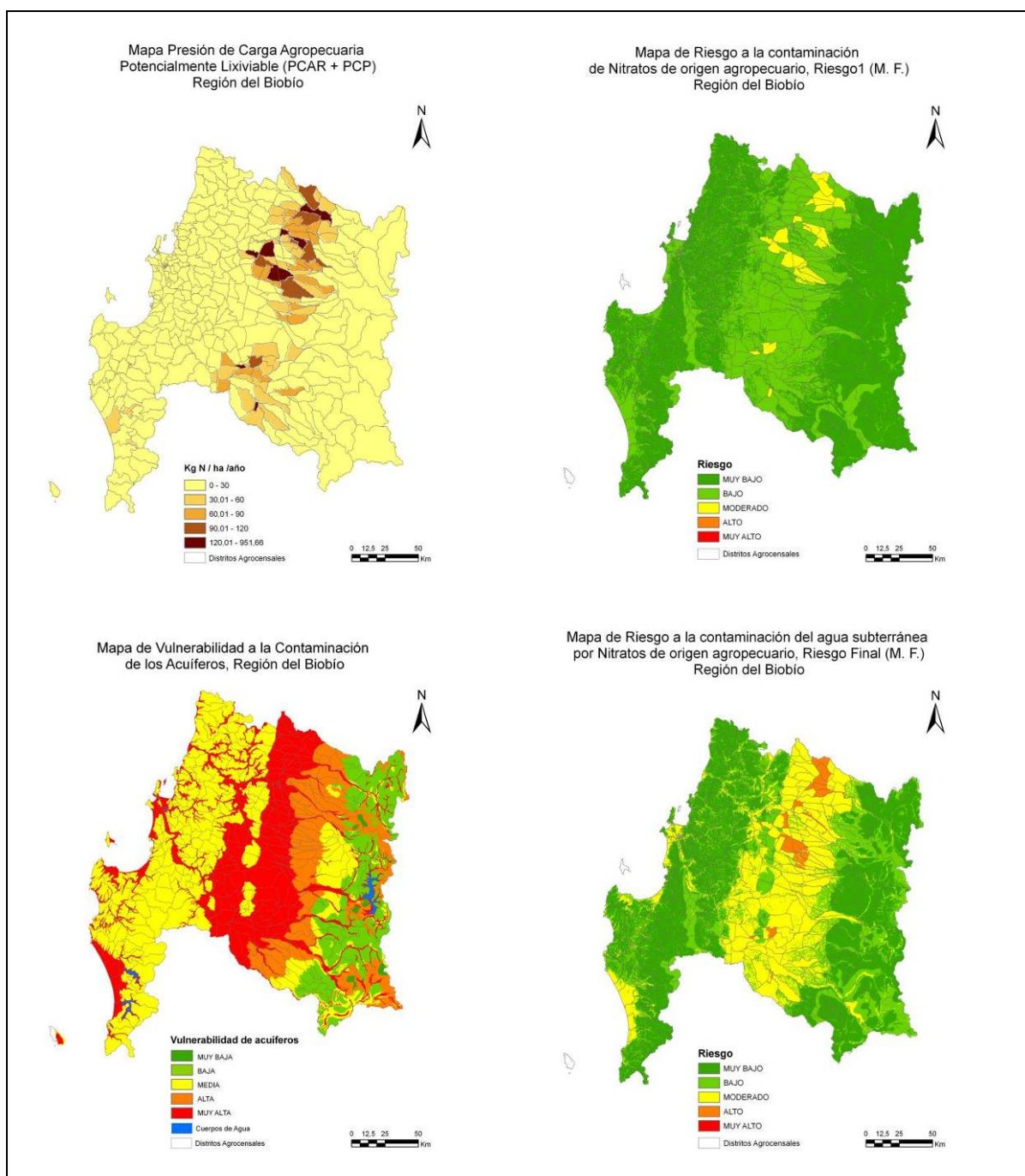


Figura 3.6. Mapas obtenidos durante la aplicación de la metodología para el cálculo del riesgo a la carga de N de origen agropecuario en aguas subterráneas. a) Mapa de presión de carga agropecuaria potencialmente lixiviable (PCAP), b) Mapa temático de Riesgo 1; c) Mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero; d) Mapa de riesgo final del aumento de concentración de N de origen agropecuario en aguas subterráneas.

3.3 Aplicación a la Región de Valparaíso

Los pasos metodológicos para la obtención del mapa Final de riesgo de aumento de concentración de nitrógeno de origen agropecuario en la región de Valparaíso, han sido los mismos que los presentados para la región del Bío Bío.

Por lo tanto, a continuación se presentan solamente los mapas finales y temáticos que se han ido obteniendo y/o utilizando en la aplicación de la guía en esta región (Figura 3.7, Figura 3.8, Figura 3.9, Figura 3.10 y Figura 3.11). Además, en la Tabla 3.2 se presenta la reclasificación de los 7 rangos de vulnerabilidad intrínseca de los mapas del SERNAGEOMIN a los nuevos 5 rangos para esta metodología.

Tabla 3.2. Reclasificación de los rangos de vulnerabilidad intrínseca del mapa del SERNAGEOMIN de la región de Valparaíso. DNC: Depósitos no consolidados. R: Rocas.

BGR V Región	Rangos vulnerabilidad considerados para esta metodología
Alta a muy Alta (DNC)	MUY ALTA
Moderada (DNC)	ALTA
Moderada a Baja (R)	MODERADA
Baja a Moderada (DNC)	
Baja a Moderada (R)	BAJA
Baja a muy Baja (DNC)	MUY BAJA
Baja a Nula (R)	

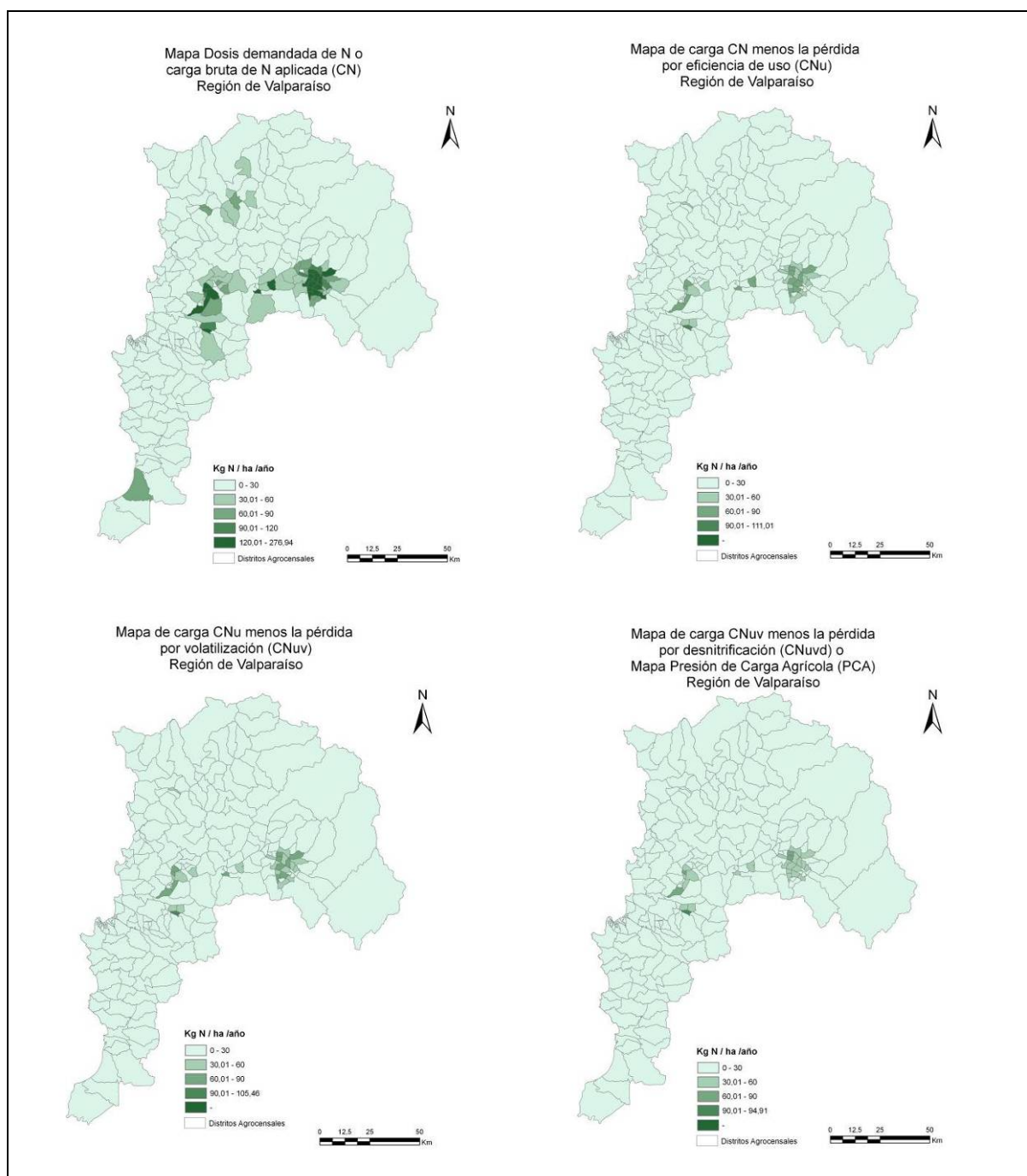


Figura 3.7. Mapas temáticos de carga agrícola para la región de Valparaíso: a) Mapa de Carga Bruta de Nitrógeno Aplicada (CN); b) Mapa de carga de N considerando la eficiencia de uso (CNU); c) Mapa de carga de N considerando también la volatilización (CN_{UV}); d) Mapa de carga de N considerando además la desnitrificación (CN_{UV}D).

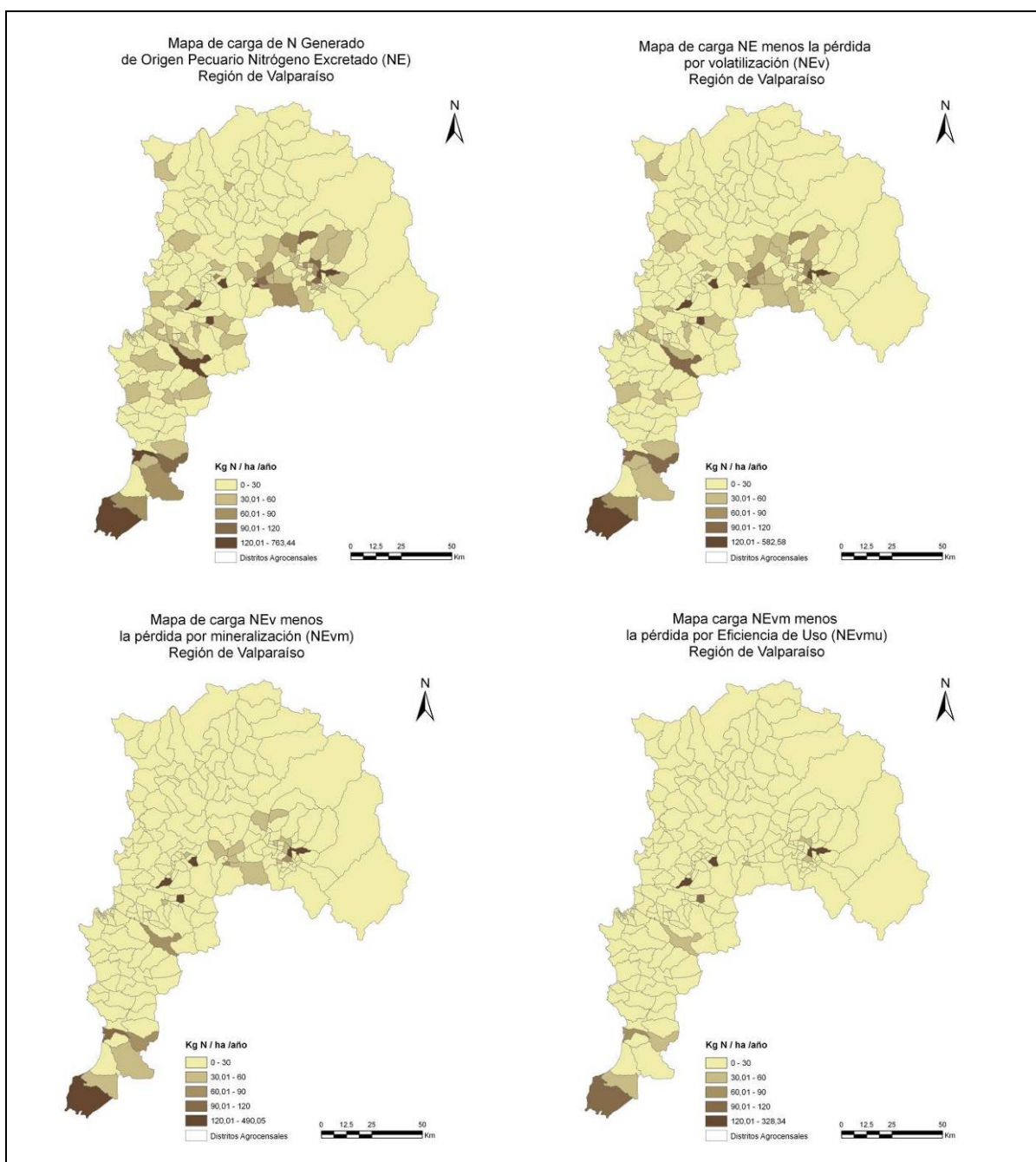


Figura 3.8. Mapas temáticos de carga pecuaria para la región de Valparaíso: a) Mapa del nitrógeno generado por distrito o Nitrógeno Excretado (NE); b) Mapa del nitrógeno generado considerando las pérdidas por volatilización (NE_v); c) Mapa del nitrógeno excretado considerando además las pérdidas por no-mineralización (NE_{vm}); d) Mapa considerando también la absorción o eficacia de uso (NE_{vmu}).

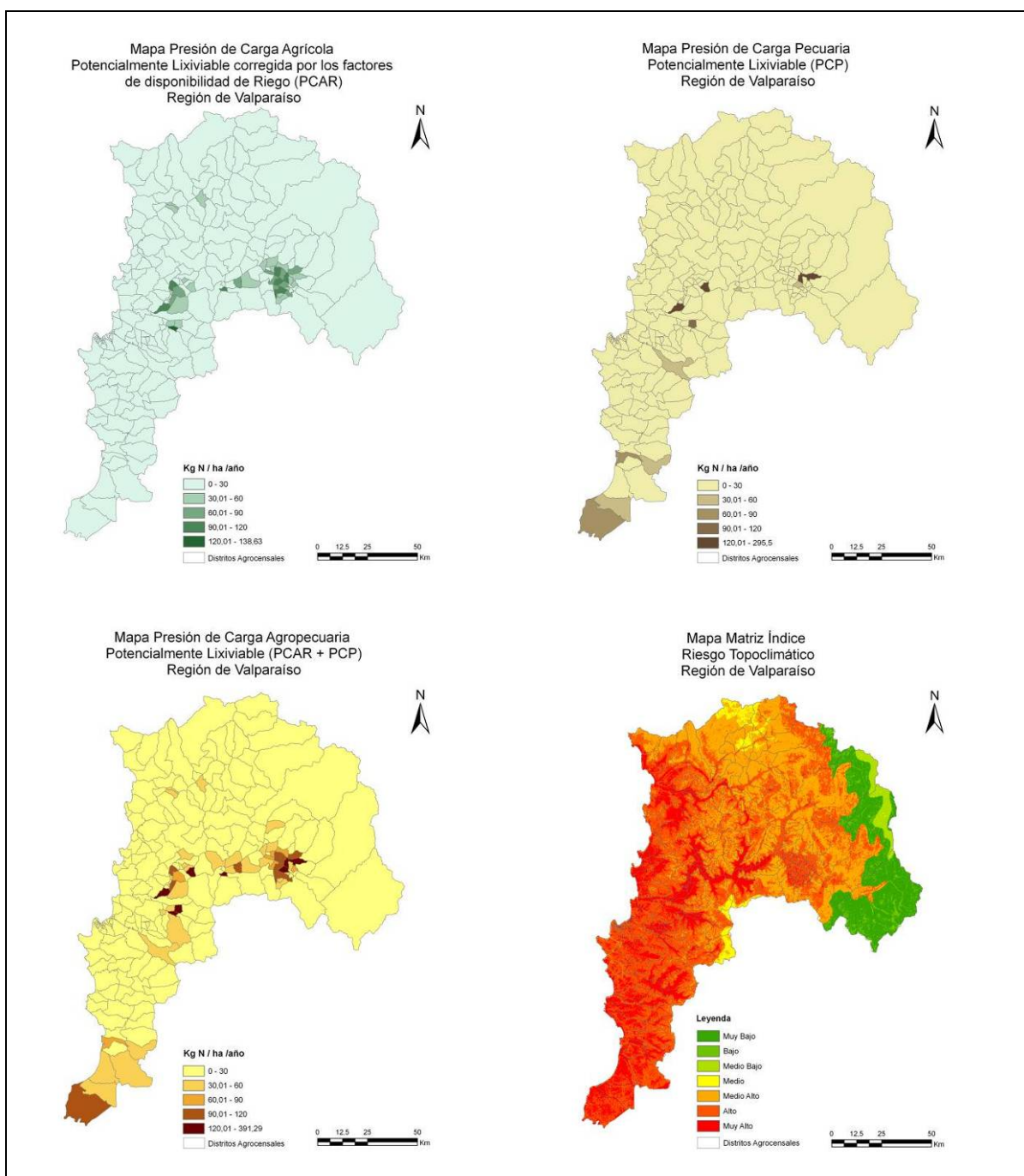


Figura 3.9. Mapas región de Valparaíso: a) Presión de carga agrícola potencialmente lixiviable corregida por los factores de disponibilidad de riego (PCAR), b) Presión de carga potencialmente lixiviable que considera también las pérdidas por desnitrificación (NE_{VMUD} o PCP), c) Presión de carga agropecuaria potencialmente lixiviable (PCAP), d) Mapa Índice de riesgo obtenido de la matriz topoclimática.

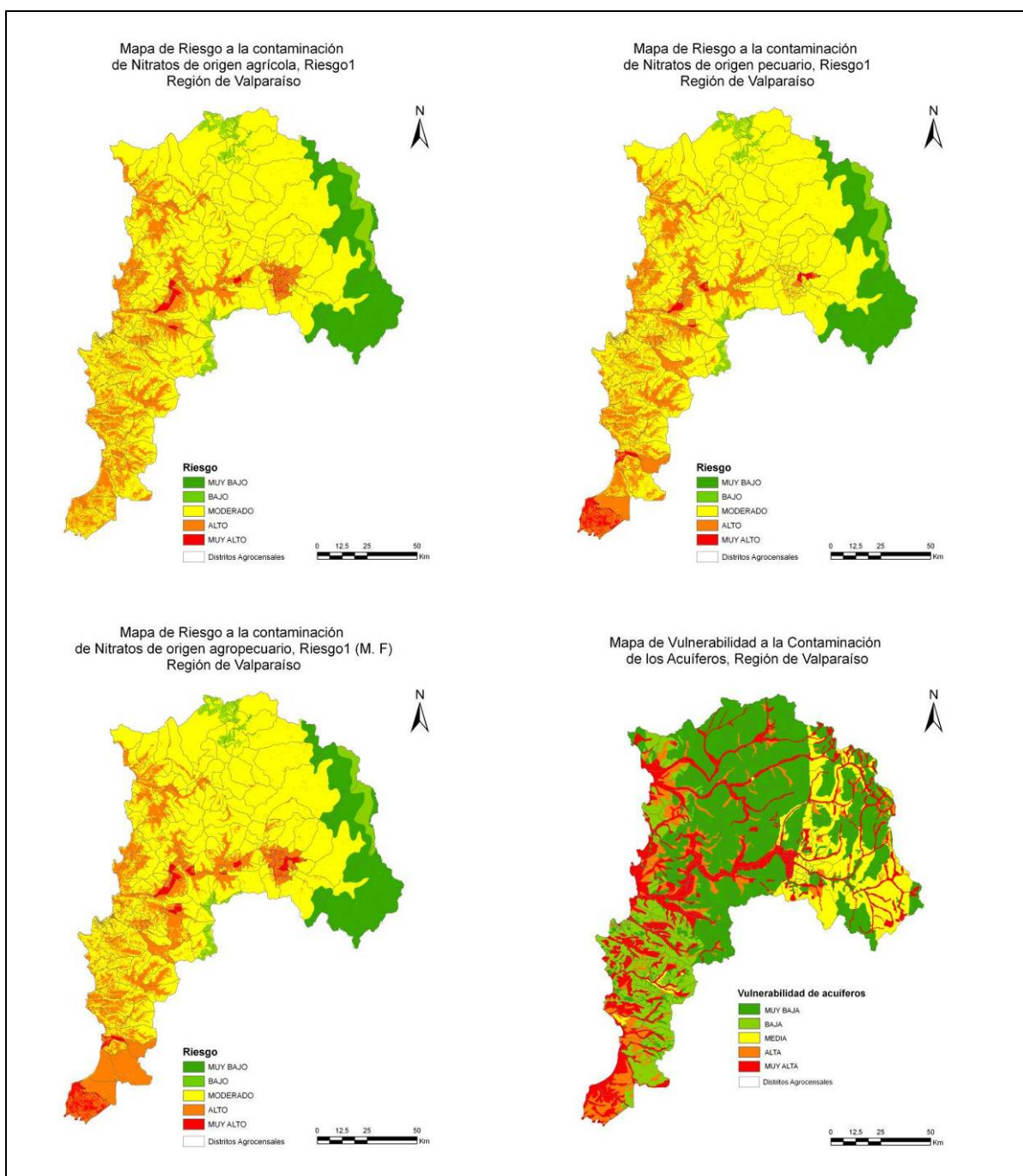


Figura 3.10. Mapas temáticos para la región de Valparaíso: a) Mapa de Riesgo 1 a partir de la carga agrícola, b) Mapa de Riesgo 1 a partir de la carga pecuaria, c) Mapa de Riesgo 1 a partir de la carga agropecuaria, d) Mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

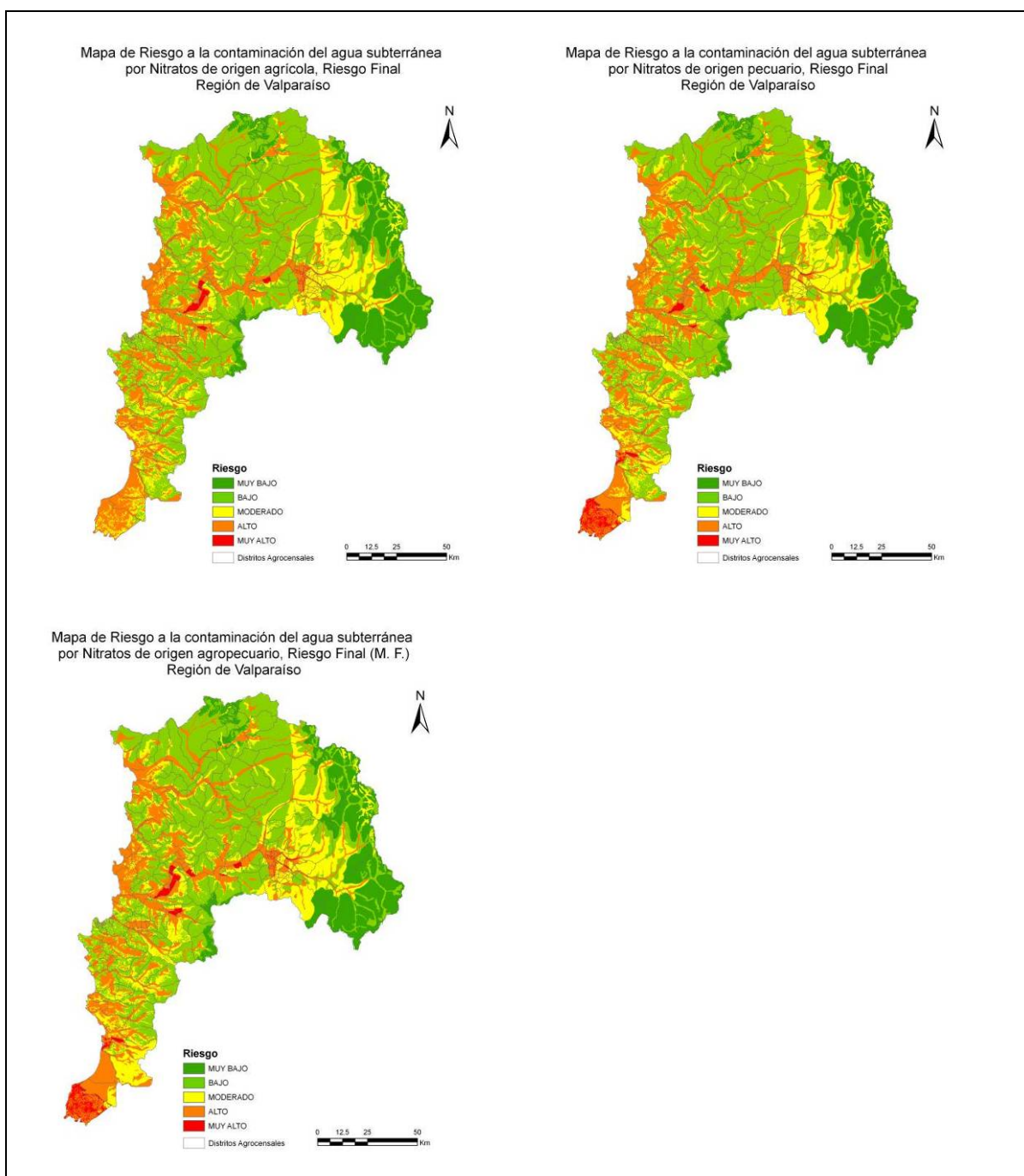


Figura 3.11. Mapas Finales de riesgo de acumulación de nitratos en aguas subterráneas por nitrógeno para la región de Valparaíso: a) Mapa Final de riesgo por nitrógeno de origen agrícola, b) Mapa Final de riesgo por nitrógeno de origen pecuario, c) Mapa Final de riesgo por nitrógeno de origen agropecuario.

3.4 Aplicación a la Región Metropolitana

Para la obtención del mapa Final de riesgo de aumento de concentración de nitrógeno de origen agropecuario en la región Metropolitana se han seguido los mismos pasos metodológicos que para las regiones del Bío Bío y de Valparaíso. Por lo tanto, a continuación se presentan también solamente los mapas finales y temáticos que se han ido obteniendo y/o utilizando en la aplicación de la guía en esta región (Figura 3.12, Figura 3.13, Figura 3.14, Figura 3.15 y Figura 3.16). Además, en la Tabla 3.3 se presenta la reclasificación de los 10 rangos de vulnerabilidad intrínseca de los mapas del SERNAGEOMIN a los nuevos 5 rangos para esta metodología.

Tabla 3.3. Reclasificación de los rangos de vulnerabilidad intrínseca del mapa del SERNAGEOMIN de la región Metropolitana. DNC: Depósitos no consolidados. R: Rocas.

GOD Región Metropolitana	Rangos vulnerabilidad considerados para esta metodología
Muy Alta (DNC)	MUY ALTA
Alta (DNC)	
Moderada a Alta (rm) (DNC)	ALTA
Moderada a Alta (4rio) (R)	
Moderada (DNC)	MODERADA
Moderada a Baja (R)	
Baja a moderada (R)	BAJA
Baja (DNC)	
Muy Baja (DNC)	MUY BAJA
Baja a Nula (R)	

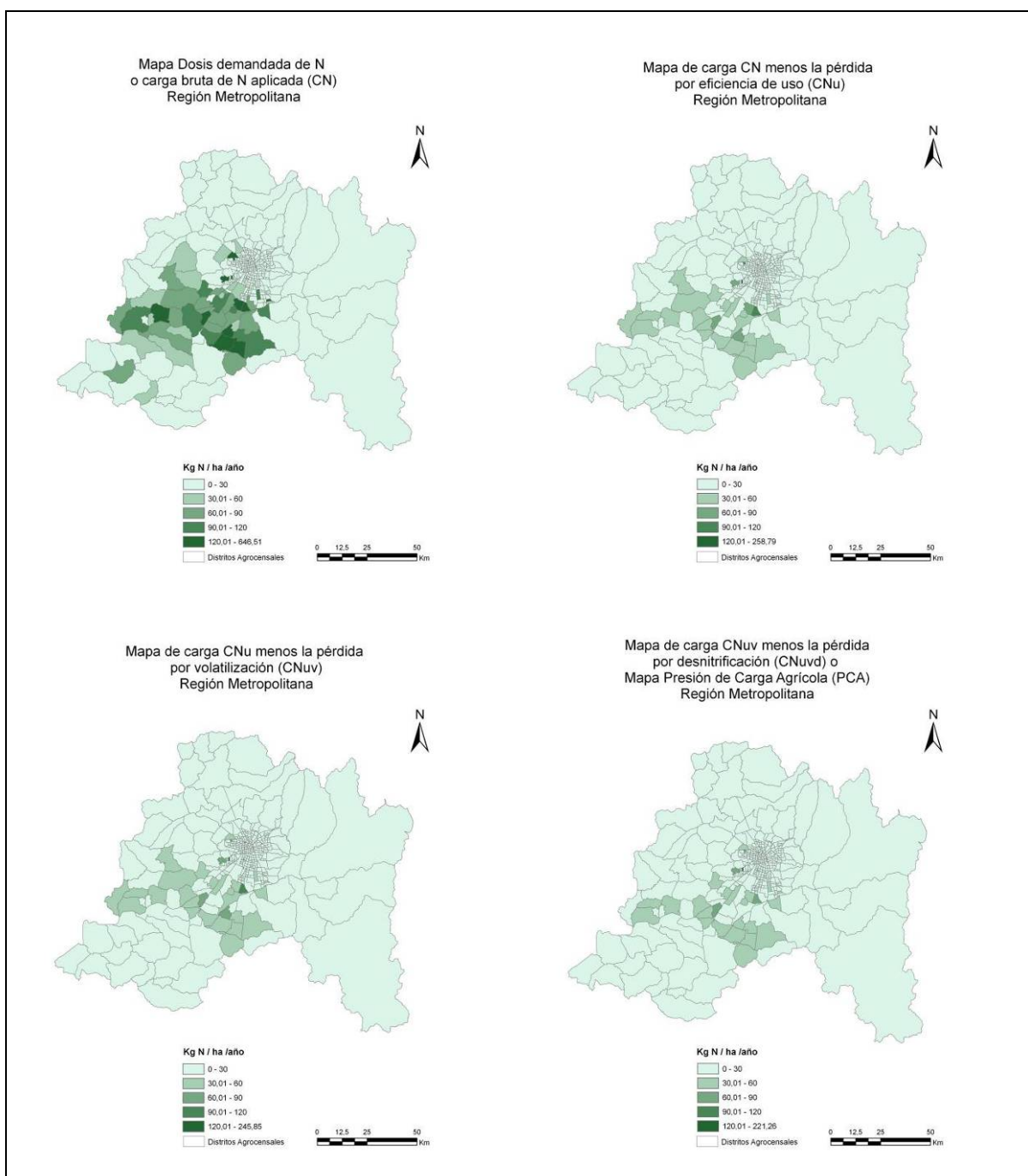


Figura 3.12. Mapas temáticos de carga agrícola para la región Metropolitana: a) Mapa de Carga Bruta de Nitrógeno Aplicada (CN); b) Mapa de carga de N considerando la eficiencia de uso (CNu); c) Mapa de carga de N considerando también la volatilización (CN_{UV}); d) Mapa de carga de N considerando además la desnitrificación (CN_{UVD}).

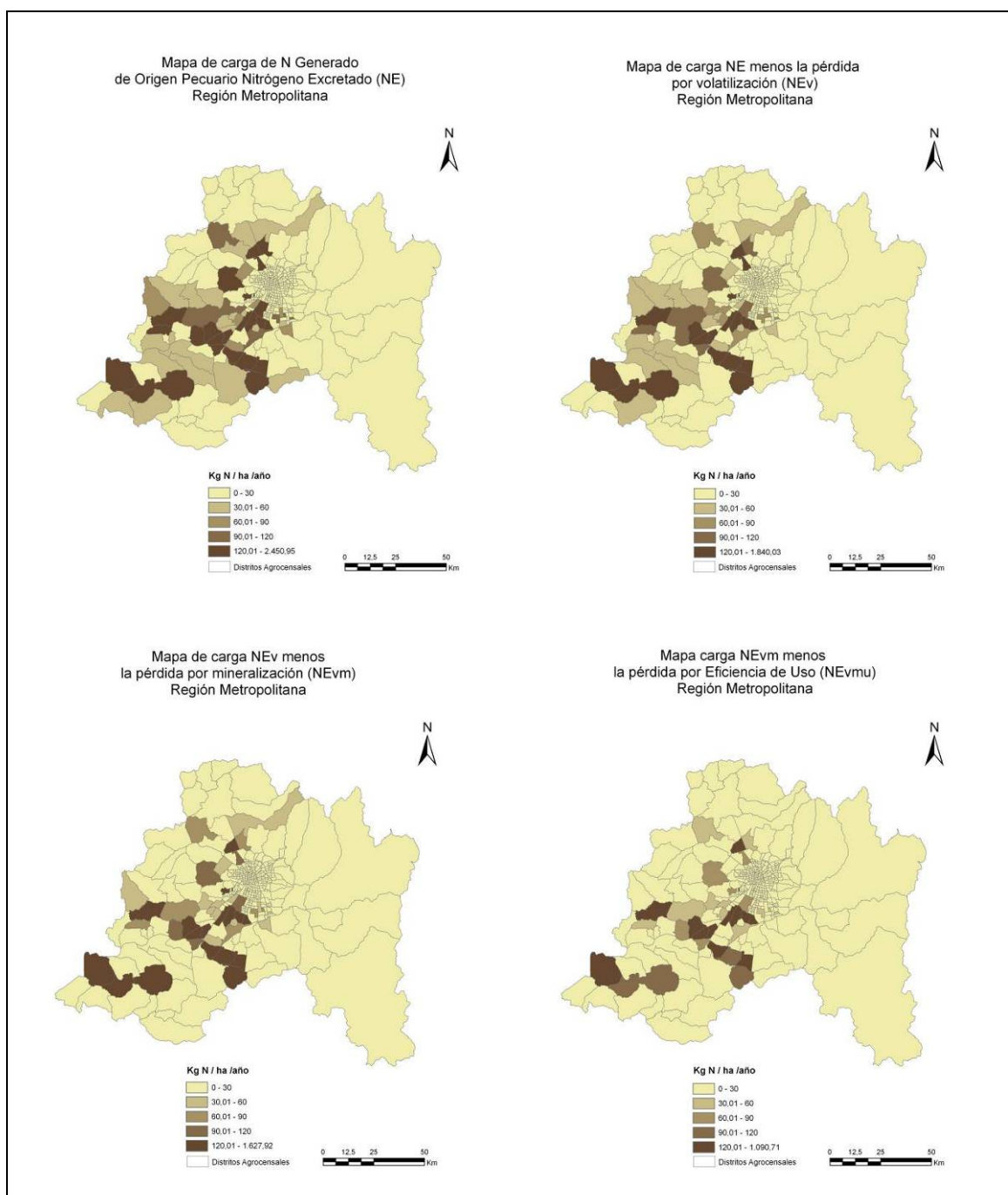


Figura 3.13. Mapas temáticos pecuarios para la región Metropolitana: a) Mapa del nitrógeno generado por distrito o Nitrógeno Excretado (NE); b) Mapa del nitrógeno generado considerando las pérdidas por volatilización (NE_v); c) Mapa del nitrógeno excretado considerando además las pérdidas por no-mineralización (NE_{vm}); d) Mapa considerando también la absorción o eficacia de uso (NE_{vmu}).

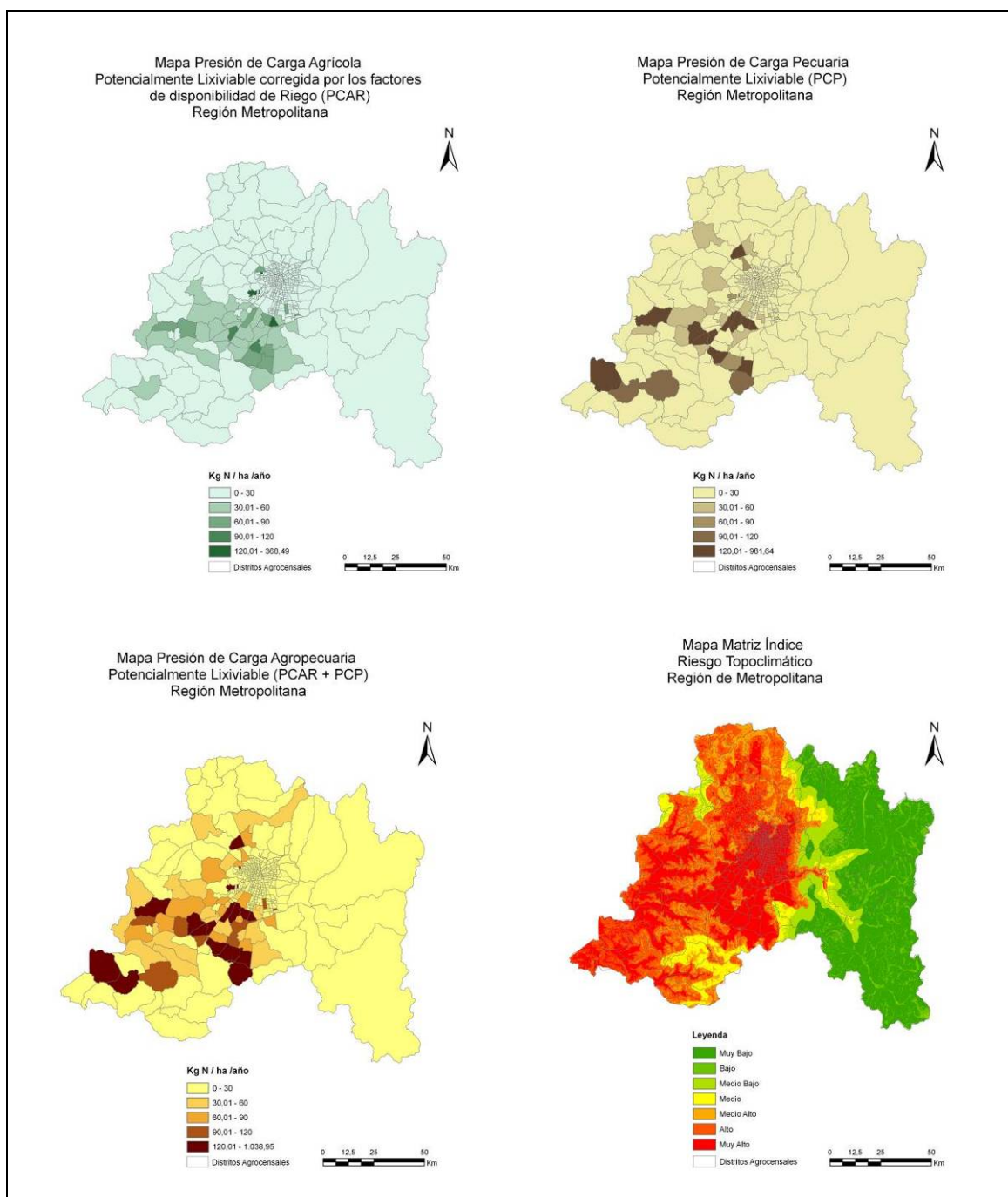


Figura 3.14. Mapas región Metropolitana: a) Presión de carga agrícola potencialmente lixiviable corregida por los factores de disponibilidad de riego (PCAR), b) Presión de carga potencialmente lixiviable que considera también las pérdidas por desnitrificación (NE_{VMUD} o PCP), c) Presión de carga agropecuaria potencialmente lixiviable (PCAP), d) Mapa Índice de riesgo obtenido de la matriz topoclimática.

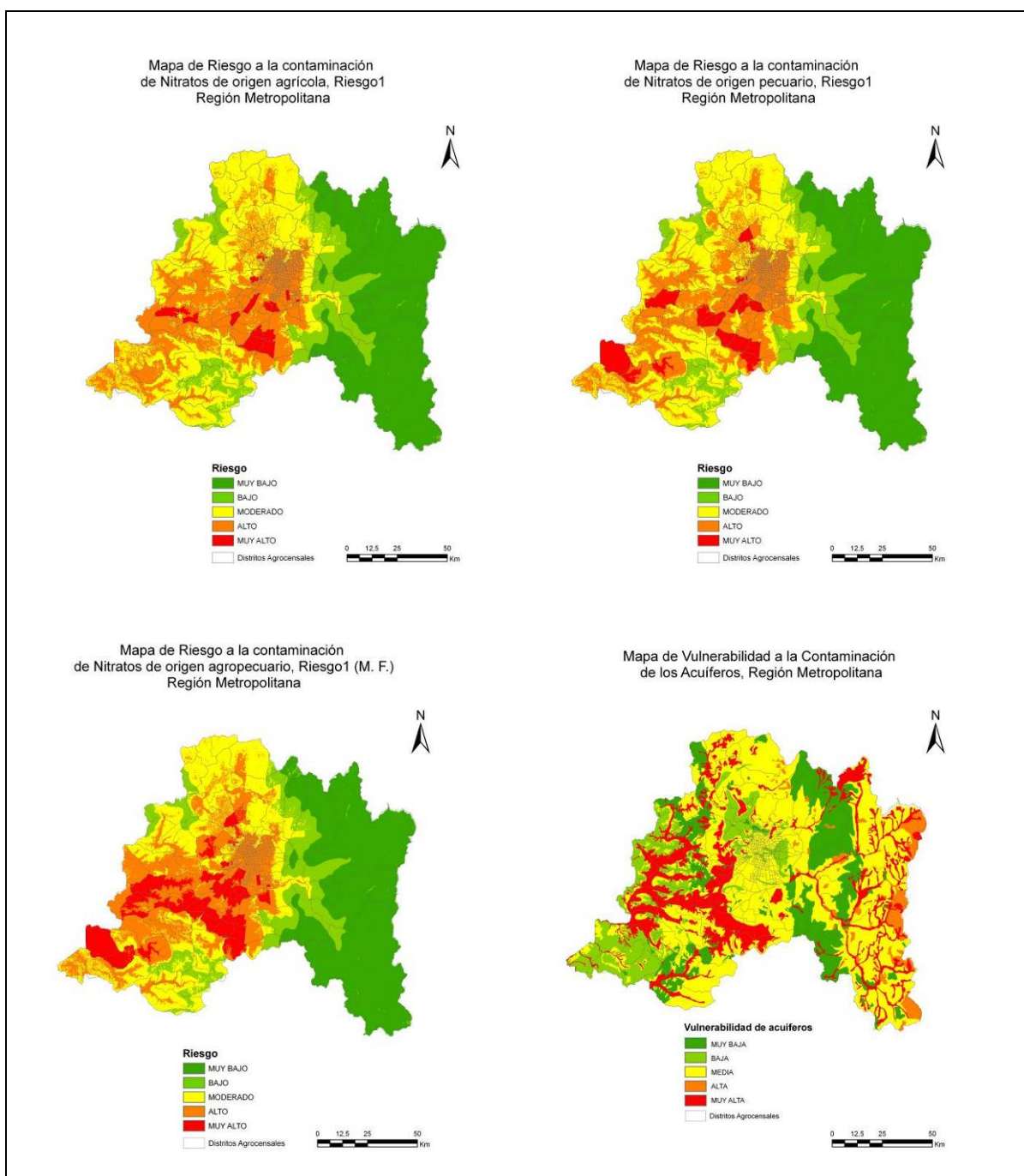


Figura 3.15. Mapas temáticos para la región Metropolitana: a) Mapa de Riesgo 1 a partir de la carga agrícola, b) Mapa de Riesgo 1 a partir de la carga pecuaria, c) Mapa de Riesgo 1 a partir de la carga agropecuaria, d) Mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

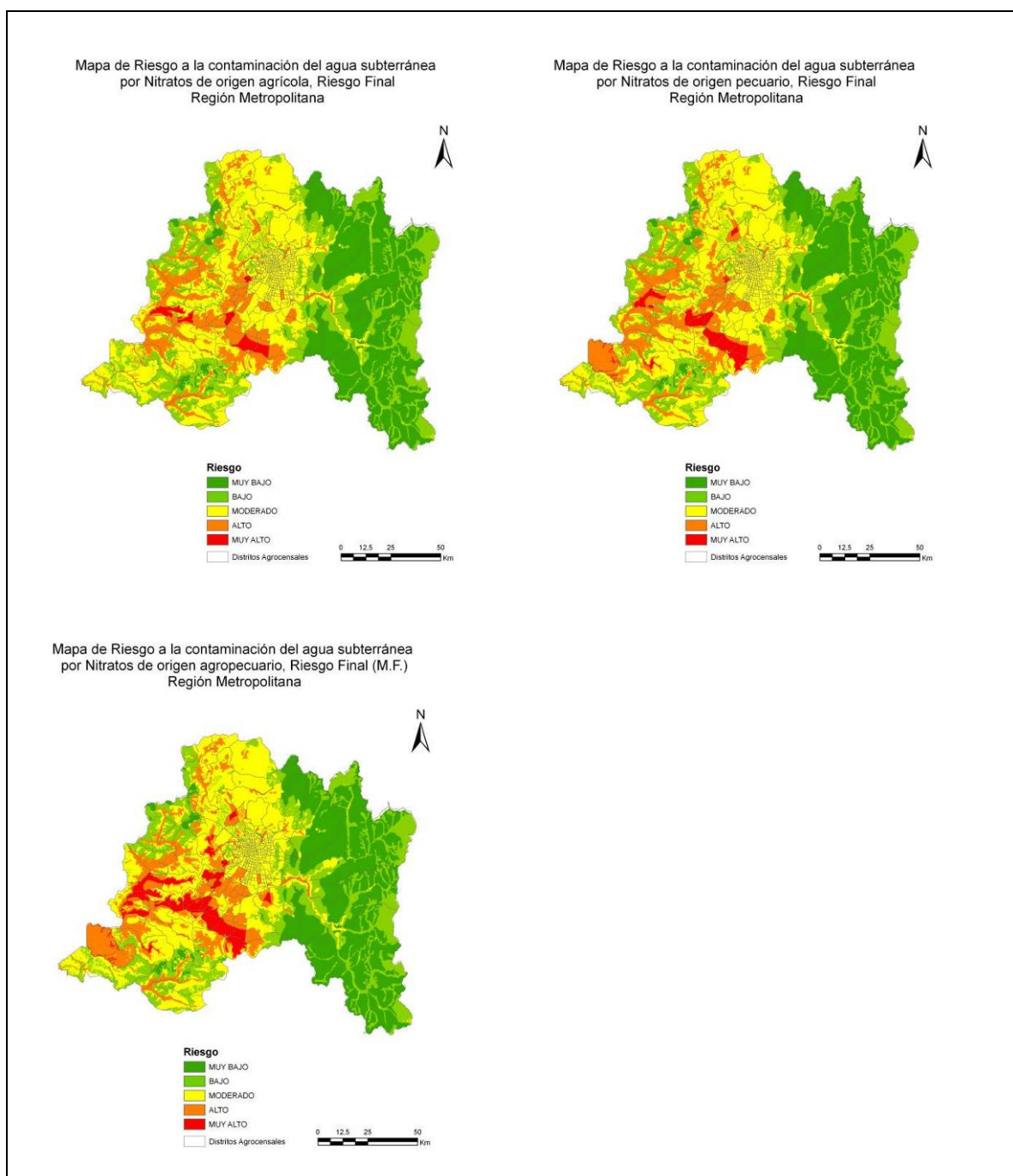


Figura 3.16. Mapas Finales de riesgo de aumento de concentración en las aguas subterráneas por nitrógeno para la región Metropolitana: a) Mapa Final de riesgo por nitrógeno de origen agrícola, b) Mapa Final de riesgo por nitrógeno de origen pecuario, c) Mapa Final de riesgo por nitrógeno de origen agropecuario.

3.5 Ejemplo para la Región del Bío Bío de inclusión de la variable suelo

Durante el desarrollo de la metodología se estimó que no debía considerarse la variable suelo en el cálculo de la matriz topoclimática porque la información digital de este parámetro confeccionada por CIREN no abarcaba toda la superficie de cada una de las regiones en estudio. Su aplicación produciría vacíos de información territorial y una visión sesgada del panorama de riesgo general a una escala regional, objetivo importante del estudio. Existirían áreas en una misma región con distintos cálculos de riesgo y por lo tanto no comparables entre ellas. Por otro lado además, se consideró que los mapas de vulnerabilidad del SERNAGEOMIN utilizados en la metodología contemplan ya esta variable. Así la metodología diseñada se validó solamente para el uso de una matriz topoclimática, y no edafotopoclimática, que involucra sólo las variables de pendiente y precipitación.

De todas formas la metodología diseñada contempla la posibilidad de utilizar la variable de suelo por lo que en este apartado se muestra un ejemplo para la Región del Bío Bío de aplicación de la metodología con la inclusión de la variable suelo, que conlleva la obtención de un nuevo mapa de la matriz, ahora edafotopoclimática, un nuevo mapa de riesgo de acumulación de nitratos (Riesgo 1) y un nuevo mapa de riesgo al aumento de la concentración de nitratos en agua subterráneas (Riesgo Final).

La metodología considera utilizar la variable textura de suelo, dividida en los mismos siete rangos de Muy Fina, Moderadamente Fina, Media, Moderadamente Gruesa, Gruesa y Muy Gruesa que utiliza la clasificación de CIREN basada en el triángulo textural del Departamento de Agricultura de Estados Unidos. Los siete riesgos asociados a estas siete texturas, van desde Muy Bajo para la textura Muy Fina a un riesgo Muy Alto para la textura Muy Gruesa. Para este ejemplo, la Figura 3.17a, muestra el mapa de texturas de suelo utilizado, confeccionado por CIREN, y que da cuenta del área en blanco que no tiene información de esta variable.

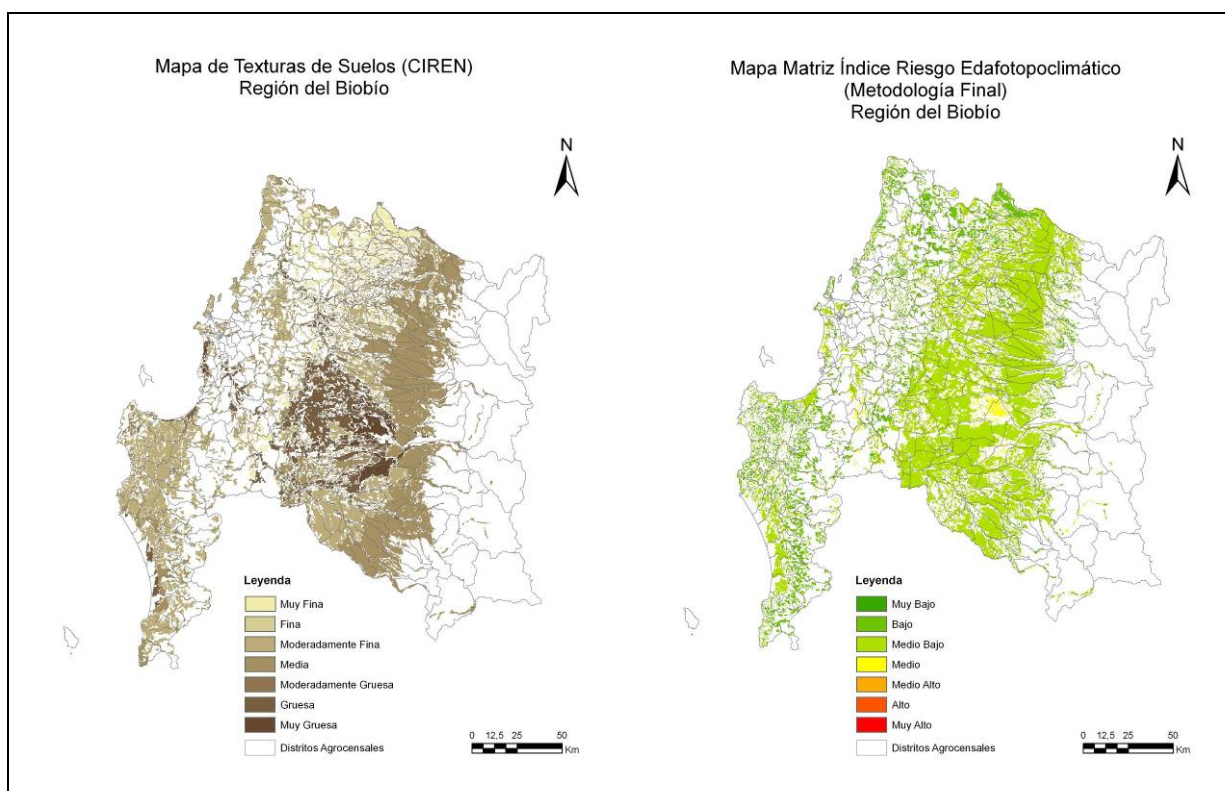


Figura 3.17. a) Mapa Textura de Suelos

b) Mapa Matriz Edafotopoclimática

Con este mapa de suelo se ha calculado la matriz edafotopoclimática (Figura 3.17b) que corresponde a la suma ponderada de la precipitación con un peso del 60% y de la pendiente y el suelo, ambas variables con un mismo peso del 20%.

Como muestra la figura las áreas sin información de suelo siguen sin poder tener información del índice de riesgo de esta matriz edafotopoclimática y siguen en blanco, como ocurrirá con los mapas de Riesgo 1 y Riesgo Final. Efectivamente en las Figura 3.18a y Figura 3.18b que muestran estos dos mapas para los nitratos de origen agropecuario en la Región del Bío Bío, se aprecia la gran extensión de territorio en que no se pueden calcular los valores de riesgo por no disponer de la información de suelo. Por lo tanto, teniendo en cuenta la espacialidad de esta variable se podría considerar su aplicación a una escala local en donde esté completamente distribuida en el área y así poder comparar entre distintos sectores.

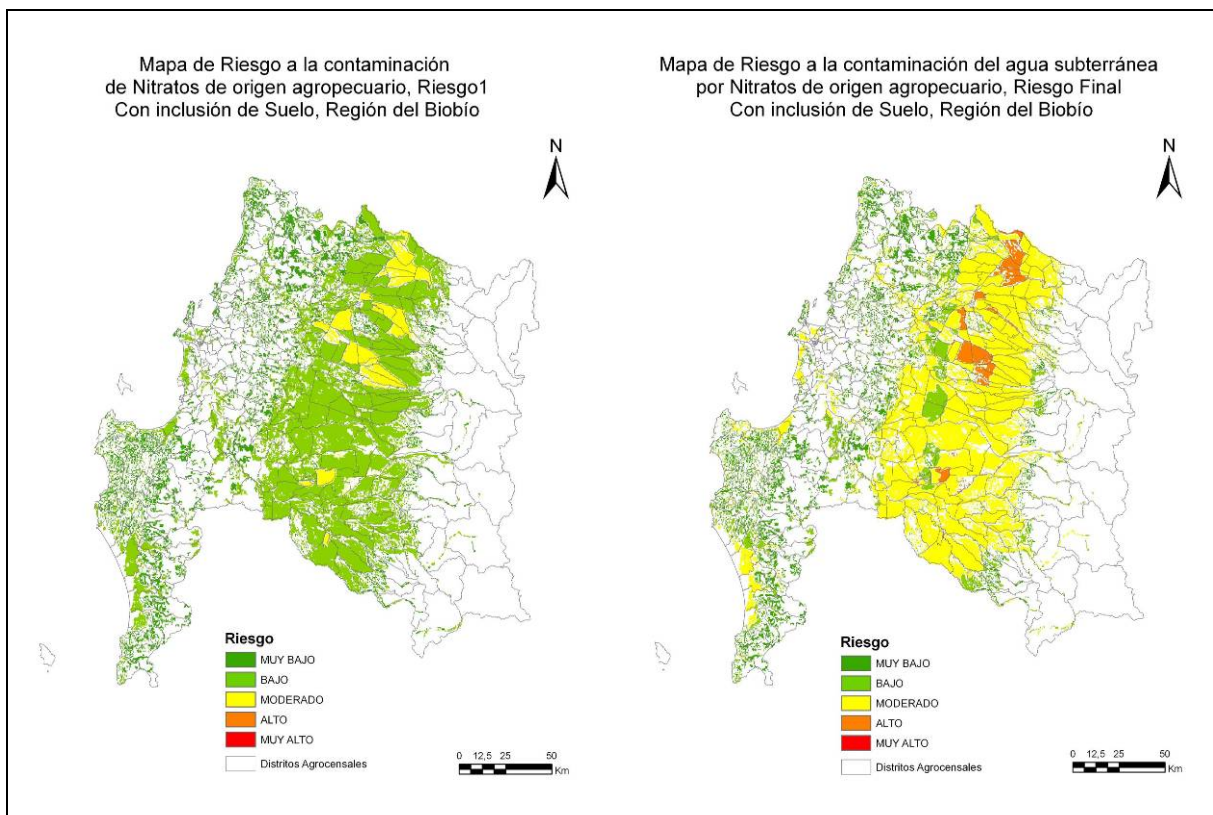


Figura 3.18. a) Mapa Riesgo 1

b) Mapa Riesgo Final

En este sentido, para poder realizar una comparación del cálculo de riesgos con y sin la inclusión de la variable suelo, en este ejemplo se muestra el detalle del área de pozos muestreados de la Región del Bío Bío: en la Figura 3.20 se observa el mapa de Riesgo Final sin la inclusión de suelo de modo que, éste cubre completamente el área de toda la región; la Figura 3.19 muestra el mapa de Riesgo Final con la inclusión de suelo cubriendo por lo tanto solamente la superficie que provenía del mapa de suelo.

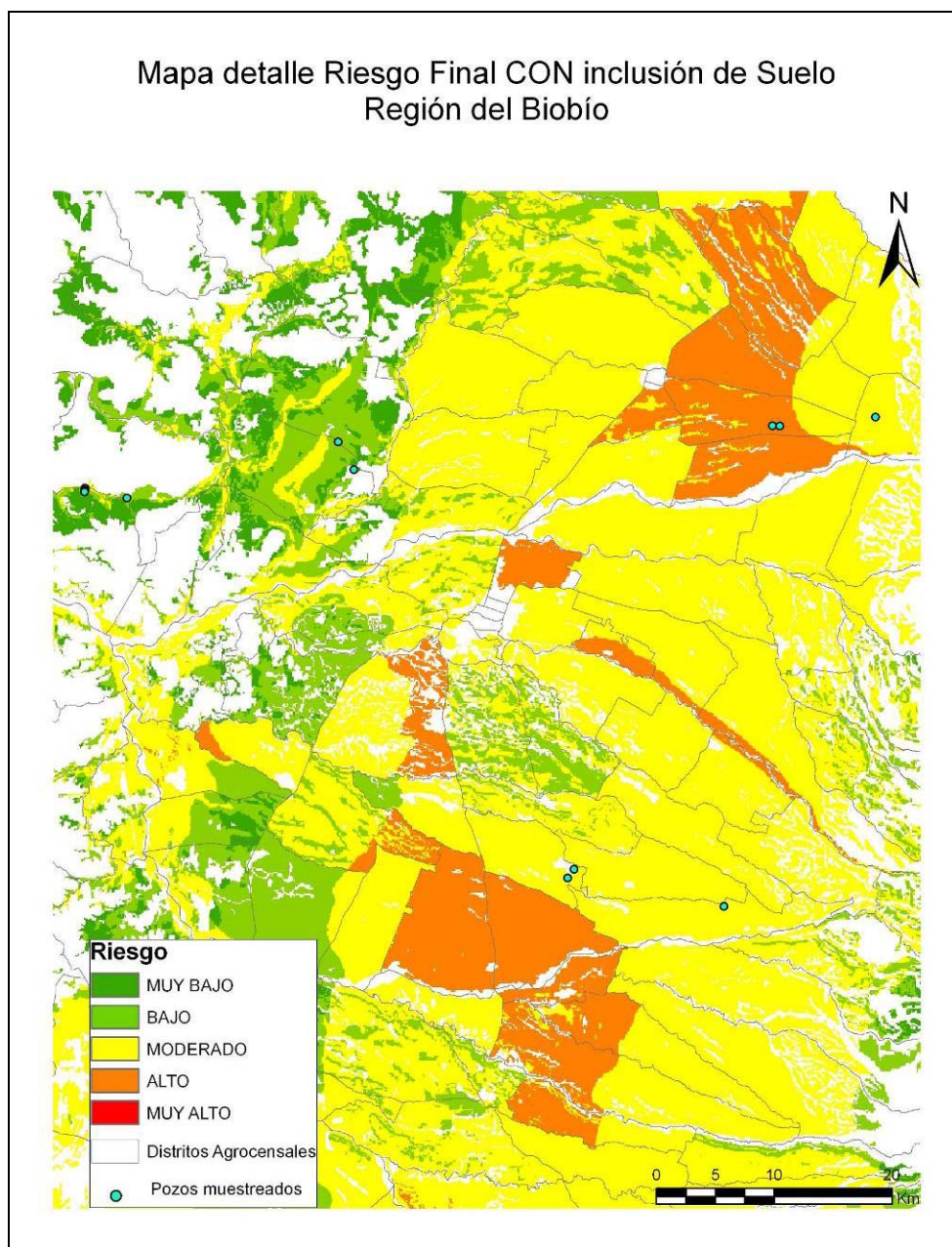


Figura 3.19. Mapa Riesgo Final, con variable suelo.

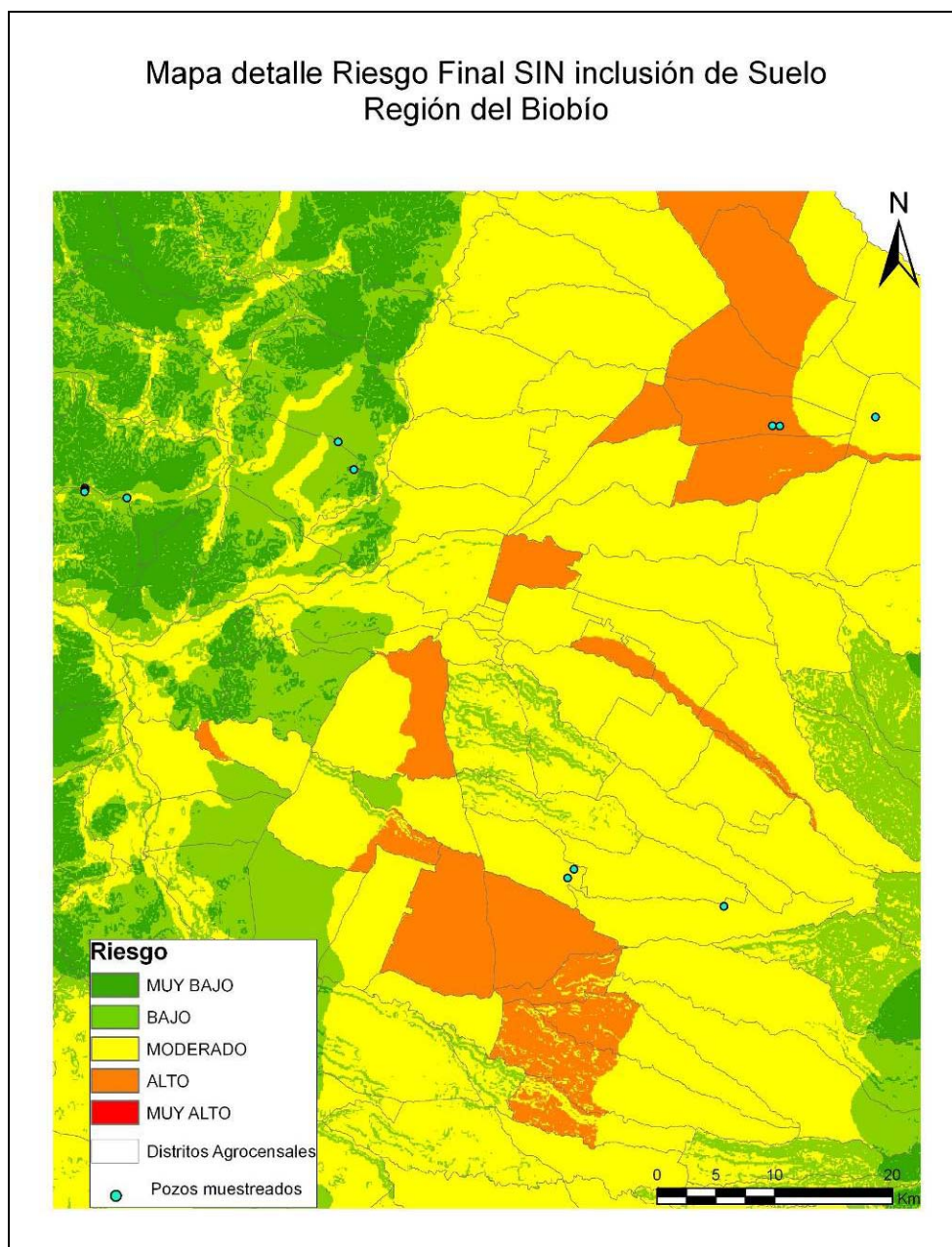


Figura 3.20. Mapa Riesgo Final, sin variable suelo.

Comparando ambos mapas se puede observar que las áreas de riesgo, evaluadas en ambas metodologías, no presentan cambios significativos; conservan a grandes rasgos las mismas superficies, lo que se observa claramente en las zonas de riesgo alto (color naranja) observando los mismos sectores, lo mismo sucede con las demás zonas de riesgo.

El hecho que la vulnerabilidad a la acumulación de un elemento en los acuíferos, sea utilizada como el último factor que se cruza con el riesgo al aumento en la concentración de dicho compuesto (Riesgo 1), determina, en gran parte, que el Riesgo Final en ambos casos, sin y con suelo, presenten las mismas áreas de riesgo. Además también que los sectores de riesgo se mantengan en las mismas áreas, con las dos metodologías, se explica por el hecho que el factor suelo se encuentra relacionado con los factores geográficos (pendiente y vulnerabilidad del acuífero) que se conjugan en la metodología para calcular el riesgo a un determinado contaminante del agua subterránea.

Por un lado, existe una correlación entre varios elementos geográficos que determinan y explican las áreas con distintas texturas de suelo. En zonas de alta pendiente topográfica, los cursos fluviales, principalmente torrentes de montaña, tienen gran poder de arrastre de materiales y los sedimentos más finos no pueden decantar y comenzar procesos de sedimentación, también en áreas de alta pendiente puede producirse una mayor erosión y arrastre de materiales que tampoco permiten el desarrollo de un suelo. Así en estos sectores existen suelos de texturas moderadas a gruesas, existe un bajo desarrollo de suelos.

La cara opuesta se da cuando en zonas de bajas pendientes topográficas, los cursos de agua pierden velocidad y capacidad de arrastre, los ríos divagan y los sedimentos finos decantan y comienzan a depositarse. Estos procesos a escala geológica forman terrazas fluviales en las que se facilita la formación de suelo. Este proceso ha sucedido en el valle longitudinal de Chile en que los ríos han depositado sus sedimentos en estos depósitos fluviales, aluviales y coluviales, en donde se desarrolla la mayoría de las actividades agropecuarias en la zona centro-sur de Chile.

Por otro lado, los mapas de vulnerabilidad a la contaminación de los acuíferos diferencian vulnerabilidad en roca y en depósitos no consolidados, estos últimos ocupando casi la totalidad de la superficie del valle longitudinal, casi la misma superficie que la información de

suelo, y los lechos de los cursos de aguas superficiales (sin información de suelo). Esto quiere decir que también va implícita, de alguna manera, información de suelo en la distinción vulnerabilidad en roca y en depósitos no consolidados. En el cálculo de la vulnerabilidad a un determinado contaminante de los acuíferos la metodología BGR utilizada considera además, el espesor de la zona no saturada, la permeabilidad del suelo y la tasa de percolación que están en directa relación con la textura del suelo y la capacidad de infiltración. Esto significa que este mapa ya utiliza información de suelo en su cálculo de vulnerabilidad, de modo que la inclusión de la textura de suelo sólo revaloriza aún más esta variable.

A modo de conclusión se puede decir que los elementos geográficos de vulnerabilidad del acuífero, pendiente topográfica, presencia de suelo y su textura, y escurrimiento superficial, están íntimamente relacionados. De este modo, el factor suelo está implícitamente en más de una variable considerada en la metodología validada, por lo que no se han observado diferencias significativas en los mapas obtenidos con el uso o no de esta variable. Por lo tanto, la inclusión de la variable suelo no se hace imprescindible en la metodología diseñada y no se piensa necesario realizar ninguna validación con la inclusión de la misma.