

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

INFORME FINAL

CAPÍTULO 4 – GUÍA METODOLÓGICA

CONTENIDO	Página
1 INTRODUCCIÓN	91
2 INSTRUCCIONES GENERALES	92
3 DETERMINACIÓN DE LA CARGA BRUTA	98
3.1 CARGA BRUTA DE ORIGEN AGRÍCOLA _____	98
3.1.1 Variables utilizadas _____	98
3.1.2 Cálculo de la Carga Bruta de nitrógeno de origen agrícola por distrito _____	103
3.2 CARGA BRUTA DE ORIGEN PECUARIO _____	104
3.2.1 Variables utilizadas _____	105
3.2.2 Cálculo de la Carga Bruta Pecuaria generada por distrito _____	106
4 DETERMINACIÓN DE LA CARGA POTENCIALMENTE LIXIVIALE	108
4.1 CORRECCIÓN POR FACTORES DE BALANCE DE N EN EL SUELO _____	108
4.1.1 Variables utilizadas _____	108
4.1.2 Cálculo de la carga agrícola potencialmente lixiviable _____	112
4.1.3 Cálculo de la carga pecuaria potencialmente lixiviable _____	113
4.2 CORRECCIÓN POR DISPONIBILIDAD DE RIEGO _____	116
4.2.1 Variables utilizadas _____	117
4.2.2 Cálculo de carga agrícola potencialmente lixiviable corregida _____	119

5	DETERMINACIÓN DE LOS MAPAS DE RIESGO 1	121
5.1	CARGAS AGRÍCOLA, PECUARIA, AGROPECUARIA Y SU VALORACIÓN EN 5 RANGOS _____	121
5.2	VARIABLES UTILIZADAS EN EL FACTOR EDAFOTOPOCLIMÁTICO _____	122
5.3	CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DE LA MATRIZ EDAFOTOPOCLIMÁTICA _____	125
5.4	CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DEL MAPA DE RIESGO 1 _____	128
6	DETERMINACIÓN DE LOS MAPAS FINALES DE RIESGO	131
6.1	VALORACIÓN DE LOS MAPAS DE VULNERABILIDAD INTRÍNSECA _____	131
6.2	CÁLCULOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS MAPAS FINALES DE RIESGO _____	131
7	GLOSARIO DE TÉRMINOS	134

1 INTRODUCCIÓN

Este Capítulo presenta una guía metodológica propuesta para la determinación de las áreas de riesgo de acumulación de nitrato en aguas subterráneas por nitrógeno de origen agropecuario. Esta guía pretende ser aplicada a nivel regional, y contribuir de esta manera al manejo sustentable de fuentes nitrogenadas aplicadas al suelo.

El objetivo general del estudio ha sido elaborar esta metodología considerando como variables y líneas básicas para su diseño y desarrollo, las bases de datos e información disponible en los distintos organismos del país, así como también los antecedentes adicionales que pueden obtenerse en el futuro. Además, está diseñada para ser implementada dentro una herramienta SIG, cuyas ventajas son una mayor versatilidad en el manejo de la información, en la elaboración de mapas y en la representación gráfica de los resultados. Esta guía entrega por lo tanto, un procedimiento estandarizado que puede ser reproducido por cualquier organismo, empresa o persona.

Como esquema general, la evaluación del riesgo a la acumulación de nitratos, se determina a partir de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de un acuífero, junto con la presión de la carga de nitrógeno, teniendo en cuenta su origen (agrícola o pecuario), su ciclo en el suelo y algunas condiciones de riego, clima y topografía del área.

El cálculo de la vulnerabilidad intrínseca de acuífero se determina mediante el método BGR utilizado por el SERNAGEOMIN. En este sentido, estos cálculos no son incluidos en esta guía, por lo que, este informe se aboca fundamentalmente a describir la metodología para el cálculo del riesgo de acumulación de nitrógeno de origen agrícola y pecuario y su cálculo final de riesgo a la acumulación de nitratos teniendo en cuenta una vulnerabilidad del acuífero previamente definida.

La aplicación de esta metodología permite obtener para cada región o área de interés, un mapa general de riesgo al aumento de concentración de nitratos de las aguas subterráneas, considerando conjuntamente los nitratos de origen agrícola y ganadero, y dos mapas de riesgo considerando separadamente cada uno de estos dos orígenes de carga nitrogenada. Esto, con el fin de obtener mejores herramientas que permitan generar programas de ordenamiento territorial y de gestión, prevención y control de estas actividades.

2 INSTRUCCIONES GENERALES

Para el cálculo del riesgo a la acumulación de nitratos de origen agropecuario en aguas subterráneas esta metodología se basa, en primer lugar, en conocer la presión de carga bruta de nitrógeno de origen agrario y pecuario que existe en cada distrito de nuestro país (en Kg de N/ha/año). Estas cargas son corregidas por factores locales de balance de suelo, de disponibilidad de riego, de precipitación, pendiente y textura del suelo, obteniendo los primeros mapas de riesgo (en esta guía, denominados de Riesgo 1), uno de origen agrícola y otro de origen pecuario como se indica en la Figura 2.1.

Además, considerando conjuntamente (sumadas) las cargas potencialmente lixiviables de origen agrícola y pecuaria, se obtiene el Mapa general de riesgo 1 al aumento de concentración de nitratos de origen agropecuario. En estos mapas, las cargas son clasificadas en 5 rangos de muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo, y representan el riesgo a su acumulación, teniendo en cuenta solamente variables de "superficie", es decir no hidrogeológicas o del acuífero suprayacente.

Los mapas de riesgo 1 (por nitratos de origen agrícola, pecuario o agropecuario) son superpuestos a los de vulnerabilidad intrínseca del acuífero desarrollados por el SERNAGEOMIN mediante el método BGR, a los que, en algunos casos debe realizarse una reclasificación de los rangos de vulnerabilidad de manera de homogeneizar las clases consideradas a sólo 5 rangos. Los parámetros y factores que tiene en cuenta este método (capacidad de campo del suelo, la litología, granulometría y porosidad de la zona no saturada, la recarga del acuífero, la profundidad de las aguas subterráneas, etc.) son considerados adecuados para esta metodología.

Así, de esta superposición de la presión de carga y vulnerabilidad intrínseca, se obtienen los mapas finales de riesgo a la acumulación de nitratos a las aguas subterráneas, uno de origen agrícola, otro de origen pecuario y uno general de origen agropecuario. Los tres mapas muestran el riesgo valorizado en 5 rangos de muy alto, alto, medio, bajo y muy bajo.

El mapa final de riesgo a la acumulación de nitratos de origen agropecuario representa la superposición de los dos mapas anteriores, aunque su cálculo se realiza, como indica la Figura 2.1, por separado a partir de la suma de las cargas agrícola y pecuaria antes de

proceder a la corrección por los factores de pendiente, textura y precipitación y cruce con el mapa de vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

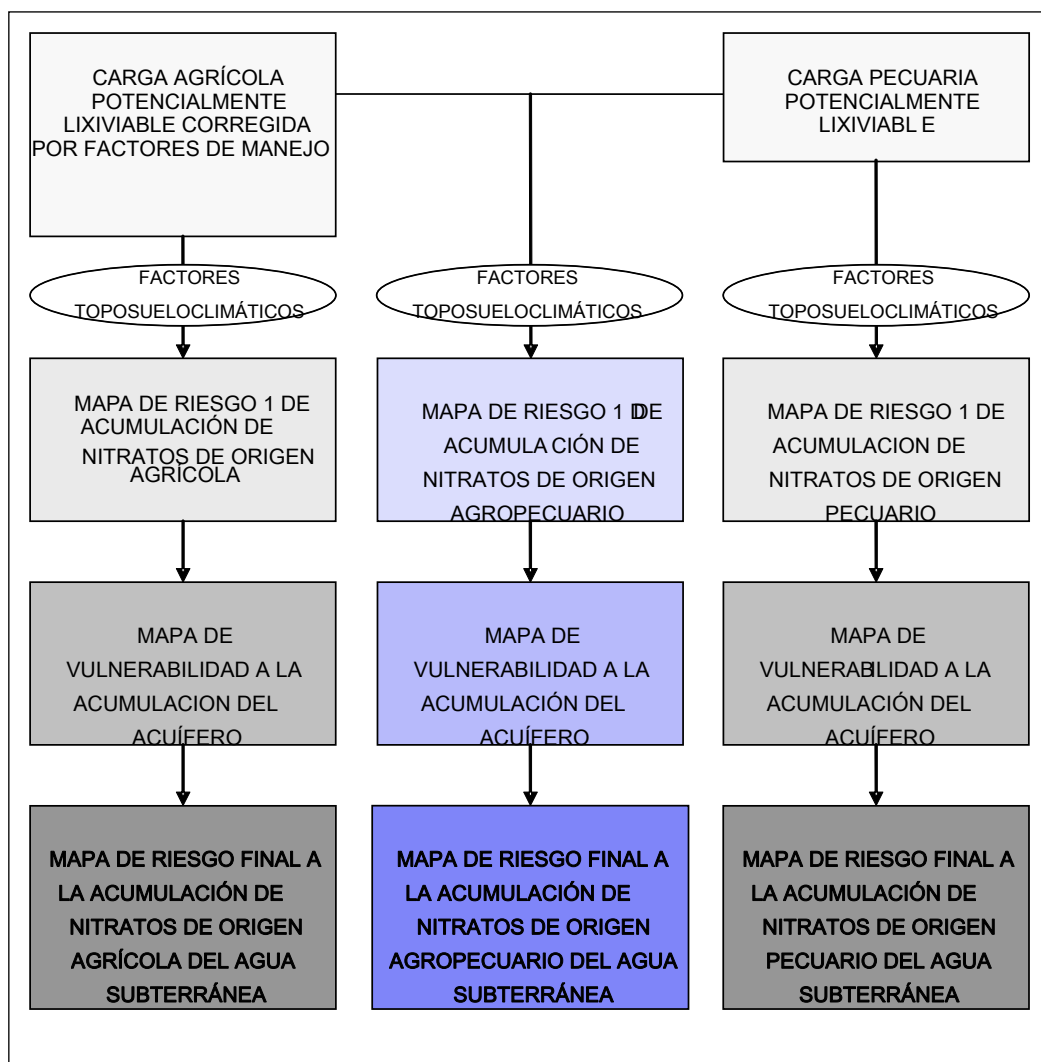


Figura 2.1. Esquema de los distintos mapas que se pueden obtener durante la ejecución de la metodología propuesta para el cálculo del riesgo a la acumulación de nitratos por nitratos en aguas subterráneas. Nótese que la metodología permite obtener mapas separados para los nitratos de origen agrícola, pecuario y de origen agropecuario.

Los detalles de las variables y cálculos necesarios para la elaboración de estos mapas se presentan en los siguientes apartados de esta guía. Sin embargo, a modo de facilitar el seguimiento de los procedimientos se muestran a continuación, en las Figura 2.2 y Figura

2.3, en forma esquemática, la metodología para el cálculo del riesgo 1 a la acumulación de nitratos de origen agrícola y pecuario, respectivamente.

PRESIÓN DE CARGA AGRÍCOLA

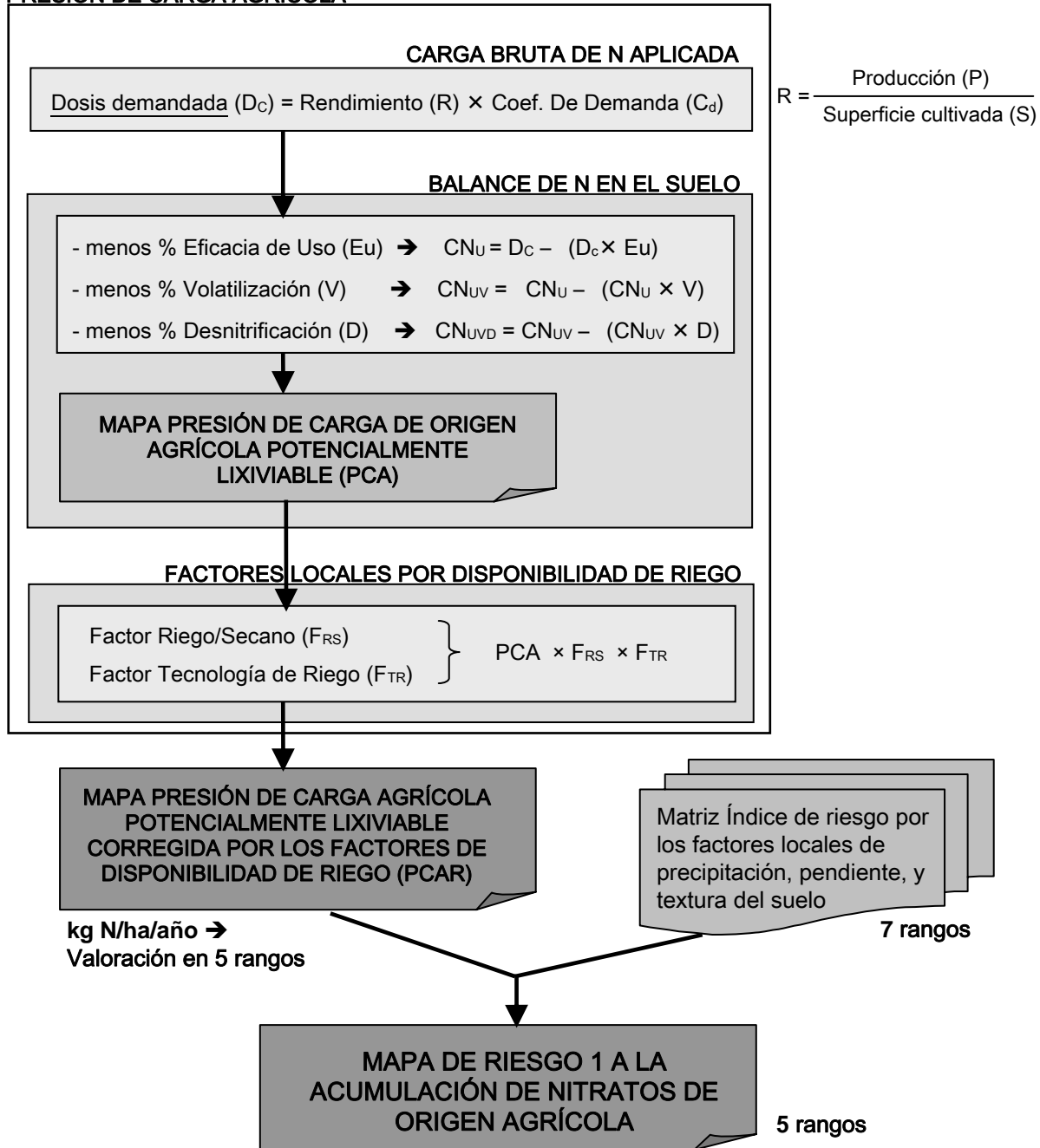


Figura 2.2. Esquema metodológico para el cálculo del mapa de Riesgo 1 a la acumulación de nitratos de origen agrícola. Las abreviaciones de la figura se encuentran en el glosario de términos de este capítulo.

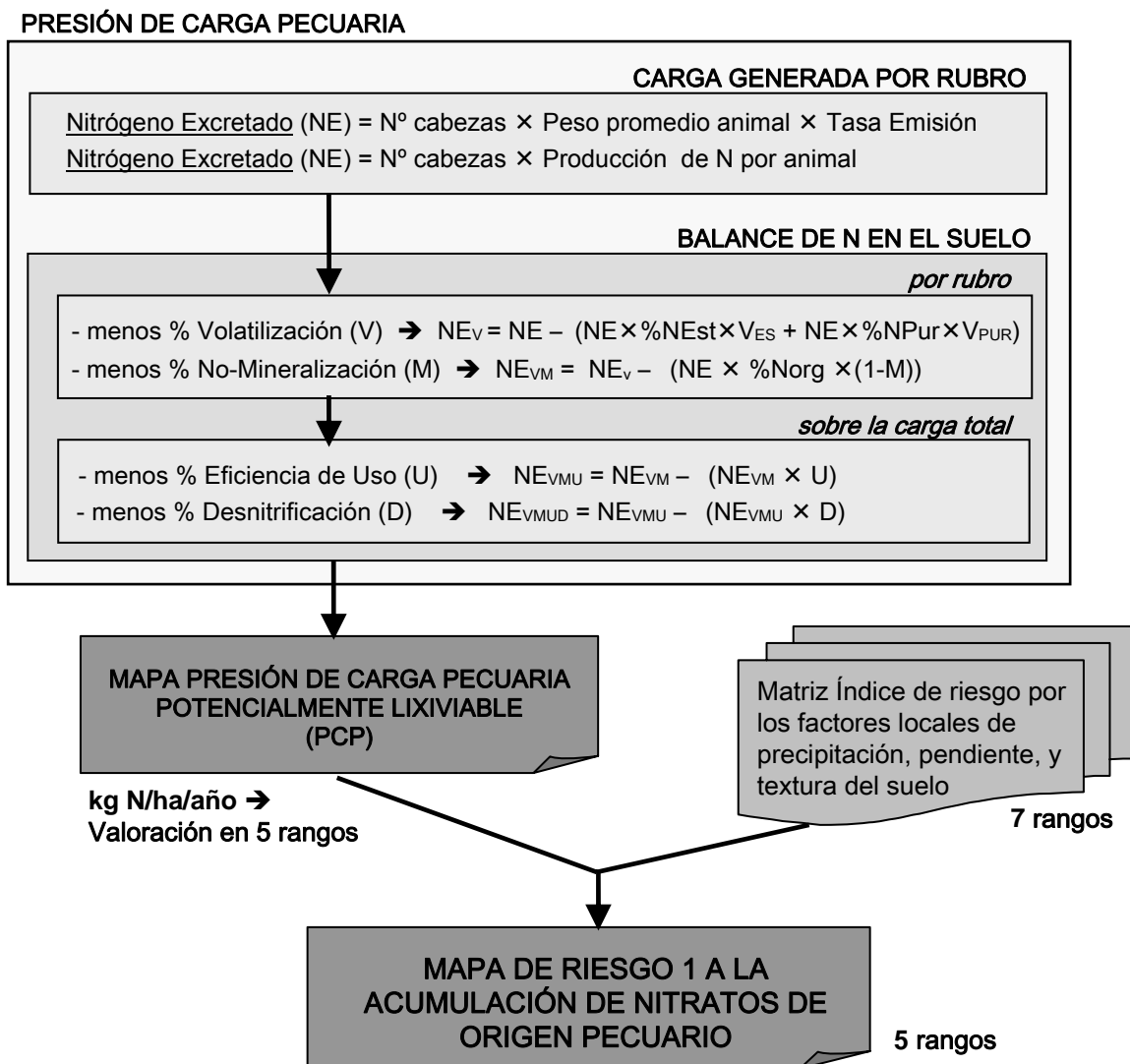


Figura 2.3. Esquema metodológico para el cálculo del mapa de Riesgo 1 a la acumulación de nitratos de origen pecuaria. Las abreviaciones de la figura se encuentran en el glosario de términos de este capítulo.

Podemos observar que la valoración de la carga bruta se determina, para la carga agrícola, a partir de variables como la demanda por cultivo, su rendimiento, y para la carga pecuaria a partir de datos de los censos de estabulación animal y tablas de producción de N por especie. A cada una de estas dos cargas por separado, se le aplican los cálculos correspondientes de balance del suelo (pérdidas por volatilización, desnitrificación, eficacia de uso de los fertilizantes, etc.) con el objetivo de conocer las cargas agrícola y pecuaria, potencialmente lixiviables hacia las aguas subterráneas. En el caso de las cargas agrícolas este valor es corregido además por factores de disponibilidad de riego (riego/secano) y tecnologías aplicadas (riego tradicional, tecnificado,...).

Estos valores de carga, en unidades de Kg N/ha/año, son clasificados en los 5 rangos anteriormente mencionados, los cuales son corregidos posteriormente por los factores topográficos (pendiente), de suelo (textura), climáticos (precipitación) y de vulnerabilidad intrínseca del acuífero para obtener los mapas finales de riesgo al aumento de concentración de nitratos en aguas subterráneas.

3 DETERMINACIÓN DE LA CARGA BRUTA

3.1 Carga Bruta de origen Agrícola

La carga bruta de origen agrícola o la presión de carga bruta, se entiende como la cantidad en kilogramos (Kg) de nitrógeno (N) demandados por los cultivos por hectárea y año, según el requerimiento dado por el rendimiento esperado de las especies y las necesidades internas de las mismas.

Este aporte nitrogenado procede de la fertilización inorgánica y de los abonos tipo desechos sólidos o líquidos que se aplican en las superficies agrícolas de cada región, dependiendo de cada cultivo.

Esta carga agrícola se calcula para la Superficie Agrícola Utilizable (SAU) de cada distrito censal, la cual comprende los siguientes rubros y especies productivos (Tabla 3.1). Las bases de datos utilizadas corresponden a las del último censo agropecuario de 1997.

Tabla 3.1. Rubros agrícolas y actividades asociadas.

Rubro agrícola (SAU)	Descripción actividades
Cultivos anuales	Cereales, leguminosas, industriales, oleaginosas
Frutales	Caduca, persistente, viñas
Horticultura	Hortalizas total especies, flores
Praderas	Mixtas; sembradas y mejoradas

3.1.1 Variables utilizadas

Coefficiente de Demanda (Cd_i): Este valor expresa el requerimiento interno del nutriente en Kg N por tonelada de producto, y está tabulado para algunas especies en referencias nacionales e internacionales.

Los valores que se han utilizado en esta metodología son los que se presentan en la Tabla 3.2, Tabla 3.3, Tabla 3.4 y Tabla 3.5.

Tabla 3.2. Coeficientes de demanda de nitrógeno para el rubro Cultivos Anuales y sus principales especies, usados de referencia para cálculo de carga de N bruta generada.

Denominación	Especie	Coeficiente de Demanda de N (Kg N / Kg producto)		
		Mínimo	Máximo.	Promedio
Cereales	Arroz con cáscara	2,10	2,42	2,26
	Avena	2,14	2,46	2,30
	Cebada cervecera	2,01	2,31	2,16
	Cebada forrajera	2,01	2,31	2,16
	Centeno	2,01	2,31	2,16
	Maíz seco	2,49	2,86	2,68
	Trigo blanco	2,45	2,82	2,64
	Trigo candeal	2,45	2,82	2,64
	Triticale	2,01	2,31	2,16
Leguminosas	Arveja seca	4,80	5,52	5,16
	Chícharo	4,50	5,18	4,84
	Garbanzo	4,40	5,06	4,73
	Lenteja	4,40	5,06	4,73
	Poroto consumo interno	5,50	6,33	5,92
	Poroto exportación	5,50	6,33	5,92
Tubérculos	Papa	0,57	0,66	0,62
Oleoginosas	Maravilla	5,00	5,75	5,38
	Raps	4,70	5,41	5,06
Industriales	Remolacha azucarera	0,42	0,48	0,45
	Soya	7,00	8,05	7,53
	Tabaco	5,00	5,75	5,38
	Maní	4,50	5,18	4,84
	Lupino seco	4,50	5,18	4,84
Fibras	Lino fibra	4,70	5,41	5,06

Fuente: Caracterización de las fuentes agrarias de contaminación de las aguas por nitratos, 2001. Ministerio de Medio Ambiente, Dirección general de obras hidráulicas y calidad de las aguas (similar para las siguientes tablas).

Tabla 3.3. Coeficientes de demanda de Nitrógeno para rubro Frutales Industriales usados de referencia para cálculo de carga de N bruta generada por los cultivos.

Denominación	Especie	Coeficiente de Demanda de N (Kg N / Kg producto)		
		Mínimo	Máximo	Promedio
Industriales	Arándano	s/i	s/i	s/i
	Ciruelo europeo	4,80	5,50	5,15
	Ciruelo japonés	4,80	5,50	5,15
	Damasco	4,80	5,50	5,15
	Duraznero	4,80	5,50	5,15
	Frambuesa	s/i	s/i	s/i
	Frutilla	s/i	s/i	s/i
	Cerezo o guindo dulce	8,00	9,20	8,60
	Kivi	7,80	9,00	8,40
	Limonero	10,00	11,50	10,75
	Mandarina o clementina	10,00	11,50	10,75
	Manzano rojo	3,80	4,40	4,10
	Manzano verde	3,80	4,40	4,10
	Naranja	10,00	11,50	10,75
	Nectarino	4,80	5,50	5,15
	Nogal	s/i	s/i	s/i
	Palto	24,00	27,60	25,80
	Peral asiático	3,80	4,40	4,10
	Peral europeo	3,80	4,40	4,10
	Uva de mesa	7,80	9,00	8,40

Tabla 3.4. Coeficientes de demanda de Nitrógeno para rubro Forrajeras, principales especies explotadas, usados de referencia para cálculo de carga de N bruta generada.

Denominación	Especie	Coeficiente de Demanda de N (Kg N / Kg producto)		
		Mínimo	Máximo.	Promedio
Tipo 1	Arveja forrajera o Vicias	5,00	5,80	5.40
	Avena forrajera sola	2,40	2,80	2.40
	Avena forrajera asociada	2,40	2,80	2.40
	Ballicas anuales	2,40	2,80	2.40
	Cebada forrajera	2,10	2,40	2.25
	Centeno forrajero	2,10	2,40	2.25
	Col forrajera	7,00	8,10	7.55
	Lupino forrajero	5,00	5,80	5.40
	Maíz silo	2,40	2,80	2.40
	Mezcla forrajeras anuales	4,00	4,10	4.05
	Pasto Sudán o Sorgo	2,40	2,80	2.40
	Trébol alejandrino	5,00	5,80	5.40
	Trébol encarnado	5,00	5,80	5.40
	Trébol subterráneo	5,00	5,80	5.40
	Zanahoria forrajera	5,00	5,80	5.40
	Zapallo forrajero	5,00	5,80	5.40
	Otras	5,00	5,80	5.40
Tipo 2	Alfalfa	6,20	7,10	6.65
	Ballica inglesa p perenne	2,40	2,80	2.40
	Falaris	2,40	2,80	2.40
	Festuca	2,40	2,80	2.40
	Fromental	2,40	2,80	2.40
	Lotería o alfalfa chilota	5,00	5,80	5.40
	Mezclas forraje permanente o rotación	4,00	4,60	4.30
	Pasto ovillo	2,40	2,80	2.40
	Taganaste	5,00	5,80	5.40
	Trébol blanco	5,00	5,80	5.40
	Trébol ladino	5,00	5,80	5.40
	Trébol rosado	5,00	5,80	5.40
	Otras	5,00	5,80	5.40

Tabla 3.5. Coeficientes de demanda de Nitrógeno para rubro Hortalizas, principales especies explotadas, usados de referencia para cálculo de carga de N bruta generada.

Denominación	Especie	Coeficiente de Demanda de N (Kg N / Kg producto)		
		Mínimo	Máximo.	Promedio
Mayores	Alcachofa	8,00	9,20	8,60
	Arveja verde	11,00	12,70	11,85
	Cebolla guarda	3,00	3,50	3.25
	Choclo	7,00	8,70	7.85
	Espárrago	9,00	10,40	9.70
	Lechiga	3,00	3,50	3.25
	Melón	3,00	3,50	3.25
	Pimiento	4,00	4,60	4.30
	Poroto granado	9,20	10,60	9.90
	Poroto verde	9,20	10,60	9.90
	Sandía	2,50	2,90	2.70
	Tomate fresco	3,00	3,50	3.25
	Zanahoria	5,00	5,80	5.40
	Zapallo temprano/guarda	5,00	5,80	5.40

Producción del cultivo promedio (P_i): Producción en Kg de producto por año de cada especie cultivada en un distrito censal. Los datos utilizados provienen, para los distintos cultivos (especies) del rubro de cultivos anuales, de los datos del censo agropecuario de 1997, y para los cultivos de los rubros de frutales, horticultura y praderas, de datos promedio nacionales obtenidos de referencias del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) y de la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA).

En el caso de los cultivos anuales, para cada especie se consideraron conjuntamente las hectáreas ocupadas con el cultivo en formación y en producción; y para los cultivos de horticultura se consideraron conjuntamente las hectáreas de una misma especie cultivadas al aire libre o en invernaderos.

Superficie sembrada por cultivo (S_i): Son exactamente las hectáreas sembradas en un mismo distrito por un mismo cultivo dentro de un rubro en particular. Los datos utilizados se extrajeron de los datos del censo agropecuario de 1997.

Rendimiento (R_i): Expresa la producción de cada tipo de cultivo por hectárea. Este dato es calculado como rendimiento esperado bajo condiciones normales de producción del cultivo según la localidad en la que se encuentre. Para su cálculo es necesario contar con los valores de superficie sembrada y de su producción promedio.

Dosis demandada por Cultivo (Dc_i): A partir de las variables de rendimiento y coeficiente de demanda, puede calcularse para cada cultivo en un mismo distrito censal la dosis demandada por cultivo (Dc), que representa la carga de Nitrógeno aplicada por hectárea y año por cada tipo de cultivo, requerida en términos de rendimiento esperado (R) y coeficiente de demanda interna de N del cultivo (Cd).

3.1.2 Cálculo de la Carga Bruta de nitrógeno de origen agrícola por distrito

Para el cálculo de la carga bruta de nitrógeno de origen agrícola aplicada en los cultivos de un mismo distrito censal, primero deben calcularse, para cada cultivo (i) de cada rubro (j) el valor de su rendimiento esperado según la ecuación:

$$R_{id} = \frac{P_{id}}{S_{id}}$$

donde

- R_{id} : Rendimiento promedio esperado del cultivo, por especie (i), por distrito censal (d), [Kg producto/ha]
 P_{id} : Producción del cultivo promedio, por especie (i), por distrito censal (d), [Kg producto]
 S_{id} : Superficie sembrada del cultivo, por especie (i), por distrito censal (d), [ha]

Posteriormente se calcula el valor de la dosis demandada por cada cultivo (i) de cada rubro (j) a partir de la ecuación:

$$Dc_{ij} = \sum_j (R_{id} \times Cd_i)_j$$

donde

- Dc_{ij} : Dosis demandada por el cultivo, por especie (i), por rubro (j), [Kg N/ha/año]
 Cd_i : Coeficiente de demanda del cultivo, por especie (i), [Kg N/Kg producto/año]

Así, en cada distrito, la suma de las dosis demandas (D_c) de todos los cultivos sembrados en él, equivalen a la **Carga Bruta de nitrógeno de origen agrícola** aplicada. El cálculo se realiza por lo tanto a partir de la siguiente ecuación:

$$CN_d = \sum_j Dc_{ij}$$

donde

CN_d : Carga bruta de nitrógeno de origen agrícola generada en un distrito censal (d), [Kg N/ha/año]

Dc_{ij} : Dosis demandada por el cultivo, por especie (i), por rubro (j), [Kg N/ha/año]

3.2 Carga Bruta de Origen Pecuario

La presión de carga pecuaria se considera como la cantidad en Kg de Nitrógeno producido en forma de estiércoles y purines en un mismo distrito, los cuales son función de la cantidad y tipo de cada especie animal explotada. Las bases de datos utilizadas corresponden también a las del último censo de 1997, el cual comprende los siguientes rubros y especies productivas (Tabla 3.6).

Tabla 3.6. Rubros definidos en censo agropecuario 1997 y utilizados en esta metodología.

Rubro pecuario	Descripción especies
Porcinos	Total
Aves	Engorda, ponedoras, reproductoras
Bovinos	Leche, carne
Ovinos	Total
Caprinos	Total
Equinos	Total

La producción de nitrógeno generada por cada especie animal, depende de la producción de estiércol y purín diaria, así como del porcentaje de nitrógeno de sus excretas. Estos valores dependen del tipo de animal, su edad, tamaño, cantidad de alimento diario, etc. para su cálculo se han considerado las variables que se describen a continuación.

3.2.1 Variables utilizadas

Numero de cabezas por especie animal y tipo (Nc): A partir de los datos del último censo agropecuario de 1997, se conocen el número de cabezas de cada especie animal que se encuentran en las explotaciones ganaderas de cada distrito. Para las aves se conoce también el número de aves de engorda, ponedoras y reproductoras, y para los bovinos, el número de animales que corresponden a la producción de leche o carne.

Peso promedio animal (P_A): Corresponde a los kilogramos promedio de peso de cada tipo (leche, carne, ponedoras, reproductoras, etc.) y especie de animal. Estos datos se han obtenido de la bibliografía internacional. Los datos utilizados en este estudio se presentan en la Tabla 3.7. Esta variable ha sido utilizada solamente para los rubros avícola y bovino en que se conocen los números de cabeza por tipo animal dentro la misma especie.

Tasa de emisión (T_E): Corresponde a los Kilogramos de N excretados por cada 1000 kg de animal y día según el tipo y especie animal. Igualmente esta variable ha sido utilizada solamente para los rubros avícola y bovino, con los datos que se presentan en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Valores considerados para los parámetros de P_A y T_E.

Especie (i)	Peso promedio animal (Kg animal)	Tasa emisión (kg N/1000 Kg animal/día)
Bovino leche	603,4	0,45
Bovino carne	532,3	0,33
Ave ponedora	1,81	0,83
Ave Engorda	0,91	1,1
Ave reproductora	1,81	0,83

Fuente: "Evaluación de las Emisiones de Amoníaco, Actividades Ganaderas RM" (2006) y Oregon State University.

Producción de Nitrógeno por animal (P_N): Corresponde a los Kg de N generados diariamente por cada especie animal. Este es un valor promedio para cada especie, que no tiene en cuenta el tipo de animal (engorda, cría, etc.). Esta variable se ha usado por lo tanto para los rubros porcinos, ovinos, caprinos y equinos, en que no existe en el censo esta información. Los valores utilizados son los que se presentan en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8. Valores de producción de Nitrógeno.

Rubro Pecuario (j)	Producción de N (Kg N/día)
Porcinos	0,408
Ovinos	0,204
Caprinos	0,204
Equinos	0,1225

Fuente: <http://www.purdue.edu/dp/envirosoft/manure/spanish/src/species2.htm>

3.2.2 Cálculo de la Carga Bruta Pecuaria generada por distrito

Para los rubros avícola y bovino, la determinación de la carga bruta pecuaria generada (en Kg de N/ha/año) por cada distrito, se determina a partir de numero de cabezas por especie y tipo animal (leche, carne, engorda, reproductor, ponedora), su peso promedio, y su tasa de emisión de N, según la ecuación:

$$NE_i = Nc_i \times P_{Ai} \times T_{Ei} \times 365 / ha_{\text{distrito}}$$

donde:

- i : Tipo animal (ave engorda, ave reproductora, ave ponedora, bovino carne, bovino leche)
- NE_i : Nitrógeno excretado por tipo animal y especie (i), en Kg N/ha/año
- Nc_i : Número de cabezas por tipo de animal y especie (i)
- P_{Ai} : Peso promedio Animal, por tipo animal y especie (i), en Kg animal
- T_{Ei} : Tasa emisión de N, por tipo animal y especie (i), en Kg N/1000 Kg animal/día

Para los rubros pecuarios porcino, ovino, caprino y equino en que existe una información muy general y poco detallada, la producción de nitrógeno se calcula de manera general a partir del número de cabezas de animal por los valores tabulados de su producción de kg de N al día siguiendo la ecuación:

$$NE_j = Nc_j \times P_{Nj} \times 365 / ha_{\text{distrito}}$$

donde

- j : Rubro pecuario productivo
- NE_j : Nitrógeno excretado por rubro animal (j), en Kg N/ha/año
- Nc_j : Número de cabezas por rubro animal (j)
- P_{Nj} : Producción de Nitrógeno, por rubro (j), en Kg N/día/animal

Los procesos de balance del suelo (volatilización, mineralización, etc.) afectan distintamente a los diferentes tipos de estiércol y purines, por lo que, estas cargas de N calculadas por rubro o por tipo de animal y especie son consideradas de momento por separado y no son sumadas en este punto.

4 DETERMINACIÓN DE LA CARGA POTENCIALMENTE LIXIVABLE

4.1 Corrección por factores de balance de N en el suelo

Durante la aplicación en el suelo y durante la infiltración por el suelo y la zona no saturada, la carga bruta (agrícola o pecuaria) generada sufre unas pérdidas por absorción de las plantas como nutriente, por volatilización, no-mineralización, etc. que forman parte de los denominados procesos de balance de N y que reducen la carga de nitrógeno potencialmente lixiviable respecto la carga bruta inicial aplicada (como fertilizantes sintéticos) o generada por las explotaciones ganaderas. Estos procesos que afectan distintamente a los fertilizantes inorgánicos, a los estiércoles y los purines son evaluados y considerados a continuación.

4.1.1 Variables utilizadas

Eficiencia de Uso (Eu): La eficiencia de recuperación del nutriente contenido en el fertilizante, o eficiencia de uso, corresponde al porcentaje de N, P, K realmente absorbido por el cultivo. Este valor resulta máximo para dosis de aplicación de fertilizante bajas y disminuye conforme éstas últimas se incrementan.

En términos generales la eficiencia de uso promedio de la fertilización nitrogenada en Chile oscila entre un 50 al 65%, mientras que la eficiencia de uso en la recuperación de cada nutriente procedente de los estiércoles y purines es menor, en torno a un 33% (M.T. Varnero, Universidad de Chile, comunicación personal). Estos son los valores considerados en esta metodología, para la aplicación de fertilizantes sintéticos, un 50%, excepto para el rubro praderas que se usa un valor del 60%. Para la aplicación de carga de nitrógeno de origen pecuario el valor de 33%.

Volatilización (V): Este proceso representa las pérdidas de N del suelo por la transformación del amonio (NH_4) a amoníaco (NH_3) que volatiliza hacia la atmósfera. Este proceso afecta de distinto modo a los fertilizantes sintéticos y los fertilizantes orgánicos o cargas pecuarias dado que depende de la composición y concentración de NH_4 de la carga potencialmente

contaminante. Por lo tanto también, es distinto si se trata de estiércoles (contenido en materia seca >15%) o purines (materia seca <15%).

Para las cargas agrícolas, esta guía considera un valor promedio de pérdidas de N por volatilización de los fertilizantes sintéticos del 5% para todo el país. (Benavides, C., U. Chile, 2006, comunicación personal), mientras que para las cargas pecuarias, esta guía supone unas pérdidas de N por volatilización del 15% en estiércoles (V_{ES}) y de un 25% en purines (V_{PUR}).

Desnitrificación (D): Este proceso representa las pérdidas de N- NO_3 como N gas (N_2) y/o óxidos de N (N_2O) hacia la atmósfera a partir de la degradación del nitrato bajo condiciones anaeróbicas en el suelo. Este proceso depende por lo tanto de la cantidad de oxígeno del suelo (y por lo tanto también, de sus características de drenaje), así como de la concentración de NO_3 y temperatura.

Dado que no se dispone de información de detalle, completa, para cada región en Chile sobre el contenido de M.O. del suelo y su tipo de drenaje, parámetros que afectan a la mayor o menor desnitrificación, esta guía utiliza un valor conservador de pérdidas de N por desnitrificación del 10% a nivel de nacional, tanto para las cargas agrícolas como pecuarias.

Mineralización (M): Variable aplicada solamente en la carga pecuaria. El proceso de mineralización es denominado también amonificación, y transforma el nitrógeno orgánico de las excretas (ácido úrico y urea) en nitrógeno amoniacal inorgánico que posteriormente es transformado a nitrito y después a nitrato prácticamente por completo. El interés de este proceso radica en que el nitrógeno orgánico que no es mineralizado, no debe considerarse como potencialmente contaminante en nitratos en las aguas subterráneas. Por esta razón evaluamos la no-mineralización.

En la bibliografía internacional, existen varios valores tabulados, según el origen de la excreta (rubro pecuario), del porcentaje de N total que es mineralizado en el transcurso del primer año desde su aplicación.

En la Tabla 4.1, cuarta columna, se presentan los porcentajes de mineralización anual que se usan en esta guía para cada rubro productivo. Estos valores se aplican sobre el porcentaje de N orgánico de cada excreta por rubro según los valores de la Tabla 4.4.

Tabla 4.1. Valores de referencia de mineralización de N orgánico (valores en porcentaje).

Rubro productivo	Mineralización growing season (N _{org} + N _{org-min})	Mineralización 1er año (N _{org})	Mineralización anual considerada en esta guía
Porcinos	30-50	70 (engorda)	70
Aves	30-45	70-90 (ponedora)	90
Bovinos	20-35	20-30	35
Ovinos	25	30-50	50
Caprinos	25	30-50	50
Equinos	25	-	50

Fuentes: Primera columna: Agronomy Guide, Purdue University. Segunda columna: Informaciones técnicas 2006. Gob. De Aragón. Fertilización nitrogenada.

Composición de las excretas (%NPur, %NEst, %Norg): Para la carga pecuaria, las pérdidas por volatilización o no-mineralización dependen de la composición de las excretas (porcentaje de N orgánico, porcentaje de N procedente de los purines o de los estiércoles...). Así, la volatilización se aplica sobre el porcentaje de N excretado como estiércol o como purín para cada rubro productivo. Para ello se han considerando unos porcentajes referenciales que pueden considerarse en Chile del contenido de estiércol y purines de las excretas generadas por cada rubro productivo (Tabla 4.2) y del contenido de N en el estiércol y en los purines de cada rubro productivo (Tabla 4.3). Estos valores surgen no sólo de la composición promedio de las excretas de cada rubro, sino también del manejo que se hace de ellas. Por ejemplo, aunque la gallinaza de las aves puede considerarse como purín (materia seca <15%), en Chile, el 80% de las aves de los planteles son de pollo broiler cuya excreta se mezcla con cama y el resultado es una mezcla cuya materia seca es >15% y por lo tanto puede considerarse como estiércol.

A partir de los valores de porcentajes de emisión de purines y estiércoles por cada tipo de animal y especie (Tabla 4.2) y las concentraciones de Nitrógeno de estas excretas (columnas 2 y 4 de la Tabla 4.3) se han calculado los valores de porcentaje de nitrógeno procedentes de los purines o estiércoles respecto a la cantidad total de N excretados (%NPur, %NEst, de

la Tabla 4.3) para cada tipo de animal y especie (para bovinos y aves), que encontramos en la tercera y quinta columna de la Tabla 4.3.

Tabla 4.2. Valores considerados de estiércol y purín de las excretas de cada rubro productivo que pueden considerarse en Chile (%).

Rubro productivo	% Estiércol en excreta total	% Purín en excreta total
Porcinos	0	100
Aves	80	20
Bovinos	62	38
Ovinos	100	0
Caprinos	100	0
Equinos	100	0

Tabla 4.3. Valores considerados de N en excreta (estiércol o purín) en bovino y aves (%).

Rubro	% Kg N / Kg excreta (en purín)	%Kg N de purín / Kg excreta total		%Kg N de estiércol / Kg excreta total	
		(purín y estiércol) (%NPur)	(en estiércol)	(purín y estiércol) (%NEst)	
Bovino carne	0,52	44,97	0,39	55,03	
Bovino leche	0,50	35,78	0,55	64,21	
Ave ponedora	1,05	9,33	2,55	90,66	
Ave engorda	1,60	13, 56	2,55	86,44	

Fuente: % KgN/Kg excreta (purín o estiércol): "Fertilización Nitrogenada: Guía de actualización". Gobierno de Aragón. % KgN/Kg excreta total: cálculos propios

Para calcular el proceso de la no-mineralización debe considerarse la composición del N orgánico sobre el N total. Hay que considerar que las excretas de los animales contienen un porcentaje de N orgánico, un porcentaje de N órgano-mineral, y otro porcentaje de N mineral y que algunos estudios hablan de la mineralización del N orgánico, y en otros consideran el N orgánico y el N órgano-mineral conjuntamente. Esta guía ha considerado los valores que se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. N orgánico sobre el N total afecto por el proceso de la mineralización para cada rubro productivo y tipo de excreta (%).

Rubro Pecuario y tipo de excreta	Porcentaje Norg / Ntotal (%Norg)
Porcino (purín)	27,8
Caprino (estiércol)	72,2
Ovino (estiércol)	72,2
Equino (estiércol)	71,4
Ave purín	20,0
Ave estiércol	21,2
Bovino carne purín	40,0
Bovino carne estiércol	65,6
Bovino leche purín	50,0
Bovino leche estiércol	55,6

Fuente: Purdue University.

4.1.2 Cálculo de la carga agrícola potencialmente lixiviable

Para el cálculo de la carga agrícola potencialmente lixiviable, se tiene en cuenta que la carga bruta de N procedente de la fertilización sintética, tiene unas pérdidas (desde el punto de vista de la lixiviación hacia las aguas subterráneas) que son, en primer lugar, debidas a la eficacia de uso de las plantas hacia los nutrientes de los fertilizantes, en segundo lugar, por la volatilización y en tercer lugar por la desnitrificación. Los cálculos que se realizan, para cada distrito son los que se describen a continuación:

A la dosis demandada de kg de N por hectárea y año calculada para cada tipo de cultivo y rubro se le aplican las pérdidas por absorción de las plantas (Eficacia de uso) con la siguiente fórmula, que tiene en cuenta las hectáreas cultivadas por cada rubro:

$$CN_{Ud} = \left[\sum Dc_{ij} - \sum (Dc_{ij} \times \% ha_{ij} \times U_j) \right]_d$$

donde

- CN_{Ud} : Carga de N de origen agrícola residual en el suelo en un distrito censal (d), después de considerar la absorción de los cultivos, [Kg N/ha/año]
- Dc_{ij} : Dosis demandada por el cultivo, por especie (i), por rubro (j), [Kg N/ha/año].
- $\%ha_{ij}$: Porcentaje de hectáreas cultivadas en un distrito censal (d), por el cultivo (i) del rubro (j).
- U_j : Eficiencia fertilización nitrogenada por rubro (j), [valor: 0,6 en praderas y 0,5 en el resto de cultivos].

Luego sobre la carga residual obtenida en cada distrito se aplican las pérdidas debidas a la volatilización:

$$CN_{UVd} = [CN_{Ud} - (CN_{Ud} \times V_A)]_d$$

donde

- CN_{UVd} : Carga de N de origen agrícola residual en el suelo en un distrito censal (d), corregida por la eficiencia de uso (U), y por la volatilización (V), [Kg N/ha/año]
- V_A : Pérdida de N por volatilización agrícola, [valor constante promedio nacional 0,05]

Para finalizar se tienen en cuenta las pérdidas por desnitrificación del siguiente modo:

$$CN_{UVdD} = [CN_{UV} - (CN_{UV} \times D)]_d$$

donde

- CN_{UVdD} : Carga de N de origen agrícola residual en el suelo corregida por la eficiencia de uso (U), por la volatilización (V) y la desnitrificación (D) [Kg N/ha/año]
- D : Pérdida de N por desnitrificación, [valor constante promedio nacional 0,10]

Así, a partir de la aplicación de todos estos cálculos obtenemos el valor de la Presión de Carga Agrícola (PCA) potencialmente lixiviable para cada distrito censal, el cual corresponde al valor de CN_{UVdD} . Sus unidades son los kilogramos de nitrógeno por hectárea y año.

4.1.3 Cálculo de la carga pecuaria potencialmente lixiviable

Para el cálculo de la carga pecuaria potencialmente lixiviable, se tiene en cuenta que la carga bruta de N generada por las actividades ganaderas de un mismo distrito, tiene unas pérdidas (desde el punto de vista de la lixiviación hacia las aguas subterráneas) que son, en primer lugar, debidas a la volatilización del amonio y después a la no-mineralización de parte del N orgánico excretado, y posteriormente a la absorción por las plantas (eficiencia de uso) y la desnitrificación en el suelo. Las pérdidas por volatilización y no-mineralización se

calculan sobre la carga de N generada por cada rubro o tipo de animal (para bovinos y aves) por separado, mientras que las pérdidas por Absorción y Desnitrificación se calculan sobre toda la carga residual del distrito. Los cálculos se realizan según se describe a continuación.

Para cada rubro (para porcinos, ovinos, caprinos y equinos) o tipo de animal (para bovinos y aves) se calculan las pérdidas de N por volatilización sobre los kilogramos de N excretados teniendo en cuenta su composición (contenido de N en estiércol y purín, y % estiércol y purín en las excretas). Los cálculos para considerar estas pérdidas se realizan a partir de las siguientes fórmulas:

- Para los rubros pecuarios en que toda la excreta es 100 % purín (porcino) o 100 % estiércol (caprinos, ovinos y equinos):

$$NE_{Vjd} = [NE_j - (NE_j \times V_P)]_d$$

donde

j : Rubro pecuario productivo

d : Distrito censal

NE_{Vjd} : Nitrógeno excretado por rubro animal (j) en un distrito censal (d) considerando las pérdidas por volatilización (V), [Kg N/ha/año]

NE_j : Nitrógeno excretado por rubro animal (j) en un distrito censal (d) [Kg N/ha/año]

V_P : Pérdida de N por volatilización pecuaria, [0,25 para purines y 0,15 para estiércoles]

- Para los rubros pecuarios en que la excreta está compuesta por un porcentaje de purín y otro de estiércol los cuales tienen además una distinta concentración de N en el purín o la excreta (bovino carne, bovino leche, ave ponedora, ave engorda):

$$NE_{Vjd} = \sum [NE_i - (NE_i \times \%NPur_i \times V_P) - (NE_i \times \%NESt_i \times V_P)]_d$$

donde

NE_i : Nitrógeno excretado por tipo animal y especie (i) en un distrito censal (d) [Kg N/ha/año]

$\%NPur_i$: Porcentaje de Nitrógeno sobre los kilogramos de N totales excretados procedentes de las excretas en forma de purín, por tipo de animal y especie (i) [valores en Tabla 4.3]

$\%NEst_i$: Porcentaje de Nitrógeno sobre los kilogramos de N totales excretados procedentes de las excretas como estiércol, por tipo de animal y especie (i) [valores en Tabla 4.3]

Sobre la carga de N residual para cada rubro (porcinos, ovinos, caprinos y equinos) o tipo de animal (bovinos y aves) después de considerar las pérdidas por volatilización, se calculan las pérdidas por no-mineralización, es decir de aquellos nitrógenos orgánicos que no se transformarán en nitratos y por lo tanto no podrán contaminar las aguas subterráneas. Los cálculos que se realizan son los siguientes:

- Para los rubros pecuarios en que toda la excreta es 100 % purín (porcinos) o 100 % estiércol (caprinos, ovinos y equinos):

$$NE_{VMjd} = [NE_{Vj} - (NE_{Vj} \times \%Norg_j \times (1 - M))]_d$$

donde

NE_{VMjd} : Nitrógeno excretado por rubro animal (j) en un distrito censal (d) considerando las pérdidas por volatilización (V) y no-mineralización (1-M), [Kg N/ha/año]

$\%Norg_j$: Porcentaje de Nitrógeno orgánico sobre los kilogramos de N totales excretados procedentes de las excretas totales, por rubro animal (j) [valores en Tabla 4.4]

M : Porcentaje de mineralización del N orgánico en el primer año, por rubro animal [valores en Tabla 4.1]

- Para los rubros pecuarios en que toda la excreta tiene un porcentaje de purín y uno de estiércol y estos tienen una distinta concentración de N en el purín o la excreta (bovino carne, bovino leche, ave ponedora, ave engorda):

$$NE_{VMjd} = \sum [NE_{Vi} - (NE_{Vi} \times \%NPur_i \times \%Norg_i \times (1 - M)) - (NE_{Vi} \times \%NEst_i \times \%Norg_i \times (1 - M))]_d$$

donde

NE_{Vi} : Nitrógeno excretado por tipo de animal (i) en un distrito censal (d) considerando las pérdidas por volatilización (V), [Kg N/ha/año]

$\%Norg_i$: Porcentaje de Nitrógeno orgánico sobre los kilogramos de N totales excretados procedentes de las excretas totales, por tipo de animal (i) [valores de la Tabla 4.4]

Las pérdidas por absorción de las plantas (eficacia de uso) no dependen del origen (rubro productivo) de la carga de nitrógeno, por lo que, este factor, se determina sobre la suma de las cargas residuales generadas por cada rubro productivo, en un mismo distrito censal, una

vez consideradas las pérdidas por volatilización y no-mineralización. Los cálculos para considerar la absorción de las plantas son los siguientes:

$$NE_{VMUd} = \left[\sum NE_{VMj} - \left(\sum NE_{VMj} \times U \right) \right]_d$$

donde

NE_{VMUd} : Nitrógeno excretado en un distrito censal (d) considerando las pérdidas por volatilización (V), no-mineralización (1-M) y eficiencia de uso (U), [Kg N/ha/año]

U : Eficiencia de uso en la absorción del nitrógeno de origen pecuario, [valor constante promedio nacional 0,33].

El proceso de la desnitrificación se considera para la carga pecuaria total generada en un distrito después de considerar las pérdidas por volatilización, no-mineralización y absorción de las plantas. Los cálculos que se realizan son los siguientes:

$$NE_{VMUDd} = \left[NE_{VMU} - \left(NE_{VMU} \times D \right) \right]_d$$

donde

NE_{VMUDd} : Nitrógeno excretado en un distrito censal (d) considerando las pérdidas por volatilización (V), no-mineralización (1-M), eficiencia de uso (U) y desnitrificación (D), [Kg N/ha/año]

D : Pérdida de N por desnitrificación, [valor constante promedio nacional 0,10]

Hasta este punto de la metodología, se obtiene el valor de la Presión de Carga Pecuaria (PCP) potencialmente lixiviable para cada distrito censal, el cual corresponde al valor de NE_{VMUD} . Sus unidades son los kilogramos de nitrógeno por hectárea y año.

4.2 Corrección por Disponibilidad de Riego

Para el cálculo de las cargas de nitrógeno agrícola que pueden suponer un riesgo a la acumulación en las aguas subterráneas esta guía metodológica aplica sobre las cargas potencialmente lixiviables, dos factores de corrección por disponibilidad de riego de los cultivos. Uno tiene en cuenta si los cultivos se encuentran bajo riego o seco y el segundo, el tipo de método de riego, si es más o menos tecnificado.

La disponibilidad de riego es un factor determinante en los procesos de riesgo ambiental por aporte difuso y la productividad agrícola. De los 4,5 millones de hectáreas arables de país, 2,2 millones están bajo riego; siendo la producción obtenida de esta fracción un 75 a 78% de

toda la producción agrícola nacional. Esto, porque las especies vegetales difieren en su potencial de generación de raíces y la duración de su ciclo activo de absorción, lo que produce grandes diferencias en la capacidad de utilización de los nutrientes y los recursos hídricos. Así, estos dos factores representan el mayor o menor riesgo de aporte de la carga nitrogenada lixiviable al modificar los balances involucrados en el balance de nitrógeno en el suelo debido al tipo de riego, por favorecer la lixiviación o el tiempo de residencia de los nitrógenos en el suelo.

Estos dos factores se multiplican por el valor de carga potencialmente lixiviable o Presión de Carga Agrícola (PCA). A continuación se describen las variables consideradas para aplicar estos factores de corrección.

4.2.1 Variables utilizadas

Factor Riego/Secano (F_{RS}): Las zonas bajo riego representan un mayor riesgo a la acumulación y son más vulnerables a las pérdidas de nitrógeno lixiviable hacia aguas subterráneas que aquellas zonas de secano. En general, producciones de secano logran menores rendimientos que bajo riego, por lo tanto, el riesgo es menor al demandar menos cantidad de N para un potencial de rendimiento esperado. Este factor lleva por lo tanto implícito dos ideas, una, sobre las dosis de nitrógeno que se aplican en un mismo cultivo bajo riego o bajo secano, donde en el segundo caso se suele usar una dosis aproximada entre el 75 y 85% de la dosis que se usa en riego; y dos, sobre la eficiencia del uso del nutriente por las plantas según se muestra en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Factor de corrección riego/secano según disponibilidad de riego y utilización de N.

Tipo de cultivo	Coefficiente de utilización N	Factor de corrección por disponibilidad de riego
Cultivo en secano	70-80%	1
Cultivo bajo riego	55-75%	1,3

Así, este factor de riego/secano se ha determinado a partir de estas dos ideas, ocupando en esta guía un factor de 1 para los cultivos en secano, de modo que la carga potencialmente lixiviable sigue siendo la misma, y de 1,3 para los cultivos bajo riego.

Factor Método de Riego (F_{TR}): Existen métodos de riego superficiales y presurizados, cuya eficiencia afecta drásticamente el uso del agua y de la absorción y transporte de nutriente. A medida que el nutriente alcanza más directamente la zona radicular donde es absorbido, la eficiencia de uso del mismo aumenta, y por lo tanto su potencial contaminante disminuye; además, cuando el método de riego utiliza una inyección directa con agua, el cultivo utiliza más eficiente el nutriente deseado.

La elección de un método de riego depende del costo al agricultor, productividad esperada, condiciones edafo-topográficas, tipo de explotación y disponibilidad de recursos hídricos naturales y de mano de obra. Cuanto más eficiente es el sistema de riego menores son las pérdidas de N por percolación y por lo tanto, menores las dosis de N a aplicar al cultivo para obtener un rendimiento máximo.

En la Tabla 4.6 se muestran los valores de eficiencia en el riego asociadas a diferentes métodos utilizados tradicionalmente.

Tabla 4.6. Métodos de riego y eficiencia asociada.

Método de Riego Superficiales	Eficiencia de riego	Método de Riego Presurizados	Eficiencia de riego
Inundación o tendido	35 – 40	Aspersión	65 – 75
Bordes	45 – 60	Pivote central	70 – 80
Platabanda	40 – 55	Micro-aspersión	65 – 75
Surcos	40 – 55	Micro-jet	60 – 70
Tazas	60 – 70	Goteo	85 - 98

Sin embargo la información disponible sobre los métodos de riego usados en el país por distritos censales se describe en la Tabla 4.7.

A estos métodos de riego se les ha otorgado un factor de ponderación de su riesgo de aumento de concentración asociado a la eficiencia de cada método.

Tabla 4.7. Métodos de riego descritos por distritos censales (1997).

Métodos de Riego	Eficiencia de riego	Riesgo de contaminación
Riego tradicional	≤ 55%	1,30
Riego mecánico	85 – 55%	1,15
Riego micro-irrigación	> 85%	1,00

4.2.2 Cálculo de carga agrícola potencialmente lixiviable corregida

Los dos factores de corrección de la carga agrícola potencialmente lixiviable por disponibilidad de riego deben ser calculados para cada distrito. Es decir, los factores aplicados para cada distrito son el promedio que se obtiene de ellos considerando las hectáreas cultivadas que existen de cada rubro productivo. Los cálculos que deben realizarse son los siguientes:

- Cálculo del Factor Riego/Secano promedio de un distrito censal (d):

$$\overline{F_{RSd}} = \left[\frac{\sum (ha\ Rubro_j \times \%Riego_j \times F_{RS} + ha\ Rubro_j \times \%Secano_j \times F_{RS})}{\sum ha\ Rubro_j} \right]_d$$

donde

$\overline{F_{RSd}}$: Factor riego/secano promedio de un distrito censal (d)

$ha\ Rubro_j$: Hectáreas cultivadas del rubro (j) en un distrito censal (d)

$\%Riego_j$: Porcentaje de hectáreas del rubro (j) cultivadas bajo riego en un distrito censal (d)

$\%Secano_j$: Porcentaje de hectáreas del rubro (j) cultivadas bajo secano en un distrito censal (d)

F_{RS} : Factor riego/secano correspondiente a las hectáreas de un rubro (j) según su método de cultivo (bajo riego o secano) [valores promedio nacionales: 1,3 en riego y 1 en secano]

- Cálculo del Factor Tipo de Riego promedio de un distrito censal (d):

$$\overline{F_{TRd}} = \left[\frac{\sum (ha\ RTrad \times F_{TR} + ha\ RMec \times F_{TR} + ha\ RMirr \times F_{TR})}{\sum ha\ Riego} \right]_d$$

donde

- \overline{F}_{TRd} : Factor Tipo de Riego promedio de un distrito censal (d)
- ha_{rorad} : Hectáreas cultivadas bajo Riego Tradicional en un distrito censal (d)
- ha_{RMec} : Hectáreas cultivadas bajo Riego Mecanizado en un distrito censal (d)
- ha_{RMirr} : Hectáreas cultivadas bajo Riego con Micro-Irrigación en un distrito censal (d)
- ha_{Riego} : Hectáreas totales cultivadas bajo Riego en un distrito censal (d)
- F_{TR} : Factor Tipo de Riego correspondiente a las hectáreas cultivadas bajo un mismo Tipo de riego [valores promedio nacionales: 1,3 para Riego Tradicional, 1,15 para Riego Mecanizado y 1 para Riego con Micro-irrigación]

- Cálculo de la carga potencialmente lixivable corregida por los factores locales de disponibilidad de riego en un distrito censal (d):

$$PCAR_d = \left[CN_{UVD} \times \overline{F}_{RS} \times \overline{F}_{TR} \right]_d$$

donde

- $PCAR_d$: Carga de N de origen agrícola residual en el suelo en un distrito censal (d) corregida por la eficiencia de uso (U), la volatilización (V), la desnitrificación (D) y los factores locales por disponibilidad de riego (F_{RS} , F_{TR}) [Kg N/ha/año]
- CN_{UVD} : Carga de N de origen agrícola residual en el suelo en un distrito censal (d) corregida por la eficiencia de uso (U), por la volatilización (V) y la desnitrificación (D) [Kg N/ha/año]

5 DETERMINACIÓN DE LOS MAPAS DE RIESGO 1

5.1 Cargas Agrícola, Pecuaria, Agropecuaria y su Valoración en 5 Rangos

Las cargas residuales agrícolas y pecuarias obtenidas hasta este punto de la metodología en unidades de Kilogramos de Nitrógeno por hectárea y año, son valorizadas en 5 rangos, según los niveles definidos en la Tabla 5.1. Esta valoración se realiza sobre cada una de estas dos cargas (valores de la Presión de Carga Agrícola corregida por los factores de disponibilidad de riego -PCAR-, y de la Presión de Carga Pecuaria -PCP-) por separado para obtener los dos mapas de riesgo a la acumulación de nitratos de las aguas subterráneas por las actividades agrícolas y por las actividades ganaderas.

En este punto de la metodología también puede realizarse la suma de las dos cargas anteriores para obtener los valores de la Presión de Carga Agropecuaria (PCAP) para obtener al final de la metodología el mapa final de riesgo a la acumulación de nitratos de origen agropecuario de las aguas subterráneas.

Tabla 5.1. Rangos de las cargas y su valorización en los mapas de Presión de Carga Pecuaria (PCP), Presión de Carga Agrícola corregida por los factores de disponibilidad de riego (PCAR) y Presión de Carga Agropecuaria (PCAP).

Presión de Carga a la que corresponde (en Kg N/ha/año)	Rango de las cargas	Color mapa PCP	Color mapa PCAR	Color mapa PCAP
> 120	Muy alta (MA)			
90 - 120	Alta (A)			
60 - 90	Media (M)			
30 - 60	Baja (B)			
< 30	Muy baja (MB)			

Posteriormente, estos mapas de cargas son corregidos por los factores determinados por la localización geográfica de un área estudiada, los cuales pueden potenciar o atenuar la posible concentración en un punto.

Los factores principales que determinan si una misma carga es más o menos potencialmente contaminante son la pendiente (m), que favorecerá la infiltración o el escurrimiento superficial de las cargas, la precipitación (P) la cual a valores muy escasos ni favorece la infiltración ni la dilución de los contaminantes, a niveles medios favorece la infiltración, y a partir de cierta cantidad de lluvia favorece la dilución del contaminante; y la textura del suelo (s), que favorecerá cuando ésta es más gruesa, la infiltración del agua, o en texturas más finas, una circulación de ésta superficial o subsuperficial.

Estos tres factores, que se considera que actúan íntimamente relacionados causando un efecto positivo o negativo según la combinación de éstos, son considerados en una matriz denominada edafotopoclimática. Esta matriz dentro de la herramienta del Sistema de Información Geográfica es superpuesta a los mapas PCP, PCAR y PCAP para obtener los mapa de riesgo 1, que determinan el riesgo al aumento de concentración de nitratos de las aguas subterráneas por factores superficiales (de suelo, tipo de actividad agrícola, ganadera, de riego, topografía, clima...) sin tener en cuenta la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación del acuífero.

5.2 Variables utilizadas en el factor edafotopoclimático

Precipitación (P): Los estudios en hidrogeología (Thornthwaite, 1948) muestran que las lluvias muy pequeñas, son evaporadas, evapotranspiradas, y posteriormente si queda agua disponible inician su infiltración por la zona no saturada pudiendo alcanzar el nivel frático. Estas lluvias, que dependiendo del clima suponen una mayor o menor recarga al acuífero, pero siempre pequeña, generan desde un nulo a un pequeño arrastre de los contaminantes hacia los acuíferos. En el caso de los nitratos, estos quedan disponibles en los suelos para su absorción por las plantas o su desnitrificación por mucho más tiempo. En el otro extremo, las lluvias muy elevadas sí arrastran los contaminantes hacia las aguas subterráneas pero la alta recarga supone también una dilución de las contaminaciones en el acuífero (Custodio y Llamas, 1983). Así, son las lluvias intermedias las que generan el riesgo más alto a la acumulación de nitratos en los acuíferos.

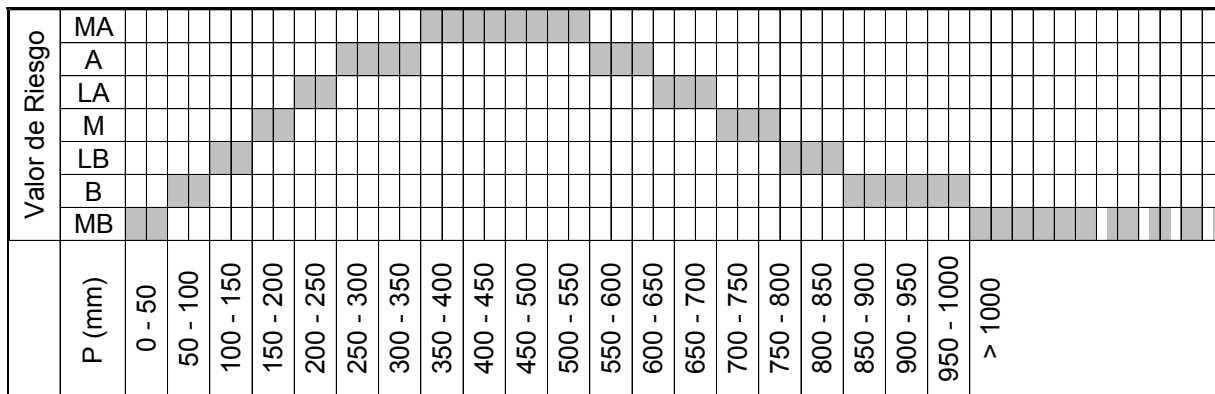
Para esta metodología se ha definido una escala de riesgo-precipitación a partir de las premisas anteriormente mencionadas, y que ha sido ajustada en función de la propia validación de la metodología diseñada.

La escala de precipitación anual se han dividido en 13 rangos, a los cuales se les han asignado 7 valoraciones de riesgo a potenciar la lixiviación de nitratos. Esta escala se muestra en la Tabla 5.2 y en la Figura 5.1. El riesgo asociado a este parámetro aumenta de manera proporcional hasta los 350-550 mm anuales, y disminuye por el efecto dilución hasta valores >1000 mm.

Tabla 5.2. Clasificación de la precipitación según el riesgo que puede llevar a la acumulación de nitratos en las aguas subterráneas por ayuda a la lixiviación o a la dilución.

Rango de Precipitación (mm anuales)	Valor del Índice de riesgo	Rango de Precipitación (mm anuales)	Valor del Índice de riesgo
< 50	Muy bajo (MB)	550 - 625	Alto (A)
50 - 100	Bajo (B)	625 - 700	Ligeramente alto (LA)
100 - 150	Ligeramente bajo (LB)	700 - 775	Medio (M)
150 - 200	Medio (M)	775 - 850	Ligeramente bajo (B)
200 - 250	Ligeramente alto (LA)	850 - 1000	Bajo (B)
250 - 350	Alto (A)	> 1000	Muy bajo (MB)
350 -550	Muy alto (MA)		

Figura 5.1. Representación gráfica de la escala de valores de riesgo asignado a los distintos rangos de precipitación en mm.



Es importante considerar además que la precipitación dependiendo de la pendiente, generará una mayor o menor infiltración de las aguas hacia los acuíferos. Es decir, una precipitación alta en una zona de alta pendiente producirá una lixiviación menor producto del escurrimiento superficial de las aguas por las laderas. Al contrario, una precipitación alta en una zona llana o de baja pendiente produce una gran lixiviación que a partir de un determinado momento puede traducirse también en una dilución de la carga potencialmente contaminante.

Pendiente (m): La pendiente se entiende como un factor de modificación o corrección del riesgo de la contaminación dado su efecto sobre favorecer la infiltración o el escurrimiento superficial de la precipitación. Así, en pendientes bajos, el escurrimiento superficial también es bajo, por lo que la carga nitrogenada potencialmente contaminante permanece en un mismo punto pudiendo ser lixiviada y llegar a contaminar el acuífero suprayacente. Los rangos de pendiente altos, facilitan el escurrimiento superficial, de modo que se puede producir una disminución de la carga nitrogenada en ese punto o de la cantidad de agua que debiera haber favorecido su lixiviación a través de la zona no saturada hasta el acuífero.

La valoración de la pendiente se ha realizado también en 7 rangos de menor a mayor índice de riesgo, los cuales son inversamente proporcionales a la misma variable, es decir, mayor pendiente implica menor riesgo y a la inversa (Tabla 5.3). Los rangos de pendiente se han tomado los mismos de la clasificación de CIREN.

Textura del suelo (s): La textura del suelo se entiende también como un factor de modificación o corrección del riesgo de la contaminación dado su efecto sobre favorecer la infiltración o el escurrimiento superficial de la precipitación, o sobre el aumento o disminución del tiempo de residencia de los nitrógenos en el suelo. Cuando la textura es gruesa, ésta favorece la circulación del agua a través del suelo y por lo tanto su infiltración hacia la zona saturada. Cuando la textura es fina, el flujo del agua a través del suelo es menor de modo que aumenta el tiempo de residencia de los nitrógenos en el suelo donde ocurren los procesos de absorción, volatilización, desnitrificación...

Para la valoración del índice de riesgo correspondiente a la textura del suelo, se ha utilizado la escala de CIREN que clasifica las texturas en 7 clases, a las cuales se les ha asignado un índice de riesgo creciente según aumenta la textura de éstos (Tabla 5.4).

Tabla 5.3. Factor de riesgo para el efecto pendiente.

Valor de la Pendiente (%)	Descripción	Valoración del potencial de riesgo Índice de Riesgo
0 – 1	Plano	Muy Alto (MA)
1 – 3	Suavemente inclinado	Alto (A)
3 - 8 %	Moderadamente inclinado	Ligeramente Alto (LA)
8 - 15 %	Fuertemente inclinado	Medio (M)
15 - 25 %	Moderadamente escarpado	Ligeramente Bajo (LB)
25 - 45 %	Escarpado	Bajo (B)
> 45 %	Muy escarpado	Muy Bajo (MB)

Tabla 5.4. Factor de riesgo para la textura del suelo.

Textura del suelo	Valoración del potencial de riesgo Índice de Riesgo
Muy gruesa	Muy Alto (MA)
Gruesa	Alto (A)
Moderadamente gruesa	Ligeramente Alto (LA)
Media	Medio (M)
Moderadamente fina	Ligeramente Bajo (LB)
Fina	Bajo (B)
Muy fina	Muy Bajo (MB)

De todas formas, en esta metodología no se ha podido trabajar con esta variable ya que las bases de datos de la cobertura de suelo del CIREN no cubren toda el área regional en ninguna de las tres regiones utilizadas para la aplicación y validación de esta metodología

5.3 Cálculos para la Obtención de la Matriz Edafotopoclimática

La Matriz edafotopoclimática muestra el efecto de las tres variables precipitación (P), pendiente (m) y textura del suelo (s), conjugados en un solo factor en forma de matriz, con el

objetivo de valorar el riesgo conjunto sobre el potencial de concentración de la Presión de Carga.

Esta metodología ha sido validada solamente con los factores de precipitación y pendiente a los cuales se les da un peso en la matriz del 70% y 30%, respectivamente.

Se estima que en el caso de disponer también de la información de textura de suelo, debería considerarse un peso de 60% para la variable precipitación, del 20% para la textura, y del 20% para la pendiente. De todos modos, estos valores deberán ser validados en el momento en que se cuente con coberturas completas regionales de la variable textura de suelo.

Los cálculos que se realizan a partir de ahora en la metodología se realizan todos ellos dentro el Sistema de Información Geográfica. Es por esto que el efecto de estos tres factores no se calcula para cada distrito censal como hasta el momento, si no que se realiza para cada celda unitaria del ráster, la cual tiene un tamaño de 90 por 90 m.

Para realizar matemáticamente los cálculos, a cada uno de los rangos de los índices de riesgo de las tres variables se les ha asignado un valor matemático numérico promedio (IRM*) y un rango de valores que determinan el riesgo conjunto de la matriz para cada celda de los mapas.

Tabla 5.5. Rangos y valores promedio asignados a los índices de riesgo de las tres variables de la matriz topo-suelo-climática para realizar los cálculos del riesgo conjunto en cada celda unitaria de los mapas en el Sistema de Información Geográfica.

Índice de Riesgo	Color asignado	Valor promedio (IRM*)	Rango de valores del cálculo de IRM
Muy Alto (MA)	Rojo	701	>627
Alto (A)	Naranja oscuro	610	626,9 - 542
Ligeramente Alto (LA)	Naranja claro	519	541,9 - 458
Medio (M)	Amarillo	428	457,9 - 367
Ligeramente Bajo (LB)	Verde claro	338	366,9 - 273
Bajo (B)	Verde	247	272,9 - 193
Muy Bajo (MB)	Verde oscuro	156	< 192,9

Estos valores y rangos, mostrados en la Tabla 5.5 se han definido de modo que, en el caso que las dos variables utilizadas tuvieran un mismo peso en el cálculo del riesgo, la matriz resultante debería ser matemáticamente simétrica, tal y como se muestra en la Figura 5.2, lo que demuestra que los índices escogidos son matemáticamente válidos para el cálculo. Sin embargo, en esta metodología las dos variables tienen un peso ponderado distinto en la matriz, por lo que ésta, en esta metodología es asimétrica.

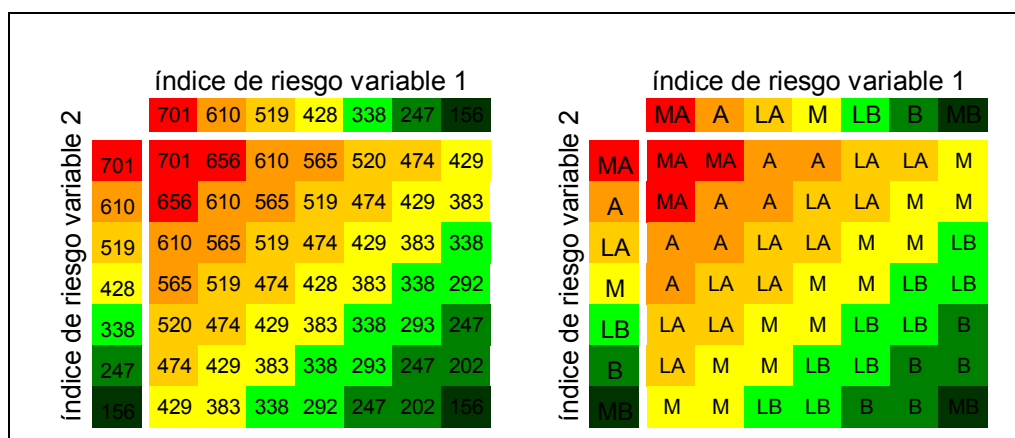


Figura 5.2 Representación de los índices de riesgo utilizados en la matriz edafotopoclimática (valores y rangos de la Tabla 5.5), de modo que, si las dos variables cruzadas tienen un mismo peso dentro de ella, se obtiene la matriz simétrica matemáticamente esperada que demuestra que los índices escogidos son válidos.

Por lo tanto, en cada una de las celdas unitarias del mapa se calcula su valor de riesgo conjunto de la matriz topo-suelo-climática a partir de la fórmula:

$$IRM_c = [0,60 \cdot R_P + 0,20 \cdot R_S + 0,20 \cdot R_m]_C$$

donde

IRM_c : Índice de Riesgo conjunto obtenido en el cálculo de la matriz topo-suelo-climática en una celda unitaria (c).

R_P : Valor del índice de riesgo correspondiente a la Precipitación (P) en una celda unitaria (c).

R_S : Valor del índice de riesgo de la textura del suelo (S) en una celda unitaria (c).

R_m : Valor del índice de riesgo procedente de la pendiente (m) en una celda unitaria (c).

En caso de no disponer de los datos de textura de suelo, el Índice de Riesgo conjunto de la matriz se obtiene solamente con los datos de precipitación y pendiente con la ecuación:

$$IRM_c = [0,70 \cdot R_P + 0,30 \cdot R_m]_c$$

El valor numérico de IRM de cada celda corresponde a un índice de riesgo según los anteriormente descritos (MA, A, LA, M, LB, B, MB). Por lo tanto, en los siguientes cálculos de la metodología se le asigna a cada celda el valor promedio (IRM*) del rango que le corresponde. Por ejemplo, si en una celda se obtiene un valor de IRM de 269, que es un índice Bajo, en los siguientes cálculos le daremos el valor numérico promedio de 247.

5.4 Cálculos para la Obtención del Mapa de Riesgo 1

Los mapas de riesgo 1 a la acumulación de nitratos de origen agrícola, pecuario o agropecuario se calculan aplicándole a los mapas PCP, PCAR y PCAP rasterizados, los valores obtenidos en la matriz edafotopoclimática.

A los mapas de Presión de Carga se les asigna también un valor numérico (Tabla 5.6) para el cálculo matemático de esta superposición de factores (carga y riesgo matriz) a los cuales se les asigna un valor de ponderación del 30% para la carga y del 70% a la matriz edafotopoclimática, valores encontrados en la validación de la metodología que se ajustan mejor a los resultados encontrados en terreno.

En cada celda unitaria, mediante la herramienta SIG, estos valores son sumados considerando su factor de ponderación según la fórmula:

$$VRIC = [0,70 \cdot IRM^* + 0,30 \cdot (PCP, PCAR \text{ ó } PCAP)]_c$$

donde

$VRIC$: Valor obtenido del cálculo del Riesgo 1 en una celda unitaria (c).

IRM^* : Valor matemático asignado al índice de Riesgo conjunto obtenido en la matriz topo-suelo-climática en una celda unitaria (c).






Este cálculo se representa en la Figura 5.3. Posteriormente, al valor del riesgo 1, obtenido de esta suma ponderada se le asigna una valoración según la Tabla 5.7. Es decir, se obtiene una clasificación de este riesgo en 5 rangos, a los cuales se les asigna un valor

matemático (VR1*) equivalentes a los de las Presiones de Carga y con los mismos colores para los siguientes cálculos de la metodología.

Tabla 5.6. Clasificación de los rangos, colores de los mapas y valores matemáticos asignados a los mapas de Presión de Carga para el cálculo del mapa de riesgo 1. Estos rangos y valores coinciden con los rangos de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos.

Rangos de los mapas de Presión de Carga	Color asignado en los mapas	Valor matemático asignado
Muy alta (MA)	Rojo	701
Alta (A)	Naranja	565
Media (M)	Amarillo	428
Baja (B)	Verde oscuro	292
Muy baja (MB)	Verde claro	156

Tabla 5.7. Valores y rangos del Mapa de Riesgo 1.

Escala de clasificación del Riesgo 1	Rango de valores procedentes de su cálculo (VR1)	Valor matemático asignado para los siguientes cálculos (VR1*)	Color asignado en los mapas
Muy alta (MA)	> 604	701	
Alta (A)	604,3 - 486	565	
Media (M)	485,9 - 370	428	
Baja (B)	369,9 - 253	292	
Muy baja (MB)	< 252,9	156	

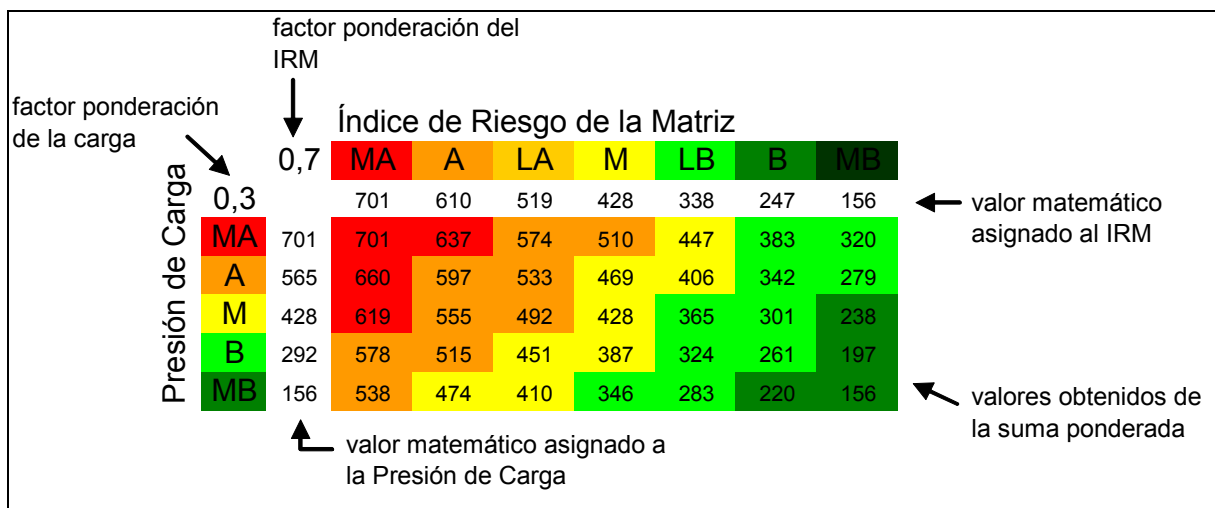


Figura 5.3. Representación del cálculo del Valor del Riesgo¹, mediante la suma ponderada del índice de Riesgo de la matriz edafotopoclimática y la valoración matemática de los Mapas de Presión de Carga. La matriz es asimétrica por los factores de ponderación.

6 DETERMINACIÓN DE LOS MAPAS FINALES DE RIESGO

6.1 Valoración de los Mapas de Vulnerabilidad Intrínseca

En general, esta metodología trabaja con los mapas de vulnerabilidad intrínseca del acuífero, elaborados por el SERNAGEOMIN a partir del método BGR. Éstos presentan diferentes cantidades de rangos de la vulnerabilidad; por ejemplo, para las regiones V y VIII los mapas presentan 7 y 8 rangos de esta variable, respectivamente. En este sentido, los distintos mapas son reclasificados y homogeneizados a fin de obtener para todos ellos solamente 5 rangos de vulnerabilidad. Esta reclasificación se realiza considerando las descripciones y características propias de cada rango en base a la caracterización de las propiedades geológicas e hidrogeológicas de los sustratos, tanto para roca consolidada y depósito no consolidado.

En el caso de tener un mapa de vulnerabilidad a la contaminación por otro método, este mapa deberá igualmente homogenizarse con el estándar de esta metodología, es decir a 5 rangos de vulnerabilidad.

Estos 5 rangos de vulnerabilidad son iguales a los de los mapas de Presión de Carga, de modo que su descripción, color en los mapas y valor matemático asignado para los siguientes cálculos corresponden también a los de la Tabla 5.6.

6.2 Cálculos para la obtención de los mapas finales de riesgo

Los mapas finales de riesgo a la acumulación de nitratos de origen agrícola, pecuario o agropecuario del agua subterránea, se obtienen mediante la superposición ponderada de los mapas de riesgo 1 y los mapas de vulnerabilidad intrínseca del acuífero.

Esta superposición, se realiza para cada celda unitaria de los mapas en el SIG, mediante la suma de los valores matemáticos asignados a cada uno de los 5 rangos de los valores de riesgo 1 y de vulnerabilidad intrínseca. Los factores de ponderación considerados para cada mapa son del 60% para los valores del riesgo 1 y 40% para la vulnerabilidad. Esta suma se representa en la siguiente ecuación y es representada además en la Figura 6.1

$$VRF_C = [0,60 \cdot VRI^* + 0,40 \cdot VVI^*]_c$$

donde

VRF_c : Valor obtenido del cálculo del Riesgo Final a la acumulación de nitratos en aguas subterráneas en una celda unitaria (c).

VRI^* : Valor matemático asignado al rango de riesgo 1 de una celda unitaria (c)

VVI^* : Valor matemático asignado al rango de vulnerabilidad intrínseca del acuífero en una celda unitaria (c).

Así, para cada una de las celdas se obtiene un valor numérico que corresponde a uno de los 5 rangos de Riesgo Final a la acumulación de nitratos de las aguas subterráneas, que se presentan en la Tabla 6.1.

La representación de estos resultados con los colores especificados corresponde a los Mapas Finales de esta metodología, del riesgo a la acumulación de nitratos de origen agrícola, pecuario o agropecuario de las aguas subterráneas. La obtención de uno u otro mapa, depende del valor de carga de N considerada en los cálculos anteriores, solamente la de origen agrario, pecuario o ambas conjuntamente.

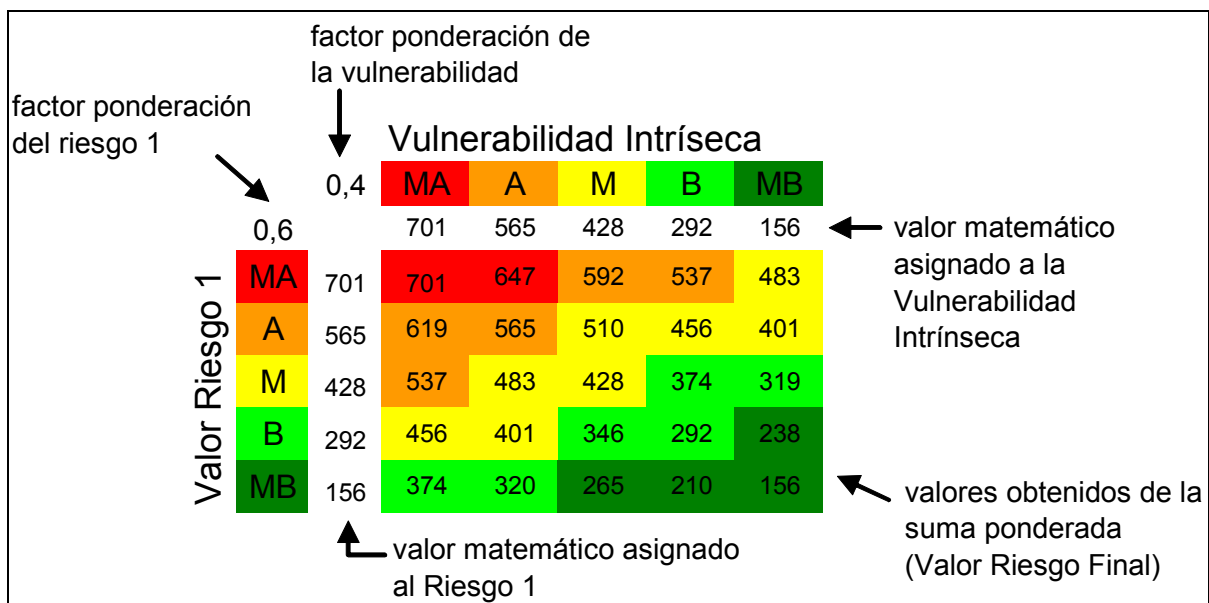







Figura 6.1. Representación del cálculo de superposición de los mapas de riesgo 1 y de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos para obtener los Mapas Finales de Riesgo a la acumulación de nitratos en aguas subterráneas. La matriz es asimétrica por los factores de ponderación que multiplican al valor matemático de cada rango de cada variable.

Tabla 6.1. Valores calculados, color en los mapas y clasificación del Riesgo Final a la acumulación de nitratos de origen agrícola, pecuario o agropecuario de las aguas subterráneas.

Clasificación del Riesgo Final a la acumulación de nitratos	Rangos de valores calculados que le corresponden a cada clase de Riesgo Final	Color asignado en los mapas
Muy alta (MA)	> 645	
Alta (A)	644,9 - 525	
Media (M)	524,9 - 395	
Baja (B)	394,9 - 266	
Muy baja (MB)	< 265,9	

7 GLOSARIO DE TÉRMINOS

j	:	Rubro productivo, pecuario o agrícola
i	:	Especie, de cultivo, o de tipo animal (ave engorda, ave reproductora, ave ponedora, bovino carne, bovino leche)
d	:	Distrito censal
c	:	Celda unitaria en el Sistema de Información Geográfica
R_{id}	:	Rendimiento promedio esperado del cultivo, por especie (i), por distrito censal (d), [Kg producto/ha]
P_{id}	:	Producción del cultivo promedio, por especie (i), por distrito censal (d), [Kg producto]
S_{id}	:	Superficie sembrada del cultivo, por especie (i), por distrito censal (d), [ha]
Dc_{ij}	:	Dosis demandada por el cultivo, por especie (i), por rubro (j), [Kg N/ha/año]
Cd_i	:	Coeficiente de demanda del cultivo, por especie (i), [Kg N/Kg producto/año]
CN_d	:	Carga bruta de nitrógeno de origen agrícola generada en un distrito censal (d), [Kg N/ha/año]
CN_{Ud}	:	Carga de N de origen agrícola residual en el suelo en un distrito censal (d), después de considerar la absorción de los cultivos, [Kg N/ha/año]
CN_{UVd}	:	Carga de N de origen agrícola residual en el suelo en un distrito censal (d), corregida por la eficiencia de uso (U), por la volatilización (V), [Kg N/ha/año]
CN_{UVdD}	:	Carga de N de origen agrícola residual en el suelo corregida por la eficiencia de uso (U), por la volatilización (V) y la desnitrificación (D) [Kg N/ha/año]
$\%ha_{ij}$:	Porcentaje de toda el área cultivada en un distrito censal (d), por el cultivo (i) del rubro (j).
U_j	:	Eficiencia fertilización nitrogenada por rubro (j), [valor: 0,6 en praderas y 0,5 en el resto de cultivos].
V_A	:	Pérdida de N por volatilización agrícola, [valor constante promedio nacional 0,05].

D	:	Pérdida de N por desnitrificación, [valor constante promedio nacional 0,10].
NE_i	:	Nitrógeno excretado por tipo animal y especie (i), [Kg N/ha/año]
NE_j	:	Nitrógeno excretado por rubro animal (j), [Kg N/ha/año]
NE_{Vi}	:	Nitrógeno excretado por tipo de animal (i) en un distrito censal (d) considerando las pérdidas por volatilización (V), [Kg N/ha/año]
NE_{Vjd}	:	Nitrógeno excretado por rubro animal (j) en un distrito censal (d) considerando las pérdidas por volatilización (V), [Kg N/ha/año]
NE_{VMjd}	:	Nitrógeno excretado por rubro animal (j) en un distrito censal (d) considerando las pérdidas por volatilización (V) y no-mineralización (1-M), [Kg N/ha/año]
NE_{VMUd}	:	Nitrógeno excretado en un distrito censal (d) considerando las pérdidas por volatilización (V), no-mineralización (1-M) y eficiencia de uso (U), [Kg N/ha/año]
NE_{VMUDd}	:	Nitrógeno excretado en un distrito censal (d) considerando las pérdidas por volatilización (V), no-mineralización (1-M), eficiencia de uso (U) y desnitrificación (D), [Kg N/ha/año]
Nc_i	:	Número de cabezas por tipo de animal y especie (i)
Nc_j	:	Número de cabezas por rubro animal (j)
P_{Ai}	:	Peso promedio Animal, por tipo animal y especie (i), en Kg animal
T_{Ei}	:	Tasa emisión de N, por tipo animal y especie (i), en Kg N/1000 Kg animal/día
P_{Nj}	:	Producción de Nitrógeno, por rubro (j), en Kg N/día/animal
V_p	:	Pérdida de N por volatilización pecuaria, [valor: 0,25 para purines y 0,15 para estiércoles].
M	:	Porcentaje de mineralización del N orgánico en el primer año, por rubro animal [valores de la Tabla 4.1].
U	:	Eficiencia de uso en la absorción del nitrógeno de origen pecuario, [valor constante promedio nacional 0,33].

- $\%NPur_i$: Porcentaje de Nitrógeno sobre los kilogramos de N totales excretados procedentes de las excretas en forma de purín, por tipo de animal y especie (i) [valores de la Tabla 4.3].
- $\%NEst_i$: Porcentaje de Nitrógeno sobre los kilogramos de N totales excretados procedentes de las excretas en forma de estiércol, por tipo de animal y especie (i) [valores de la Tabla 4.3].
- $\%Norg_j$: Porcentaje de Nitrógeno orgánico sobre los kilogramos de N totales excretados procedentes de las excretas totales, por rubro animal (j) [valores de la Tabla 4.4].
- $\%Norg_i$: Porcentaje de Nitrógeno orgánico sobre los kilogramos de N totales excretados procedentes de las excretas totales, por tipo de animal (i) [valores de la Tabla 4.4].
- F_{RS} : Factor riego/secano correspondiente a las hectáreas de un rubro (j) según su método de cultivo (bajo riego o secano) [valores promedio nacionales: 1,3 en riego y 1 en secano].
- $\overline{F_{RSd}}$: Factor riego/secano promedio de un distrito censal (d).
- F_{TR} : Factor Tipo de Riego correspondiente a las hectáreas cultivadas bajo un mismo Tipo de riego [valores promedio nacionales: 1,3 para Riego Tradicional, 1,15 para Riego Mecanizado y 1 para Riego con Micro-irrigación].
- $\overline{F_{TRd}}$: Factor Tipo de Riego promedio de un distrito censal (d).
- $ha\ Rubro_j$: Hectáreas cultivadas del rubro (j) en un distrito censal (d).
- $\%Riego_j$: Porcentaje de hectáreas del rubro (j) cultivadas bajo riego en un distrito censal (d).
- $\%Secano_j$: Porcentaje de hectáreas del rubro (j) cultivadas bajo secano en un distrito censal (d).
- $ha\ Rorad$: Hectáreas cultivadas bajo Riego Tradicional en un distrito censal (d).
- $ha\ RMec$: Hectáreas cultivadas bajo Riego Mecanizado en un distrito censal (d).
- $ha\ RMirr$: Hectáreas cultivadas bajo Riego con Micro-Irrigación en un distrito censal (d).

ha Riego : Hectáreas totales cultivadas bajo Riego en un distrito censal (d).

PCAR_d : Presión de Carga de N de origen agrícola residual en el suelo en un distrito censal (d) corregida por la eficiencia de uso (U), la volatilización (V), la desnitrificación (D) y los factores locales por disponibilidad de riego (F_{RS} , F_{TR}) [Kg N/ha/año].

PCP_d : Presión de Carga de N de origen pecuario residual en el suelo en un distrito censal (d) corregida por la volatilización (V), la no-mineralización (M), la eficiencia de uso (U) y la desnitrificación (D) [Kg N/ha/año].

PCAP_d : Presión de Carga de N de origen agropecuario residual en el suelo en un distrito censal (d) corregida por los distintos factores de balance en el suelo y de disponibilidad de riego [Kg N/ha/año].

IRM_c : Índice de Riesgo conjunto obtenido en el cálculo de la matriz topo-suelo-climática en una celda unitaria (c).

*IRM** : Valor matemático asignado al índice de Riesgo conjunto obtenido en la matriz topo-suelo-climática en una celda unitaria (c).

R_P : Valor del índice de riesgo correspondiente a la Precipitación (P) en una celda unitaria (c).

R_S : Valor del índice de riesgo de la textura del suelo (S) en una celda unitaria (c).

R_m : Valor del índice de riesgo procedente de la pendiente (m) en una celda unitaria (c).

VR1_c : Valor obtenido del cálculo del Riesgo 1 en una celda unitaria (c).

*VR1** : Valor matemático asignado al rango de riesgo 1 de una celda unitaria (c)

*VVI** : Valor matemático asignado al rango de vulnerabilidad intrínseca del acuífero en una celda unitaria (c).

VRF_c : Valor obtenido del cálculo del Riesgo Final a la acumulación de nitratos en aguas subterráneas en una celda unitaria (c).