



UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
Facultad de Ciencias
Escuela de Ciencias

PROFESOR PATROCINANTE:

Dr. Carlos Oyarzún Ortega

Instituto de Geociencias

Facultad de Ciencias

**CAMBIOS EN LA EXPORTACIÓN Y RETENCIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO
CAUSADO POR LA CONVERSIÓN DE BOSQUE NATIVO A PLANTACIONES
FORESTALES EN MICROCUENCAS DE LA CORDILLERA DE LA COSTA EN EL
SUR DE CHILE**

Tesis de Grado presentada como

parte de los requisitos para optar al

Grado de Licenciado en Ciencias

Biológicas.

PATRICIO OLEGARIO CÁRDENAS GONZÁLEZ

VALDIVIA-CHILE

2007

A MI MADRE.

A MI PADRE.

AGRADECIMIENTOS

Mis mas sinceros agradecimientos a mi profesor patrocinante, Doctor Carlos Oyarzún por su gran paciencia y comprensión, durante el desarrollo de esta tesis.

A mis padres, quienes han sido mi mayor sostén y mi mayor fuente de inspiración en los momentos más difíciles de mi vida.

A mis compañeros, Manuel Cartagena y Juanita Martel, por su apoyo y aportes de ideas para este trabajo.

A mis amigos de siempre, con los cuales he compartido momentos felices y amargos, gracias por su amistad.

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	1
1.1 SUMMARY.....	2
2. INTRODUCCIÓN.....	3
3. MATERIAL Y MÉTODOS.....	11
3.1 Área de Estudio.....	11
3.2 Recolección de Muestras.....	14
3.3 Análisis Químico.....	15
3.4 Exportación de Nutrientes.....	16
3.5 Retención de Nutrientes.....	16
3.6 Análisis Estadístico.....	17
3.6.1 Correlaciones Bivariadas.....	17
3.6.2 Análisis de Componentes Principales.....	17
4. RESULTADOS.....	19
4.1 Superficie Total.....	19
4.2 Uso de Suelo.....	20
4.3 Concentración de Nutrientes (nitrógeno y fósforo).....	23
4.3.1 Análisis de las Concentraciones Medias.....	23
4.3.2 Relación de las concentraciones media de N-NO ₃ y N-NH ₄ como componentes Del DIN y N-Total.....	27
4.3.3 Comportamiento de las Concentraciones Medias Durante el Período de Estudio.....	31

4.4 Exportación de Nitrógeno y Fósforo.....	36
4.5 Retención de Nitrógeno y Fósforo.....	45
4.6 Análisis de Componentes Principales.....	51
5. DISCUSIÓN.....	56
6. BIBLIOGRAFÍA.....	62
7. ANEXOS.....	68

1. RESUMEN

El principal objetivo de este estudio fue evaluar, los cambios producidos en la retención y exportación de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y sus efectos sobre la calidad del agua en bosques nativos y otros reemplazados por plantaciones exóticas. En seis pequeñas cuencas localizadas en la Cordillera de la Costa del Sur de Chile, se midió la concentración y flujo de $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, Nitrógeno Orgánico (DON) y Fósforo Total (P-Total) en la precipitación y en el agua de escorrentía. Nitrato fue la fracción dominante en la exportación de nitrógeno (>50%), especialmente en las cuencas dominadas por plantaciones exóticas. En la cuenca con bosque nativo el nitrato contribuye solo con el 35% de las exportaciones. La retención anual de nitrógeno y fósforo total fue mayor en la cuenca con bosque nativo, comparada con las cuencas con plantaciones exóticas. En la cuenca dominada por bosque nativo la retención de nitrógeno fue de 60%, mientras que en una cuenca dominada por plantaciones exóticas solo fue de 4 %. Las diferencias en la capacidad de retención de nutrientes probablemente están relacionadas, con las diferencias en la cubierta vegetal.

1.1 SUMMARY

The main objective of this study were to evaluate the changes produced in the retention and export of nutrients (nitrogen and phosphorus) and its effects on the water quality in native forests and others replaced by exotic plantations. In six small watersheds located at the Cordillera de la Costa in southern of Chile (40°), concentration and fluxes of NO₃-N, NH₄-N, Organic Nitrogen and Total Phosphorus (Total-P) in bulk precipitation and runoff water were measured. Nitrate was the dominant fraction in the nitrogen export (>50%), specially in the catchments dominated by exotic plantations. In the catchment with native forest, the nitrate only contributed with 35% of the exports. Annual retention of nitrogen and total phosphorus was greater in the catchment with native forest compared to the catchments with exotic plantations. In the watershed dominated by native forest the nitrogen retention was 60%, while in a catchment dominated by exotic plantations only was 4%. The differences in the nutrients retention capacity probably are related, with differences in the vegetation cover.

2. INTRODUCCIÓN

Chile posee el área mas extensa de bosques templado lluviosos de Sudamérica, lo que corresponde a mas de la mitad de los bosques templado lluvioso del hemisferio sur. Mundialmente, las únicas otras áreas de bosques templado lluvioso, con la mayor superficie están ubicados en el oeste de Canadá y USA. Los bosques lluviosos del sur de Chile y áreas adyacente de Argentina se localizan entre los 36°- 48° S, área definida como la Eco-región de los bosques lluviosos valdivianos (Figura1), recientemente incluida dentro de las eco-regiones mas amenazadas en el mundo, como parte de la iniciativa global 200 propuesta por la WWF y el banco mundial (Dinerstein *et al.* 1996). La destrucción del bosque a través de la conversión a plantaciones y terrenos agrícolas ganaderos, uso del fuego y prácticas de extracción no sustentables, constituyen un problema que aumenta la degradación de esta eco-región.



Figura 1. Ubicación de la Eco-región de los Bosques Templados Valdivianos.

El impacto antropogénico sobre los ciclos biogeoquímicos a escala local y global en los ecosistemas terrestres, ha llegado a constituir en las últimas décadas un serio problema ambiental. El N-atmosférico constituye alrededor del 99% del N global y puede entrar a la biosfera naturalmente por fijación biológica vía reducción bacteriana a NH_3 . En el periodo preindustrial el nitrógeno constituía el factor limitante para el crecimiento y productividad en los ecosistemas terrestres no agrícolas y, muy especialmente para los bosques templados a escala mundial (Galloway 1995). Esto ha cambiado drásticamente en las últimas décadas, ya que las actividades antropogénicas como los procesos de combustión de hidrocarburos, actividades agrícolas e industriales, han influenciado el ciclo global del N movilizándolo en cantidades semejantes a los procesos naturales, causando serios problemas ambientales (Vitousek.1994). Existen 3 aspectos principales a escala global asociados a este desbalance de los ciclos biogeoquímicos: (1) el de N_2O , un potente gas invernadero que se ha incrementado en un 0,25% anualmente en las últimas décadas, (2) aumentos en la precipitación de amonio y nitrato que promueve la acidificación del suelo y del agua, y (3) incrementos de amonio y nitrato en la escorrentía y agua subterránea, que resulta en la eutrofización de los cuerpos de agua (Henriksen & Hessen 1997).

Muchos ecosistemas terrestres son deficientes en N y, consecuentemente tienen una pronunciada capacidad de retención de nitrógeno inorgánico. Cuando las tasas de deposición exceden la capacidad de consumo, y/o el daño de las raíces de los árboles causado por la acidificación reduce la capacidad de absorción y transporte, se esperaría que las concentraciones de nitrato en las aguas superficiales y subterráneas se incrementen. Habitualmente, se consideran que los bosques nativos del sur de Chile son deficientes en nitrógeno, ya que las entradas vía atmósfera

son reducidas especialmente en la cordillera de la costa (Hedin *et al.* 1995). En el caso de los bosque de *Nothofagus* de la cordillera de los Andes, se ha reportado (Godoy *et al.* 1999, 2001) que las concentraciones y flujo de nitrato y amonio en las precipitaciones son relativamente mayores lo cual podría reflejar una cierta influencia de las actividades agrícola ganaderos desarrolladas en el Valle Central, debido al transporte de las masas de aire provenientes del oeste. Sin embargo, las concentraciones en el agua de escorrentía son extraordinariamente pequeñas indicando una fuerte retención por parte del suelo y vegetación en estos ecosistemas boscosos.

El bosque y plantaciones forestales del Valle Central del sur de Chile estarían sometidos a mayores cargas de N como lo sugieren las altas concentraciones de NH_4^+ encontrada en el agua de lluvia (Oyarzún *et al.* 2002). Una carga adicional, y que podría ser de mayor importancia, la constituye la depositación seca de NH_3 por la cercanía a los centros de emisión, la cual no ha sido cuantificada con precisión, pero resultados preliminares en el Valle Central cerca de Paillaco, indican altas concentraciones. Estas cargas nitrogenadas probablemente se incrementen fuertemente en el futuro, como lo indican las proyecciones en el consumo de fertilizantes nitrogenados (Rojas. 1990) y aumentos sostenidos de la producción ganadera-lechera con el consiguiente incremento en la producción de desechos. Es consecuentemente razonable suponer que estas concentraciones de compuestos nitrogenados, tendrán efectos crecientes sobre los ecosistemas boscosos de las zonas cercanas, ya que habitualmente los bosques son eficientes filtros pudiendo interceptar y retener altas cantidades de compuestos nitrogenados vía entradas atmosféricas. Por otro lado los bosques son fuentes de agua de alta calidad para el consumo humano por lo que el incremento en la depositación de NH_4 puede degradar estas fuentes de

abastecimiento. Actualmente, (Nissen *et al.* 2000) han documentado que las aguas subterráneas del Valle Central (41° S), las concentraciones de amonio, manganeso, fosfato y aluminio, presentan valores muy superiores a los límites permitidos como fuente de agua potable, incluso algunos con contaminación microbiológica. También (Oyarzún *et al.* 1997) han medido altas concentraciones de nitrato y amonio en el agua de escorrentía de microcuencas con actividad agrícola ganadera en la zona del lago Rupanco.

Las especies forestales tienen distinta capacidad para atrapar contaminantes y diversas vías estratégicas para asimilar y consumir nitrógeno proveniente de la deposición atmosférica. En general, los árboles de especies caducifolias son menos eficientes en capturar deposición seca de nitrógeno que las coníferas (Brown & Iles 1991). Diversas investigaciones han indicado que las especies coníferas liberan cantidades mayores de N al agua que las especies caducifolias (De Vries & Jansen 1994, De Schrijver *et al.* 2000), en las zonas con altas cargas de deposición atmosférica. También se ha demostrado que la capacidad de neutralización o capacidad buffer frente a la deposición, es mayor en los bosques deciduos que en los bosques de coníferas (Amenzaga *et al.* 1997). Comparaciones entre bosques de *Eucaliptus* y plantaciones de *Pinus radiata* en Australia en zonas con baja deposición atmosférica (Crockford *et al.* 1996 a y b), han mostrado que los procesos de enriquecimiento químico del agua difieren entre especies deciduas y coníferas. También se puede deducir que las coníferas como *Pinus radiata*, pueden capturar mayores cantidades de contaminantes debido a que son siempre verdes y a que las acículas tienen un mayor índice de área foliar que las especies deciduas. De acuerdo con esto es razonable suponer que las plantaciones de *Pinus radiata* interceptan mayores cantidades de compuestos nitrogenados inorgánicos reducidos (NH_Y), especialmente vía deposición seca que los bosques

nativos deciduos de *Nothofagus*, por lo tanto, es posible esperar un mayor enriquecimiento de nitrógeno inorgánico (NH_4^+ y NO_3^-) en los flujos de agua al nivel del suelo y dosel dentro de una plantación de pinos. Además se supone que, el bosque nativo tendría una mayor capacidad de retener nitrógeno y carbono, en comparación con las plantaciones exóticas, debido a su mayor biodiversidad y riquezas de sotobosque.

La química de las precipitaciones en el sur de Chile refleja una de las más cercanas aproximaciones a las condiciones atmosféricas pre-industriales en el mundo. La caracterización química de las precipitaciones del sur de Chile (40° a 52° S) ha resultado en una estimación de la tasa de nitrógeno inorgánico ($\text{NO}_3\text{-N}+\text{NH}_4\text{-N}$) menor a $1 \text{ Kg. N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en la cordillera de la costa (Hedin *et al.* 1995) y menor a $5 \text{ Kg. N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en la cordillera de los Andes (Godoy *et al.* 1999). Sin embargo, debido al incremento de las actividades agrícolas y urbanas se podría esperar un aumento creciente en estas tasas de depositación especialmente en el Valle Central y precordillera andina. La respuesta potencial en el ciclo del nitrógeno en los bosques prístinos y plantaciones forestales en el sur de Chile ante una creciente tasa de depositación no es clara. Sin embargo, algo de información existe concerniente al ciclo del N de estos bosques prístinos, a pesar de que la discusión de que si estos bosques son limitados por N o P aún esta vigente. Un mejor entendimiento del ciclo interno del N y un análisis del escenario de las tendencias futuras de depositación de N, deberían proveer una mejor información acerca del destino potencial del nitrógeno almacenado en los ecosistemas boscosos del sur de Chile (Pérez *et al.* 1998). En orden a predecir los efectos de la depositación de N en ecosistemas boscosos también es importante cuantificar la contribución de N-orgánico en el balance de nitrógeno, ya que las pérdidas de nitrógeno orgánico disuelto (DON), pueden constituir una importante entrada de N a los recursos

hídricos superficiales y subterráneos (Andersen & Gundersen 2000). Investigaciones recientes (Perakis & Hedin 2001,2002; Van Bremen 2002) han demostrado que los bosques nativos prístinos del sur de Chile sometidos a bajas cargas de N atmosférico, exportan vía escorrentía superficial principalmente N orgánico.

Hipótesis

De acuerdo con los antecedentes expuestos anteriormente, en este estudio se plantea la hipótesis que, **en las cuencas con una química de las precipitaciones equivalentes el agua de escorrentía superficial con plantaciones exóticas, mostrará una cantidad mayor de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en comparación con cuencas de bosque nativo.**

Objetivo General

El objetivo general de este estudio es evaluar los cambios producidos en los flujos y capacidad de retención de nitrógeno y fósforo en cuencas donde existe recambio de bosque nativo por plantaciones forestales.

Objetivos Específicos

- Determinar los flujos de agua por precipitación y escorrentía superficial en las microcuencas en estudio.
- Determinar la concentración, exportación y retención de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en las cuencas con plantaciones exóticas y bosque nativo.
- Estudiar cuales son los factores a los que se deben estas diferencias en las concentración, exportación y retención de nutrientes (nitrógeno y fósforo), en las microcuencas en estudio.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1 Área de Estudio

Corresponde a 6 cuencas costeras de la provincia de Valdivia (comuna de Corral). Estas cuencas ordenadas desde el interior hacia la costa, son La Plata (LPLA), Guindos (GUIN), Joaquines (JOAQ) Joaquines 2 (JOA2), San Juan (SJUA) y Las Minas (LMIN). Cada uno de los nombres otorgados a las cuencas corresponde a los flujos de agua principal que la drena. La ubicación de las cuencas se muestra en la Figura 3 y Cuadro 1.

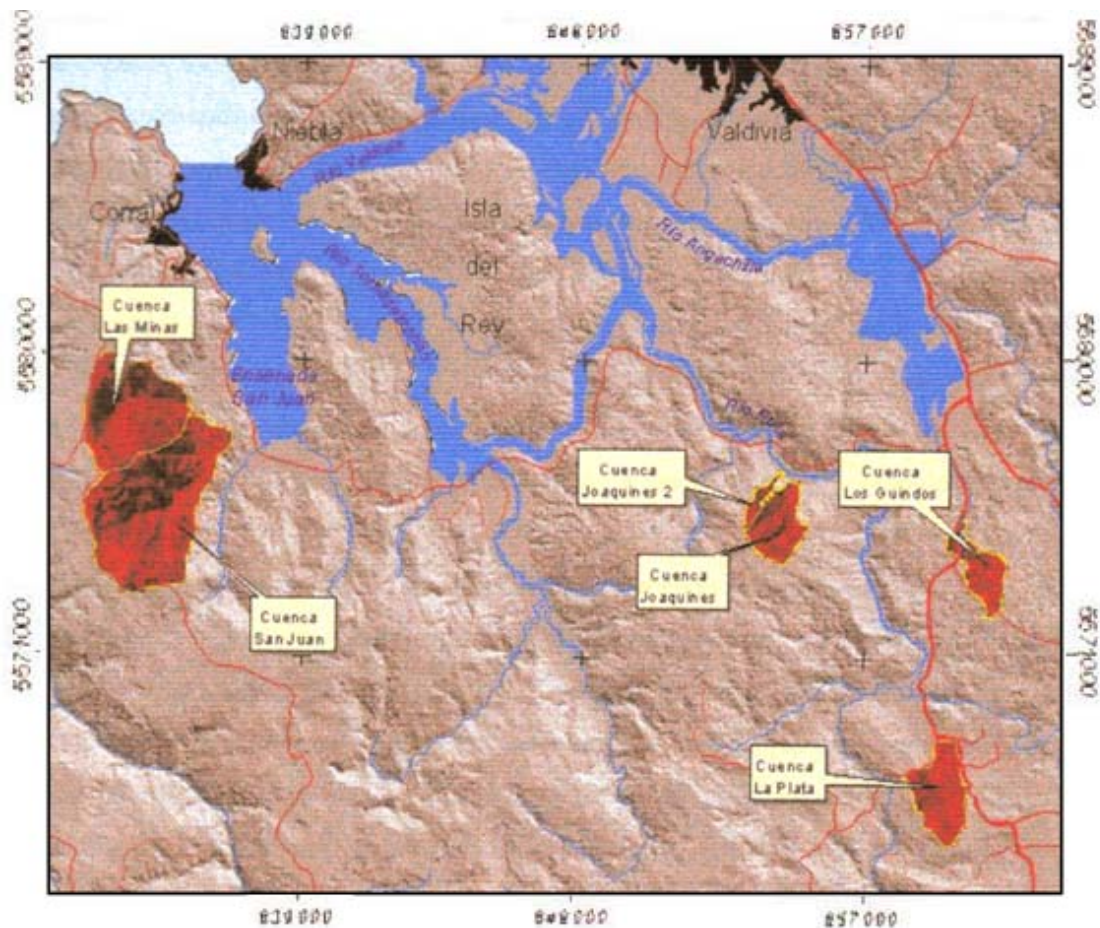


Figura 3. Ubicación de las cuencas estudiadas, comuna de Corral, provincia de Valdivia.

Cuadro 1. Coordenadas geográficas de las cuencas estudiadas.

Cuenca	Coordenadas Geográficas (°)	
	Longitud	Latitud
Guindos (GUIN)	73° 07' 28"	39° 57' 26"
Joaquines 2 (JOAQ2)	73° 11' 34"	73° 56' 42"
Joaquines (JOAQ)	73° 11' 19"	39° 56' 53"
Las Minas (LMIN)	73° 24' 55"	39° 55' 55"
La Plata (LPLA)	73° 07' 32"	40° 01' 04"
San Juan(SJUA)	73° 24' 46"	39° 56' 04"

La vegetación asociada a las cuencas puede separarse en 2 grupos, el primero corresponde a las dos cuencas localizadas hacia el interior, GUIN y LPLA. El bosque nativo asociado corresponde principalmente a renovales de roble (*Nothofagus obliqua*), con acompañantes como ulmo (*Eucryphia cordifolia*), Olivillo (*Aextoxicon punctatum*) y Tapa (*Laureliopsis philippiana*). En ambas cuencas se observan además áreas mas abiertas dominadas por Notro (*Embothrium coccineum*) o Maqui (*Aristotelia chilensis*), En la cuenca GUIN se observan algunos individuos de Coihue (*Nothofagus dombeyi*) asociados a los cursos de agua. En áreas con plantaciones, la vegetación asociada a los esteros es principalmente Espinillo (*Ulex europaeus*) y Quila (*Chusquea quila*). Las plantaciones forestales presentes son, en ambos casos, de *Eucaliptus glóbulus* aunque difieren en edad entre cuencas.

El otro sector corresponde a las cuencas localizadas adyacentes a la ensenada de San Juan, hacia la Costa. Aquí la vegetación nativa esta compuesta principalmente por Renovales de Canelo (*Drymis winteri*), características de esta área de la Cordillera de la Costa y que domina producto de su regeneración posterior a las cortas a la tala rasa seguidas de quemas, con el fin de introducir ganado. Posteriormente, estos terrenos han sido abandonados, lo que facilita la regeneración de

Drymis winteri (Donoso, 1993). A esta especie le acompañan principalmente exponentes de la familia de las mirtáceas, como luma (*Amomyrtus luma*), arrayán (*Luma apiculata*) y meli (*Amomyrtus meli*). En las partes altas de las cuencas de LMIN y SJUA se encuentran bosques adultos dominados por alerce (*Fitzroya cupressoides*), mañío macho (*Podocarpus nubigena*), Coigue de Chiloé (*Nothofagus nítida*), Ulmo (*Eucryphia cordifolia*), Olivillo (*Aextoxicon punctatum*) y Tapa (*Laureliopsis philippiana*). Las áreas bajas de estas cuencas se encuentran desprovistas de bosque, manteniendo praderas, matorrales y matorrales-pradera con fuerte presencia de espinillo (*Ulex europaeus*), especie introducida y fuertemente invasora, que es utilizada como talaje de invierno por los animales vacunos del sector.

En este sector las plantaciones son de dos tipos, la primera de ellas es la clásica plantación extensiva de las empresas forestales. En la cuenca JOAQ y JOA2 dominan las plantaciones de *Eucalyptus nitens* de propiedad de forestal AnChile, En la cuenca LMIN se encuentra una plantación joven de cuatro años en la sección alta de la cuenca, de propiedad de forestal Valdivia S.A. Otro tipo de plantaciones son aquellas realizadas por pequeños propietarios, generalmente con apoyo de INDAP o CONAF, y que abarcan superficies menores a una hectárea. Los objetivos de estos programas son generalmente la obtención de metro ruma para comercialización o leña. Este tipo de plantaciones se encuentra en la cuenca LMIN.

El sustrato geológico es un complejo metamórfico que consiste principalmente de mica esquistos con intercalaciones de cuarzo. De acuerdo con la IREN-CORFO-UACH (1978) dos series de suelo se presentan en la cordillera de la costa: en las cuencas, San Juan (SJUA) y Las Minas

(LMIN) a altitudes entre 400 a 750 m. s.n.m los suelos son derivados de mica esquistos, con texturas franco-arcillosas y profundidades medias (Serie Hueycolla). En las otras cuencas, a menores altitudes, los suelos son principalmente del tipo rojo arcillosos (Serie Los Ulmos) derivados de cenizas volcánicas antiguas y depositados sobre el complejo metamórfico. Son suelos de textura arcillosa y profundos a muy profundos (>120 cm).

El clima general es húmedo templado con una precipitación media anual entre 2000 a 4500 mm para el área de estudio. La temperatura media anual es de 12 ° C (media de enero = 17° C, media de Julio = 7,6° C).

3.2 Recolección de muestras

Las muestras de agua de las precipitaciones se recolectaron con dos pluviómetros de 2 L de capacidad, instalados a 100 cm sobre el suelo, en la desembocadura de la cuenca San Juan, localizada a 10 km del Océano Pacífico. Se asumió que las concentraciones de N y P en la lluvia eran similares en todas las demás cuencas, ya que no había fuentes antropogénicas en toda el área de estudio. Mientras que las muestras de agua de la escorrentía se recolectaron en la salida de las respectivas cuencas de drenaje.

Para el análisis químico de las aguas se recolectaron muestras compuestas con el propósito de completar un análisis mensual para cada cuenca. Para ello, se recolectaba 0,5 L de agua por cada cuenca utilizándose botellas de polietileno. Una vez obtenida la muestra era debidamente rotulada

con el nombre de la cuenca y fecha de recolección. Posteriormente, las muestras eran llevadas al Instituto de Geociencias donde eran congeladas. Posteriormente, cada muestra mensual para cada una de las cuencas era transportada al Laboratorio de Química del Agua del Instituto de Zoología de la Universidad Austral, donde era realizado el análisis químico de las muestras.

Las botellas eran lavadas periódicamente con agua destilada y HCL 50% antes de cada muestreo. El lavado general de las botellas se realizaba con agua desionizada antes de cada muestreo, quedando expuestos un máximo de 3 días antes de la recolección.

3.3 Análisis químico

Para la determinación de NO_3 se utilizó el método espectrofotométrico de salicilato de sodio y de sal de Seignette, obteniéndose de este modo el valor del Nitrógeno del Nitrato ($\text{NO}_3\text{-N}$) y para el NH_4 se determinó con el método del indofenol azul e hipoclorito de sodio (método de Solórzano) y se obtiene el nitrógeno de amonio ($\text{NH}_4\text{-N}$). El nitrógeno Inorgánico Disuelto (DIN) corresponde a la suma de las mediciones de Nitrato y Amonio. El Nitrógeno Orgánico Disuelto (DON) se determinó mediante el método Kjendahl, utilizando digestión con ácido sulfúrico. El nitrógeno total (N-total) corresponde a la suma de DIN + DON. El Fósforo Total (P-Total) se cuantificó mediante el método de tartrato antimónico después de una digestión con ácido sulfúrico y perhidrol al 30% (APHA – AWWA – WPFC, 1975). Todos estos valores son entregados en $\mu\text{g L}^{-1}$.

3.4 Exportación de nutrientes

Una vez determinados los valores de concentración media mensual (obtenido a partir del análisis ponderado de una muestra por cuenca al mes), es necesario determinar la exportación de cada cuenca. Para ello, cada valor medio obtenido se considera como un valor diario de exportación, luego este valor es ponderado por el caudal medio mensual exportado por la cuenca para así obtener un valor de exportación de nutrientes (Kg. ha^{-1}). Este procedimiento se puede expresar de la siguiente manera:

$$\text{Exp} = (\partial * Q)/100000$$

Donde Exp: exportación de nutrientes desde la cuenca (NO_3^- , NH_4^+ , DIN, DON, N-Total y P-Total).

∂ : Concentración media mensual de nutrientes ($\mu\text{g L}^{-1}$).

Q: Caudal (L m^{-2}).

3.5 Retención de nutrientes

Con la información de los flujos de entrada (precipitación) y salida (escorrentía) de agua y las concentraciones de los elementos se determinó la capacidad de retención de nitrógeno de las cuencas, mediante la relación $([\text{entradas}-\text{salidas}]/\text{entradas})$ (Loveett et al 2000).

3.6 Análisis Estadístico.

3.6.1 Correlaciones Bivariadas

Se utilizó el análisis de correlaciones bivariadas, en nuestro caso utilizamos el coeficiente de correlación de Pearson con su respectivo nivel de significancia, para establecer la relación entre la retención total de nutrientes (nitrógeno y fósforo) y las proporciones de bosque nativo y plantaciones de las cuencas estudiadas. El programa utilizado fue el SPSS 11,5.

3.6.2 Análisis de Componentes Principales

Se utilizó el análisis de componentes principales (ACP), método multivariante cuyo objetivo es convertir un problema de información estadística muy compleja (muchas variables de tipo cuantitativo medidas en cada unidad de observación) en otro casi equivalente pero más manejable (pocas nuevas variables) sin pérdida significativa de información. La técnica obtiene combinaciones lineales de todas las variables originales que sean ortogonales entre sí. De esta forma se obtiene un subconjunto de nuevas variables que son independientes entre sí, pero que están altamente correlacionadas con las variables originales, denominadas componentes principales, las que ordenadas en forma decreciente según su varianza, permiten explicar el porcentaje de variabilidad de los datos, por cada componente. Los valores y vectores característicos se obtienen diagonalizando la matriz de varianza y co-varianza o alternativamente de la matriz de correlaciones.

Consecutivamente, cada observación de la muestra obtiene una puntuación en cada una de las componentes principales seleccionadas, lo que permite ordenar las observaciones en base a información multivariante. En este estudio se obtuvo las componentes principales diagonalizando la matriz de correlaciones, puesto que las distintas variables tienen diferentes unidades de medidas y cada variable aporta con la misma importancia.

Para realizar este análisis se consideraron tanto las variables de vegetación y uso de suelo, fisiográficas y las correspondientes a concentración y exportación total de nutrientes (nitrógeno y fósforo). El detalle de las variables ocupadas en este análisis se presenta en el anexo I. Utilizando el software SPSS 11.5 se ingresó la base de datos original obteniéndose así la matriz de correlación múltiple, que permite la selección de las variables con mayor correlación ($R^2 > 0.7$).

Luego se realizó un análisis de componentes principales con respecto a la concentración y exportación total de nutrientes. El análisis de componentes realizado, abarca la totalidad de las variables seleccionadas desde la matriz de correlación, para poder determinar cuáles de estas variables tiene mayor importancia en la determinación del recurso calidad del agua en función de las variables analizadas.

4. RESULTADOS

4.1 Superficie Total

Se obtuvieron los tamaños de las cuencas en estudio a partir de datos obtenidos de otras investigaciones realizadas en estas cuencas hidrográficas. Como se observa en la Figura 4, las cuencas están ordenadas en orden descendente en cuanto a tamaño, siendo la de mayor tamaño la cuenca de San Juan (SJUA) con 1451,9 ha, seguida por Las Minas (LMIN) que posee 867,8 ha. Después están las cuencas, La Plata (LPLA), con 385,6 ha, Joaquines (JOAQ), con 281,7 ha y finalmente la cuenca Joaquines 2, con solo 54,8 ha.

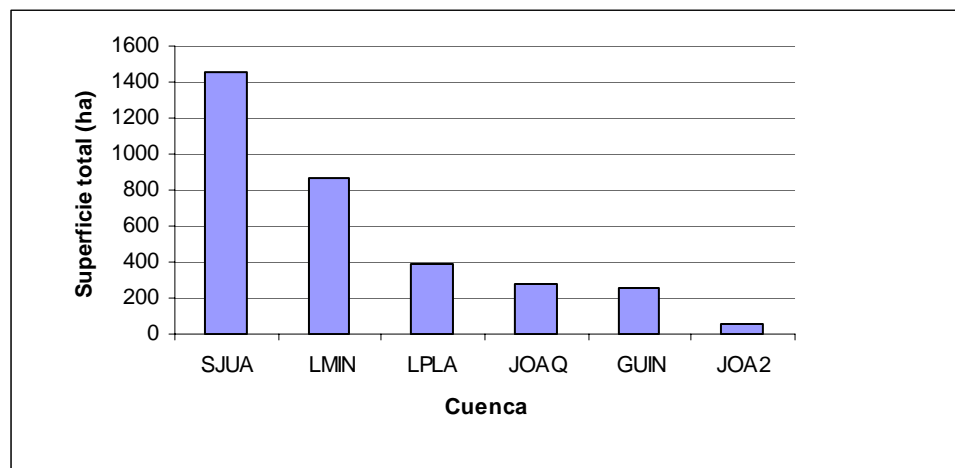


Figura 4. Superficie total del suelo (ha) de las cuencas en estudio.

4.2 Uso de Suelo

También se obtuvieron las características del uso de suelo de las cuencas en estudio, de este modo se estableció la proporciones de uso de suelo, como se observa en el Cuadro 3 Figura 5. La cuenca SJUA posee un 92% de bosque nativo (BNT) lo que equivale a 1337 ha de la superficie total, un 6% corresponde al uso de matorral (MTR) equivalente a un 85,7 ha y un 2% a pradera (PRA) con 29,2 ha. Esta cuenca no posee plantaciones forestales. En cambio la cuenca Joaquines 2 (JOAQ2) posee gran parte de su superficie con plantaciones forestales, las que alcanzan un 76% igual a 41,6 ha. Los otros uso de suelo de esta cuenca son matorrales, con 14% igual a 7,5 ha; bosque nativo, con un 7% que corresponde a 3,7 ha y áreas sin vegetación (SVE) con un 4% equivalente a 1,9 ha.

Cuadro 3. Proporción de uso de suelo en las cuencas en estudio.

Uso de Suelo	SJUA	JOA2	LPLA	GUIN	LMIN	JOAQ
BNT	0,92	0,07	0,18	0,70	0,68	0,47
MTR	0,06	0,14	0,18	0,06	0,13	0,13
PRA	0,02	0	0	0	0,05	0,05
PLT	0	0,76	0,63	0,22	0,14	0,33
SVE	0	0,04	0	0,02	0	0,02
Total general	1	1	1	1	1	1

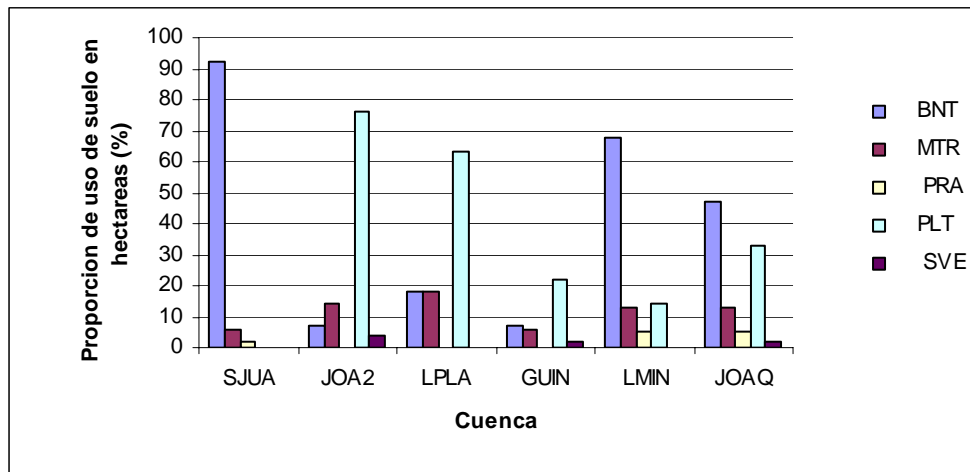


Figura 5. Proporciones de uso de suelo de las cuencas estudiadas.

Las otras cuatro cuencas poseen un mosaico con distintas proporciones de uso de suelo, tal como se muestra en el Cuadro 3 y Figura 5. Dado la diferente proporción de usos como plantaciones y praderas, se tienen intensidades diferentes de mosaicos. En el caso de La Plata gran parte son plantaciones forestales con un 63%, lo que equivale a 244,6 ha. Las plantaciones forestales se encuentran distribuidas en prácticamente toda la cuenca, relegando a los matorrales a las áreas de protección de los cauces con 70,2 ha (18%). El bosque nativo existente en la cuenca es de 68,5 ha (18%) corresponde principalmente a renovales de Roble (*Nothofagus obliqua*).

La cuenca Guindos (GUIN) posee una superficie total de bosque nativo de 176,2 ha equivalentes a un 70% de la superficie total, constituido por bosque renoval siempre verde. El uso plantación forestal alcanza 56,1 ha (22%). Existe 15,1 ha de matorral (6%) relegadas solamente a áreas de protección de cauces, los cuales están compuestos principalmente por *Chusquea quila*, especialmente en el área de plantación forestal.

La cuenca Las Minas (LMIN), segunda en tamaño en este estudio, posee una superficie de bosque nativo (BNT) de 588,7 ha abarracando un 68% de la superficie, compuesto principalmente por Canelo y Mirtáceas. Estas últimas, forman bosquetes junto con otras especies en torno a los cursos de agua, formando a veces galerías que cubren en su totalidad al estero principal. Se trata de una cuenca con una fuerte alteración antropica, debido principalmente al pastoreo de ganado vacuno en las áreas del bosque. Los animales forman pequeños senderos que atraviesan el curso de agua principal en varios sectores de la porción baja y media de la cuenca. La plantación forestal alcanza un área de 117,4 (14%). Los terrenos de matorral y praderas corresponden a 115,8 y 42,9 ha, respectivamente (13% y 5%), y se localizan en la porción baja de la cuenca.

La cuenca Joaquines (JOAQ) es la que posee un mosaico más heterogéneo de uso de suelo. Las plantaciones forestales de esta cuenca son las mismas que de JOA2, es decir son plantaciones *Eucalyptus nitens* de 9 años de edad, correspondiendo a una segunda rotación posterior a *Pinus radiata* y ocupan 93,2 ha (33%). El bosque nativo de esta cuenca alcanza 131,2 ha (47%), las praderas de pastoreo ocupan 15 ha (5%) y un 2% de la superficie de la cuenca corresponde a caminos forestales.

4.3 Concentración de Nutrientes (Nitrógeno y Fósforo)

4.3.1 Análisis de las Concentraciones Medias.

La concentración de Nitrógeno en el periodo de Junio del 2003 a Mayo del 2005 sufrió variaciones debidas principalmente a la distribución estacional de las precipitaciones y su importancia en la descarga de las cuencas hidrográficas. No obstante, las concentraciones medias de Nitrógeno ofrecen una primera visión del flujo de este elemento en las cuencas estudiadas, como se observa en el Cuadro 4

Cuadro 4. Concentración media ($\mu\text{g L}^{-1}$) de Nitrógeno en el agua de escorrentía, para el periodo de estudio en las cuencas hidrográficas. Las desviaciones estándar son mostradas entre paréntesis.

Cuenca	NH4-N	NO3-N	DIN	DON	N Total	P Total
SJUA	3,9 (4,7)	11,9 (5,2)	15,8 (8,2)	18,6 (29,3)	34,4 (32,5)	27 (15,5)
LMIN	4,9 (4,4)	51,9 (17,3)	56,8 (16,4)	23,1 (33,4)	79,9 (40,8)	25,4 (15,8)
GUIN	4,0 (4,4)	44,7 (11,9)	48,7 (11,5)	19,7 (16,0)	68,4 (22,1)	32,3 (16,1)
JOAQ	4,9 (5,2)	39,8 (9,8)	44,7 (11,0)	16,5 (17,1)	61,2 (24,2)	27,4 (20,5)
LPLA	6,6 (4,8)	52,4 (18,3)	59,0 (21,1)	25,6 (15,6)	84,6 (25,6)	28,2 (19,0)
JOAQ2	4,5 (4,0)	41,3 (17,7)	45,8 (17,3)	18,3 (17,9)	64,1 (22,1)	35,9 (19,1)

No se observan diferencias significativas entre los valores de concentración media de amonio entre las cuencas. El bajo valor promedio de la cuenca San Juan (promedio $3,9 \mu\text{g L}^{-1}$ y ds $4,7 \mu\text{g L}^{-1}$) se compensa con los altos valores de desviación estándar en relación con los promedios de estas cuencas (Figura 6).

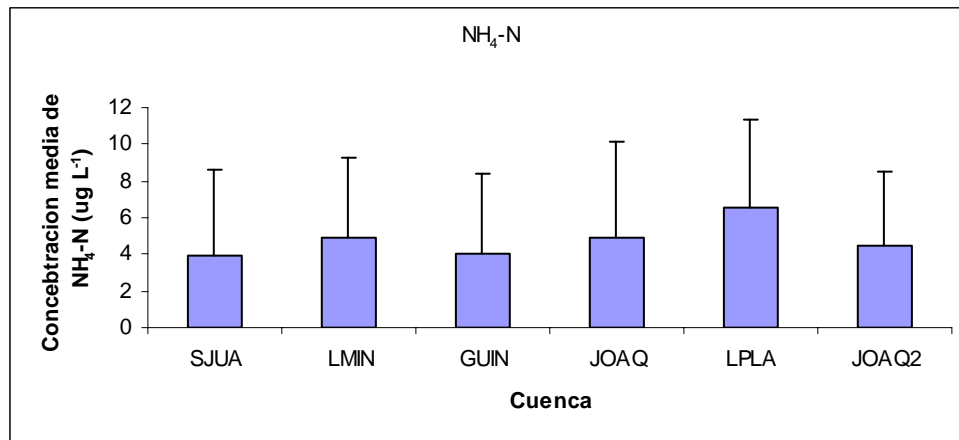


Figura 6. Concentración media y desviación estándar de NH₄-N para el periodo de estudio.

Se observan diferencia significativa entre los valores medios del nitrato para las cuencas, esto es evidente cuando relacionamos la cuenca San Juan con las demás (Figura 7). San Juan presenta un valor medio de 11,9 µg L⁻¹ (ds 5,2 µg L⁻¹), Luego las demás cuencas forman un grupo el cual no presenta diferencias significativas entre ellas, siendo la cuenca La Plata la con mayor valor promedio de concentración de N-NO₃ con 52,4 µg L⁻¹ (ds 18,3 µg L⁻¹).

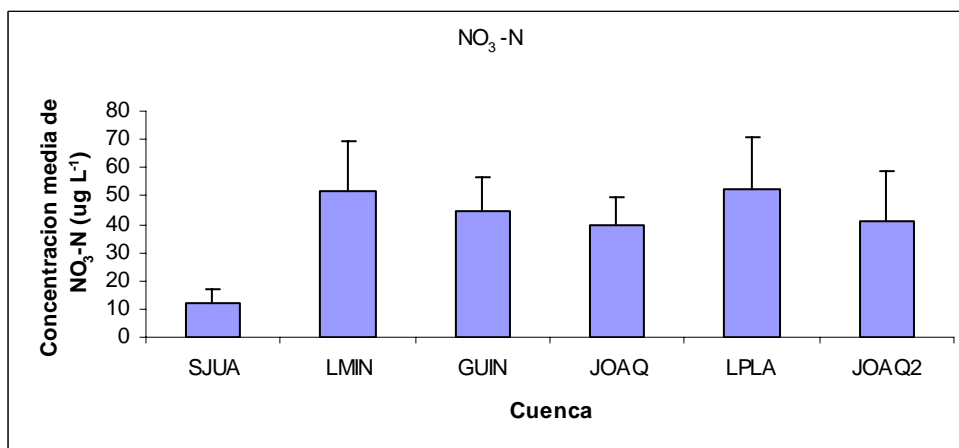


Figura 7. Concentración media y desviaciones estándar de NO₃-N para el periodo de estudio.

Como el mayor componente en la concentración de Nitrógeno Inorgánico Disuelto corresponde al nitrato (Figura 11), se producen las mismas diferencias significativas en el caso del DIN y por consiguiente también de N-Total, el que esta mayormente constituido por la fracción inorgánica de nitrógeno que por el Nitrógeno Orgánico Disuelto (DON) (Figura 12). De esta manera y como se muestra en la Figura 8 Cuadro 4, la cuenca San Juan presenta un valor promedio de Nitrógeno Inorgánico Disuelto significativamente inferior las otras cuencas (promedio $15,8 \mu\text{g L}^{-1}$, ds $8,2 \mu\text{g L}^{-1}$), Lo mismo pasa con el Nitrógeno Total, donde la cuenca San Juan tiene una media de $34,4 \mu\text{g L}^{-1}$ (ds $32,5 \mu\text{g L}^{-1}$) Figura 9. En cuanto al DIN la cuenca con mayor concentración es La Plata (LPLA), con $59 \mu\text{g L}^{-1}$ (ds $21,1 \mu\text{g L}^{-1}$), además esta cuenca presenta la mayor concentración de N-Total en el periodo de estudio, con un promedio de $84,6 \mu\text{g L}^{-1}$ (Figura 9).

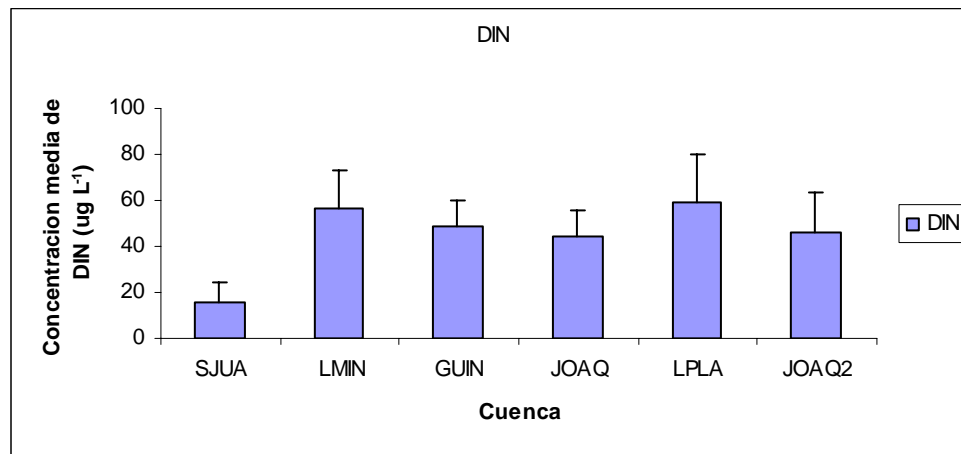


Figura 8. Concentración media y desviaciones estándar de DIN para el periodo de estudio.

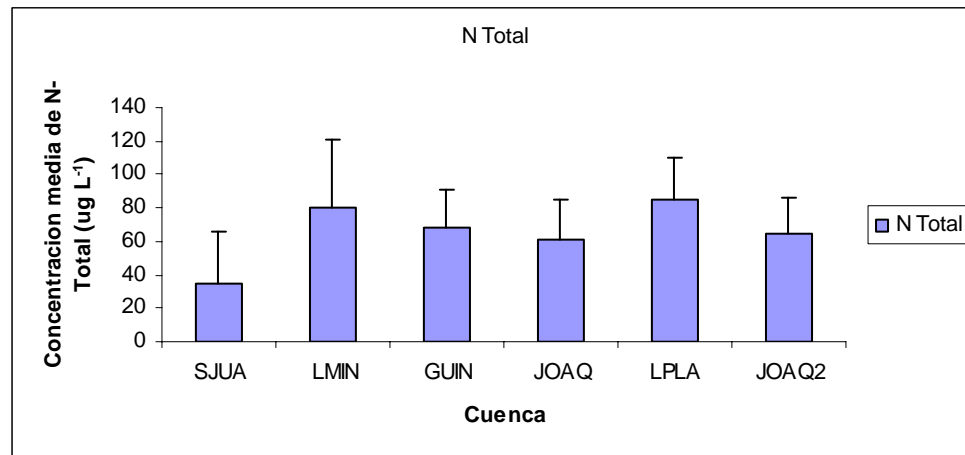


Figura 9. Concentración media y desviaciones estándar de N-Total para el periodo de estudio.

Con respecto al nitrógeno orgánico disuelto, no se observan diferencias significativas entre las concentraciones medias de las cuencas, además en todas las cuencas se observan desviaciones estándar altas, lo que significa una alta variabilidad de este componente durante el periodo de estudio. La cuenca La Plata (LPLA) es la que posee la mayor concentración media con $25,6 \mu\text{g L}^{-1}$ (ds $15,6 \mu\text{g L}^{-1}$), y la cuenca con menor concentración media es Joaquina (JOAQ) con $16,5 \mu\text{g L}^{-1}$ (ds $17,1 \mu\text{g L}^{-1}$). Cuadro 4, Figura 10.

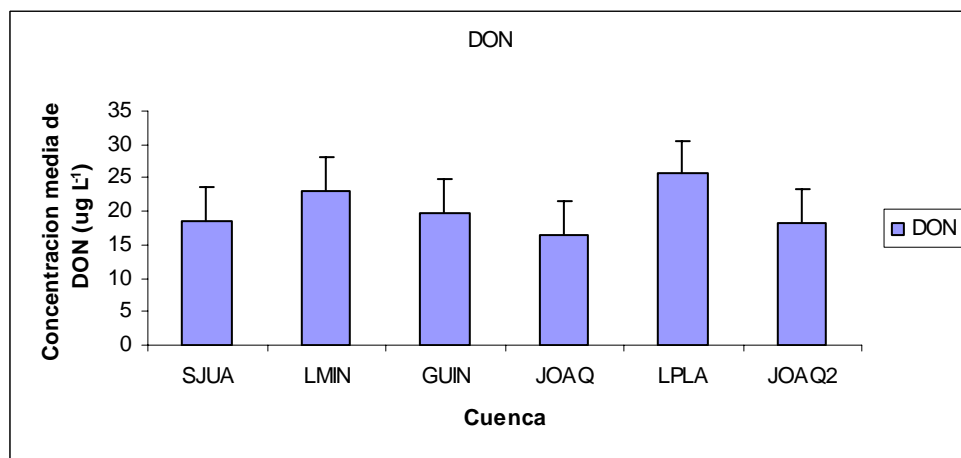


Figura 10. Concentración media y desviaciones estándar de DON para el periodo de estudio.

4.3.2 Relación de las concentraciones medias de N-NO₃ y N-NH₄ como componentes del DIN y N-Total

En general las concentraciones de N-NO₃ son ampliamente superiores a las de N-NH₄ como componentes del DIN. Además generalmente las concentraciones de N-NH₄ no superan el 20%, con excepción de San Juan que alcanza el 25% del DIN (3,6 µg L⁻¹), La menor proporción de amonio la posee la cuenca Los Guindos con un 8% del DIN (4,0 µg L⁻¹). Las demás proporciones de concentraciones de amonio en el DIN son: Las Minas 9%, Joaquina 2 10%, Joaquina y la Plata 11% (Figura 11).

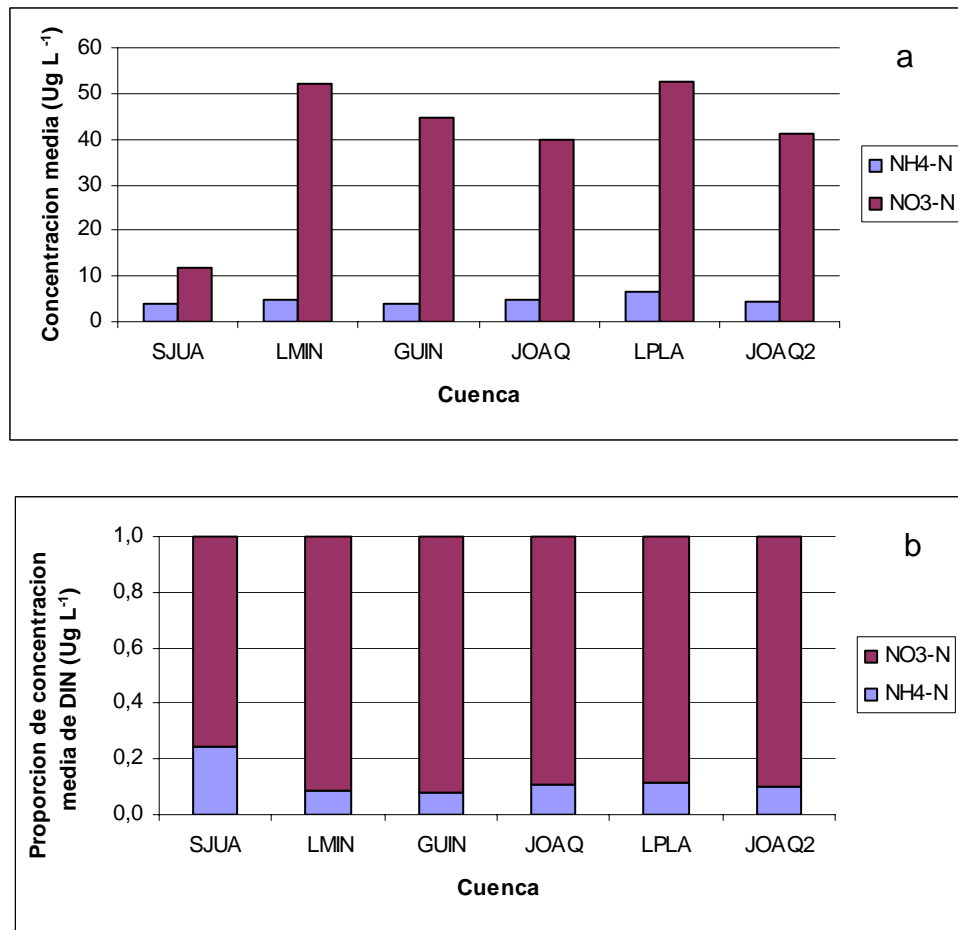


Figura 11. Relación entre el $\text{NH}_4\text{-N}$ y $\text{NO}_3\text{-N}$ en concentración ($\mu\text{g L}^{-1}$) (a) y proporción (b) como componentes del Nitrógeno Inorgánico Disuelto (DIN) para las cuencas estudiadas.

En cuanto al Nitrógeno Total (N-total), las proporciones de las concentraciones medias de DIN doblan en la mayoría de los casos a las de DON, menos en la cuenca San Juan (SJUA) donde se produce lo contrario, en este caso la mayor concentración es de Nitrógeno Orgánico Disuelto (DON). En esta cuenca la concentración media de DON es de $18,6 \mu\text{g L}^{-1}$ lo que corresponde al 54% del Nitrógeno Total y la concentración media de DIN es de solo $15,8 \mu\text{g L}^{-1}$.

La cuenca La Plata (LPLA) tiene una proporción de concentración media de DIN que alcanza el 70% del nitrógeno total, en Las Minas (LMIN), Guindos (GUIN) y Joaquines 2 (JOAQ2) la proporción de concentración media de DIN es de 71% del N-Total, en tanto que para Joaquines (JOAQ) es de 73% (Figura 12).

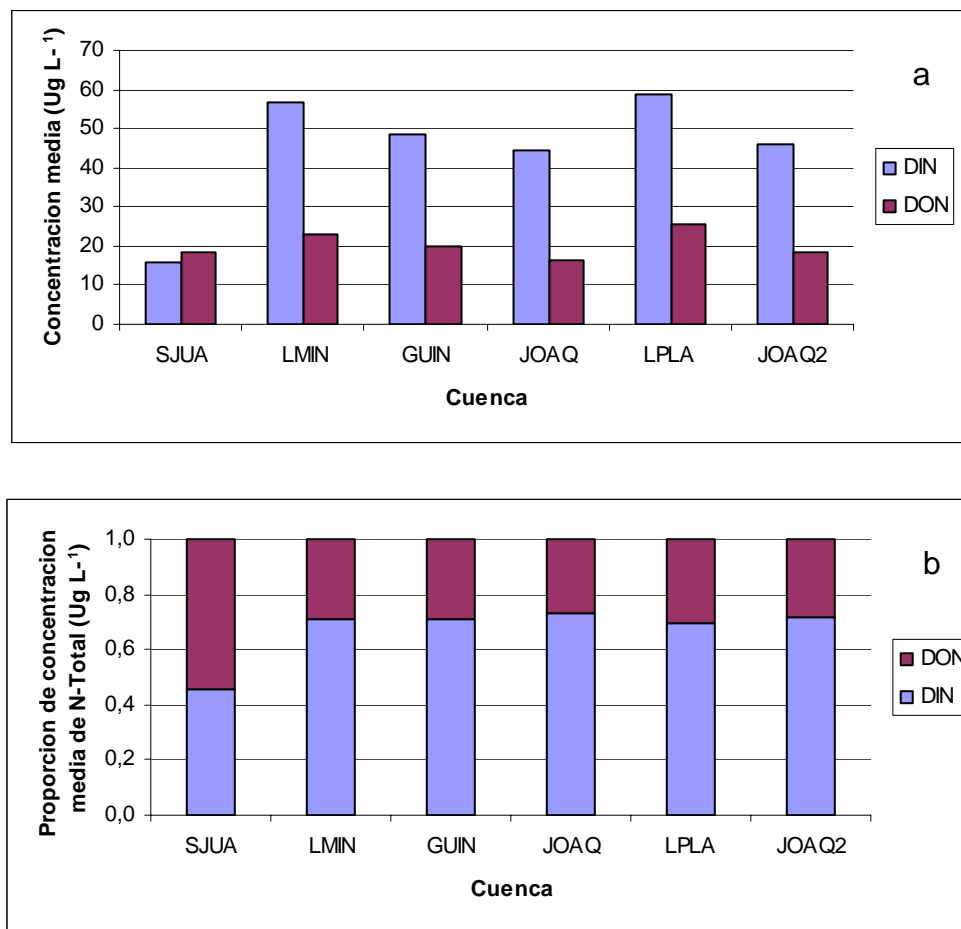


Figura 12. Relación entre (DIN) y (DON) en concentración media ($\mu\text{g L}^{-1}$) (a) y proporción (b) como componentes del Nitrógeno Total (N-Total) para las cuencas estudiadas.

La concentración media de P-total no registró diferencias significativas para el periodo de estudio entre las cuencas. Como se aprecia en la Figura 13, la cuenca Joaquines 2 (JOAQ2) es la que presenta mayor concentración promedio, con $35,9 \mu\text{g L}^{-1}$ (ds $23,3 \mu\text{g L}^{-1}$). El menor valor de concentración lo posee la cuenca Las Minas (LMIN), con $25,4 \mu\text{g L}^{-1}$. El resto de las cuencas posee concentraciones medias cercanas a los $30 \mu\text{g L}^{-1}$ (Cuadro 4).

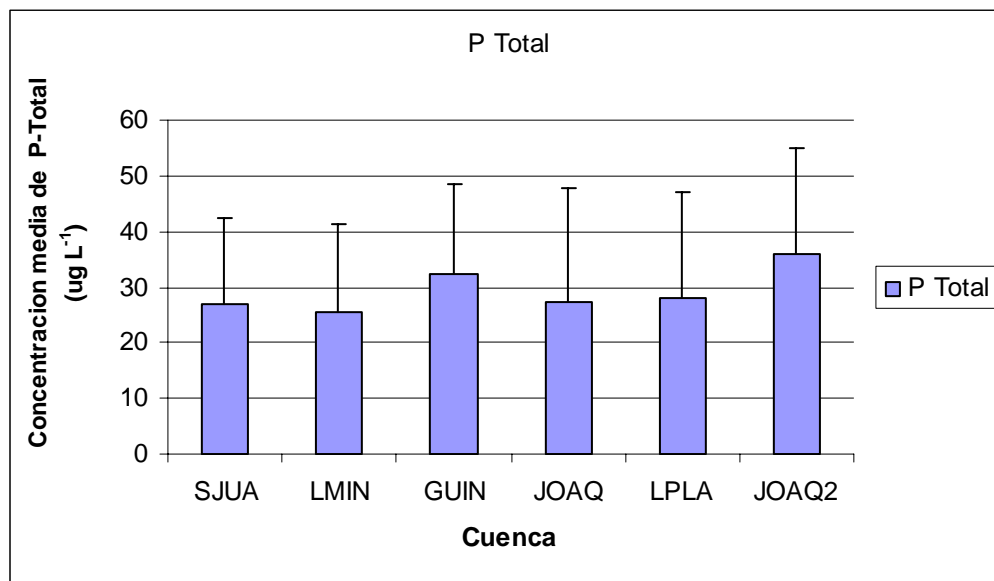


Figura 13. Concentración media y desviación estándar de P-total para el periodo de estudio.

4.3.3 Comportamiento de las Concentraciones Medias Durante el Periodo de Estudio

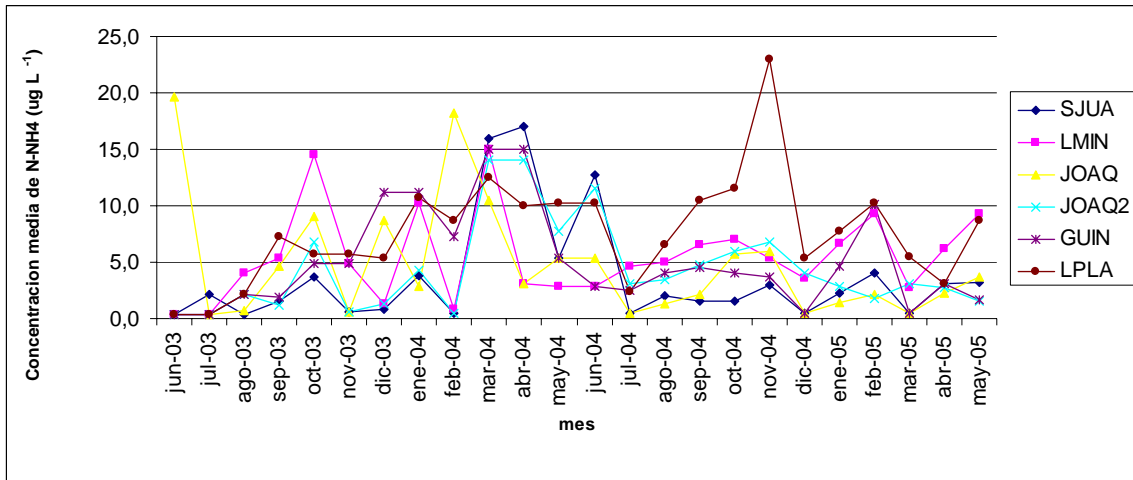


Figura 14. Concentración media mensual ($\mu\text{g L}^{-1}$) de amonio (N-NH_4) para las cuencas en estudio.

Se puede observar en la Figura 14, con respecto al amonio (N-NH_4), que no existe una tendencia clara de valores altos en la concentración para una cuenca en específico, sino que más bien se alternan. Para el mes de marzo del 2004 se observa una tendencia clara a aumentar las concentraciones lo que corresponde al fin del verano del 2004, luego se observa una tendencia a descender hacia los meses de invierno (Junio-Septiembre) del mismo año. La cuenca La Plata presenta el pick mas alto de las concentraciones medias para el periodo de estudio, en Noviembre del 2004 ($23,0 \mu\text{g L}^{-1}$), además de mostrar una tendencia a aumentar durante la mayor parte del estudio, sobre todo para los meses de Agosto del 2004 ($6,6 \mu\text{g L}^{-1}$) a Marzo del 2005 ($5,5 \mu\text{g L}^{-1}$), periodo en el cual muestra las concentraciones medias mas altas. A diferencia de la cuenca San Juan, que en general posee las menores concentraciones de amonio para los meses de estudio, aun cuando muestra un importante aumento en los meses de Marzo del 2004 ($16,0 \mu\text{g L}^{-1}$), Abril del

mismo año ($17,0 \mu\text{g L}^{-1}$) y Junio del 2004 ($12,7 \mu\text{g L}^{-1}$) meses en los cuales muestra los valores de concentración mas altos (Figura 14).

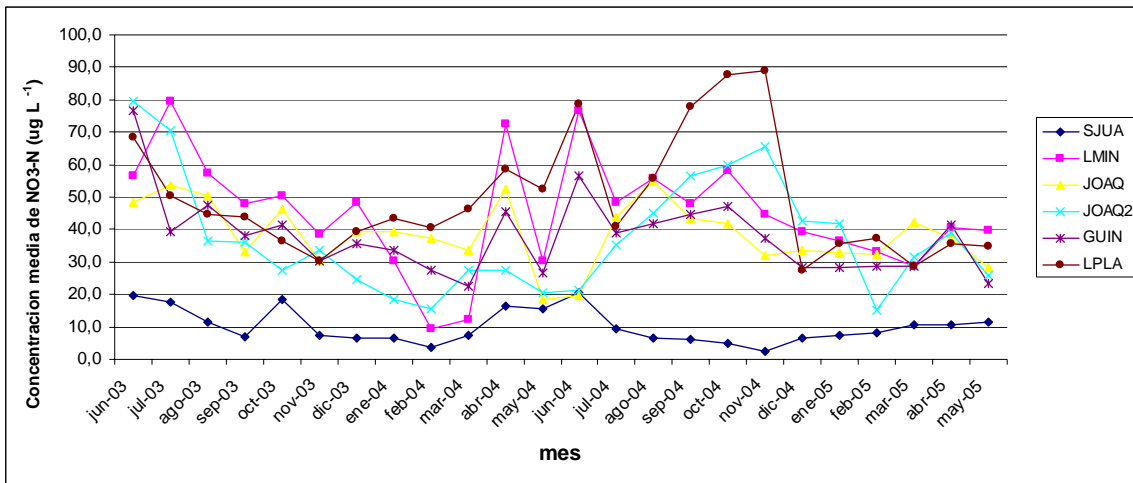


Figura 15. Concentración media mensual ($\mu\text{g L}^{-1}$) de nitrato (N-NO_3) para las cuencas en estudio.

Las concentraciones medias de Nitrato (N-NO_3) para el periodo de estudio muestran valores de concentración más altos que el amonio (N-NH_4). En este caso la cuenca San Juan sigue mostrando los valores de concentración más bajos para todo el periodo de estudio (Figura 15). Esta cuenca muestra su valor de concentración mas alto en le mes de Junio del 2004 ($20,5 \mu\text{g L}^{-1}$), para luego disminuir paulatinamente hasta el mes de noviembre del mismo año ($2,5 \mu\text{g L}^{-1}$), posteriormente muestra un aumento gradual hasta mayo del 2005 ($11,6 \mu\text{g L}^{-1}$) (Figura 15). La cuenca Las Minas (LMIN) presenta los valores de concentración de amonio mas altos desde Julio del 2003 ($79,5 \mu\text{g L}^{-1}$) hasta Diciembre del 2003 ($48,5 \mu\text{g L}^{-1}$), luego alterna esta posición con la cuenca La Plata hasta noviembre del 2004, fecha en la que además se presenta el pick mas alto de concentración de amonio para el periodo de estudio con $89,0 \mu\text{g L}^{-1}$. En general todas las cuencas

muestran un descenso gradual desde Junio del 2003 hasta febrero del mismo año, posteriormente no se observa una tendencia clara de valores de concentración en las cuencas.

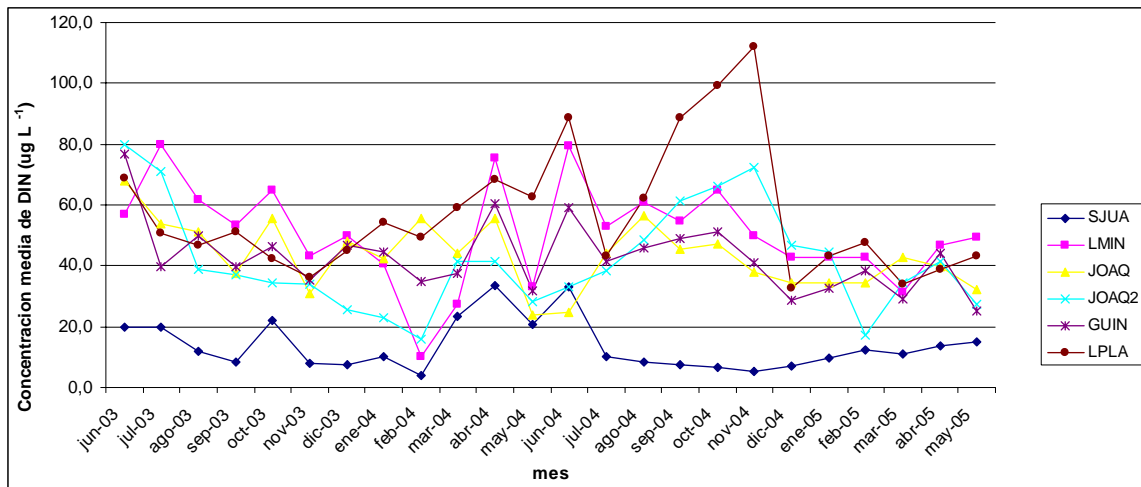


Figura 16. Concentración media mensual ($\mu\text{g L}^{-1}$) de DIN para las cuencas en estudio.

Como el Nitrógeno Inorgánico Disuelto (DIN) está compuesto principalmente por nitrato (N-NO_3), las concentraciones medias de DIN son directamente proporcionales a las de nitrato. De este modo, la cuenca San Juan (SJUA) muestra los menores valores de concentración de DIN para el periodo de estudio. La cuenca La Plata (LPLA) presenta el punto más alto de concentración de DIN en el mes de noviembre del 2004 ($112,1 \mu\text{g L}^{-1}$) (Figura 16).

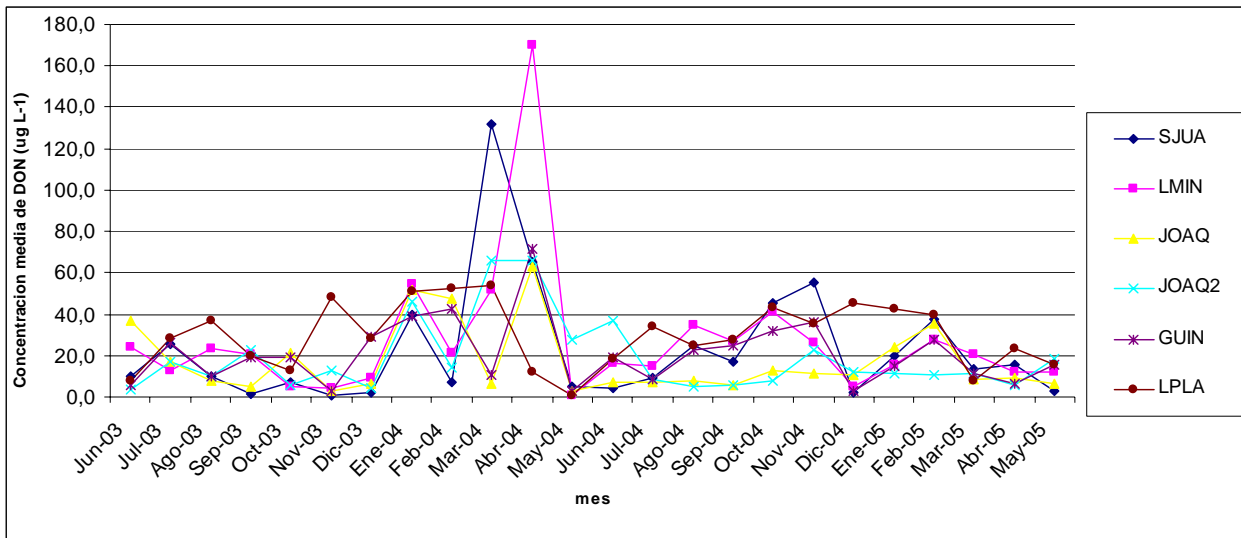


Figura 17. Concentración media mensual ($\mu\text{g L}^{-1}$) de DON para las cuencas en estudio.

Analizando la relación entre el DIN- DON en general se observa que las concentraciones de DIN son mayores a las de DON aunque, es el DON el que presenta el pick de concentración mas alto en el mes de abril del 2004 ($169,8 \mu\text{g L}^{-1}$) (Figura 17). Los valores de DIN son desde ($4,0 \mu\text{g L}^{-1}$) hasta ($112,1 \mu\text{g L}^{-1}$). En la cuenca San Juan, hay periodos en los que los valores de concentración de DON son muy superiores a los de DIN esto es mas notorio en el mes de Marzo del 2004 donde el DON alcanza un valor de concentración de $131,9 \mu\text{g L}^{-1}$ y el DIN tan solo $23,5 \mu\text{g L}^{-1}$. Otro periodo en cual el DON es superior al DIN es de Agosto a Diciembre del 2004, estos periodos en que el DON es considerablemente superior al DIN hacen que el valor de concentración de DON sea superior en el promedio general del periodo de estudio, esto se observa en la Figura 12 y Cuadro 4.

La cuenca Las Minas (LMIN) en general muestra valores de concentración media de DIN superiores a las de DON para el periodo de estudio, con excepción de los meses de Enero a Abril

del 2004, en este periodo el DON disminuye de Enero ($58,4 \mu\text{g L}^{-1}$) a Febrero ($21,2 \mu\text{g L}^{-1}$) para luego aumentar hasta el mes de Abril donde alcanza el pick mas alto de concentración con $169,8 \mu\text{g L}^{-1}$. La cuenca Joaquina (JOAQ) también presenta valores de concentración media de DIN en general mayores que los de DON para el periodo de estudio, con excepción de los meses Enero y Abril del 2004 mas el mes de Febrero del 2005 (Figura 16 y 17).

La cuenca Joaquina 2 presenta tres meses en los que la concentración media de DON supera a la de DIN, estos son Enero del 2004 donde el DON es de $45,8 \mu\text{g L}^{-1}$ y el DIN solo $22,8 \mu\text{g L}^{-1}$, Marzo del 2004 con $66,0 \mu\text{g L}^{-1}$ y $41,5 \mu\text{g L}^{-1}$ para DON y DIN respectivamente y por ultimo, Abril donde el DON y el DIN mantienen sus concentraciones del mes anterior (Figura 15 y 16). En la cuenca Guindos (GUIN) solo en 2 meses la concentración media de DON es superior a la de DIN, estos son Febrero del 2004 donde el DON alcanza $42,8 \mu\text{g L}^{-1}$ mientras que el DIN es de $34,8 \mu\text{g L}^{-1}$ y Abril donde el DON es de $71,8 \mu\text{g L}^{-1}$ y el DIN tiene un valor de $60,5 \mu\text{g L}^{-1}$. La cuenca La Plata presenta 3 meses donde la concentración media de DON es superior a la de DIN, estos son el mes de Noviembre del 2003 donde el DON alcanza una concentración de $48,3 \mu\text{g L}^{-1}$ y el DIN $36,2 \mu\text{g L}^{-1}$, Febrero del 2004 donde el DON es levemente superior al DIN y por ultimo Diciembre del 2004, con una concentración de DON de $45 \mu\text{g L}^{-1}$ y DIN de $32,7 \mu\text{g L}^{-1}$.

Todas las cuencas alcanzan su valor de concentración más alto de DON el mes de Abril del 2004 (Figura 17), menos la cuenca San Juan (SJUA) que alcanza su valor de DON más alto el mes de Marzo.

Con respecto a las tendencias de concentración media mensual de Fósforo Total (P-Total), no se observan tendencias claras con respecto al aumento o disminución de estas durante el periodo de estudio. En efecto todas las cuencas poseen a lo menos un mes con mayor concentración con respecto de las otras, lo mismo ocurre con los valores de menor concentración de fósforo (Figura 18).

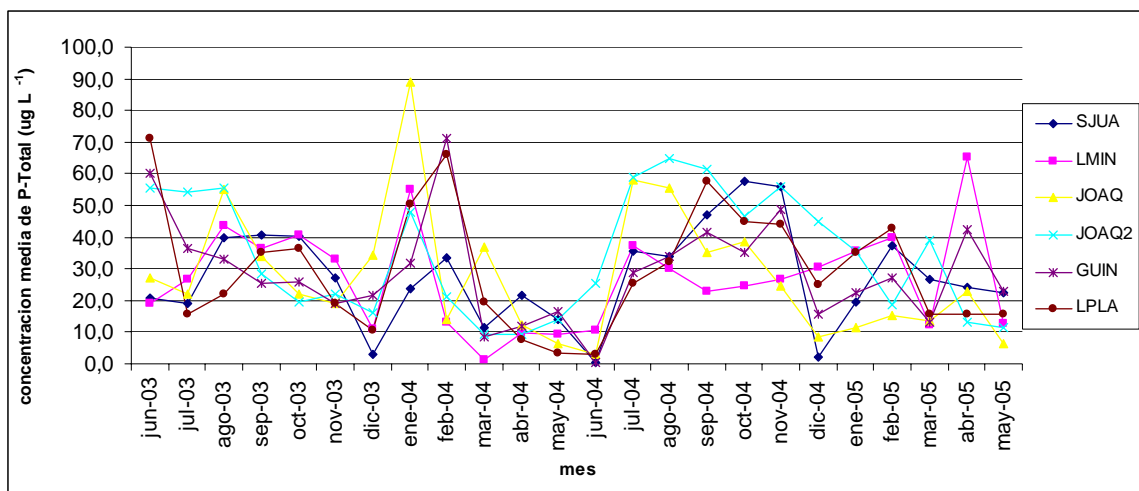


Figura 18. Concentración media mensual ($\mu\text{g L}^{-1}$) de P-Total para las cuencas en estudio.

4.4 Exportación de Nitrógeno y Fósforo

En cuanto a la exportación de nitrógeno y fósforo para tener una medida de las exportaciones unitarias, es decir unidad de peso ponderada por superficie, se obtuvo un promedio de los 2 años de mediciones para obtener $\text{Kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$. El Cuadro 5 Figura 19 muestra la exportación promedio de nitrógeno y fósforo para el periodo de estudio.

La cuenca Las minas (LMIN) es la que posee la mayor exportación de DIN ($1,76 \text{ Kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), esto debido a su alto valor de exportación de N-NO_3 ($1,61 \text{ Kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) mas el aporte de N-NH_4

(0,15 Kg ha⁻¹ año⁻¹). A su vez, esto también tiene incidencia en la mayor exportación de N-Total desde esta cuenca (2,47 Kg ha⁻¹ año⁻¹).

Cuadro 5. Exportación promedio (Kg ha⁻¹ año⁻¹) de nitrógeno y fósforo para el periodo de estudio.

Cuenca	NH4-N	NO3-N	DIN	DON	N Total	P-Total
SJUA	0,19	0,57	0,76	0,89	1,65	1,29
LMIN	0,15	1,61	1,76	0,71	2,47	0,79
GUIN	0,07	0,66	0,73	0,29	1,02	0,48
JOAQ	0,14	1,13	1,27	0,47	1,74	0,78
LPLA	0,15	1,17	1,31	0,57	1,88	0,63
JOAQ2	0,11	1,01	1,12	0,44	1,56	0,88

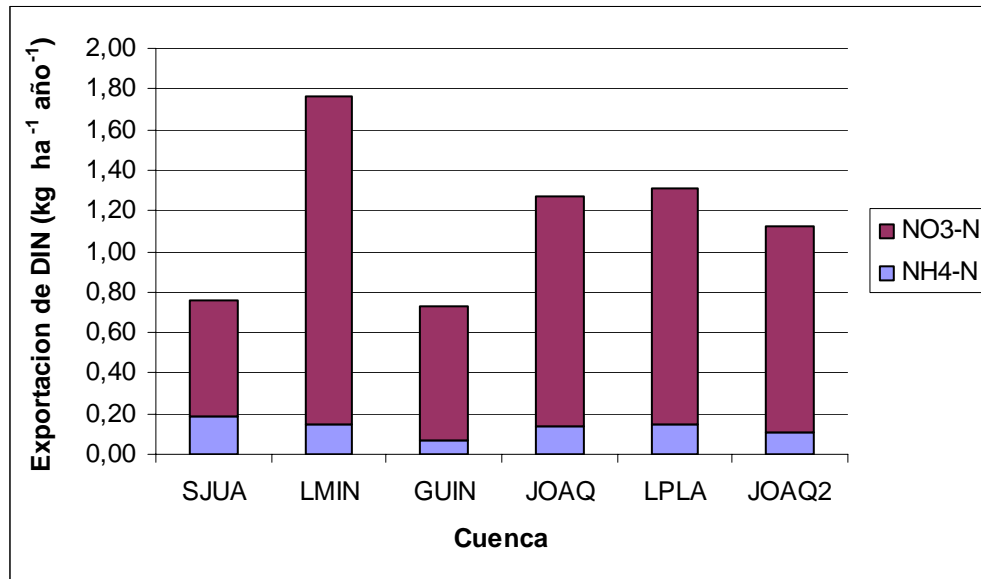


Figura 19. Exportación promedio (Kg ha⁻¹ año⁻¹) de amonio (NH₄-N) y nitrato (NO₃-N) como componentes del nitrógeno Inorgánico Disuelto (DIN) para el periodo de estudio.

La cuenca La Plata (LPLA) es la que presenta la segunda mayor exportación de DIN (1,31 Kg ha⁻¹ año⁻¹) sobre todo por su alto valor de flujo de N-NO₃ (1,17 Kg ha⁻¹ año⁻¹). La cuenca Guindos (GUIN) es la que presenta la exportación mas baja de amonio y nitrato, presentando un valor de DIN de 0,73 Kg ha⁻¹ año⁻¹.

En el caso del nitrógeno orgánico disuelto (DON) es la cuenca San Jun (SJUA) la que presenta la mayor exportación (0,89 Kg ha⁻¹ año⁻¹), seguida de Las Minas (LMIN) con 0,71 y La Plata (LPLA) con 0,57 Kg ha⁻¹ año⁻¹. La relación entre la exportación unitaria de DIN y DON se observa en la Figura 20.

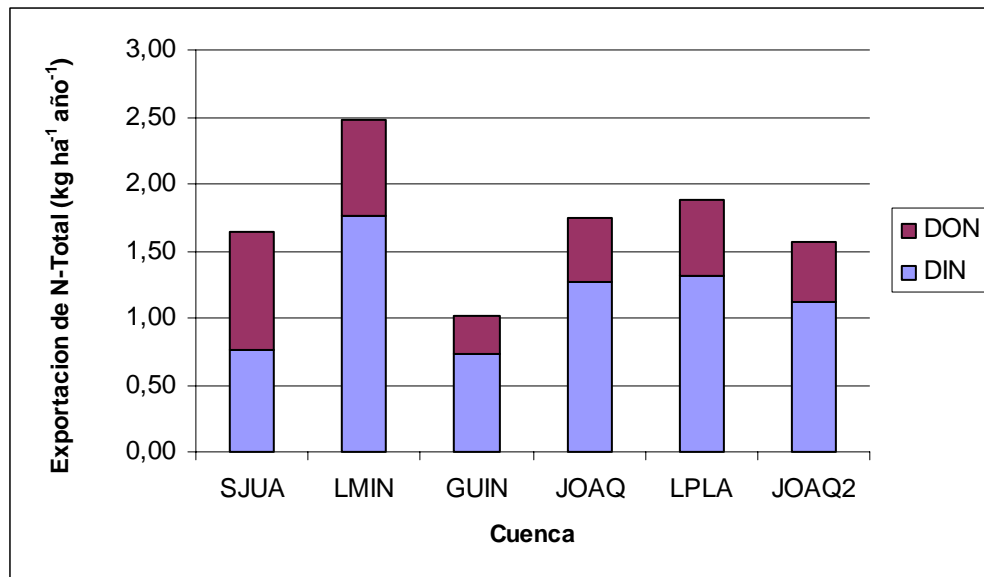


Figura 20. Exportación promedio (Kg ha⁻¹ año⁻¹) de nitrógeno Inorgánico Disuelto (DIN) y nitrógeno Orgánico Disuelto (DON) como componentes de N-Total para el periodo de estudio.

En la Figura 20 Cuadro 5 se observa que la mayor exportación de N-Total corresponde a la cuenca Las Minas ($2,47 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), seguida de La Plata ($1,88 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y Joaquines ($1,74 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

En cuanto a la exportación de de fósforo es la cuenca San Juan (SJUA) la que presenta la mayor exportación de P-Total promedio para el periodo de estudio, con $1,29 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, seguida de Joaquines 2 (JOAQ2), con $0,88 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Por ultimo la cuenca que presenta la menor exportación promedio de fósforo total es Guindos (GUIN) con $0,48 \text{ Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En la Figura 21 se observa la exportación de fósforo promedio para el periodo de estudio.

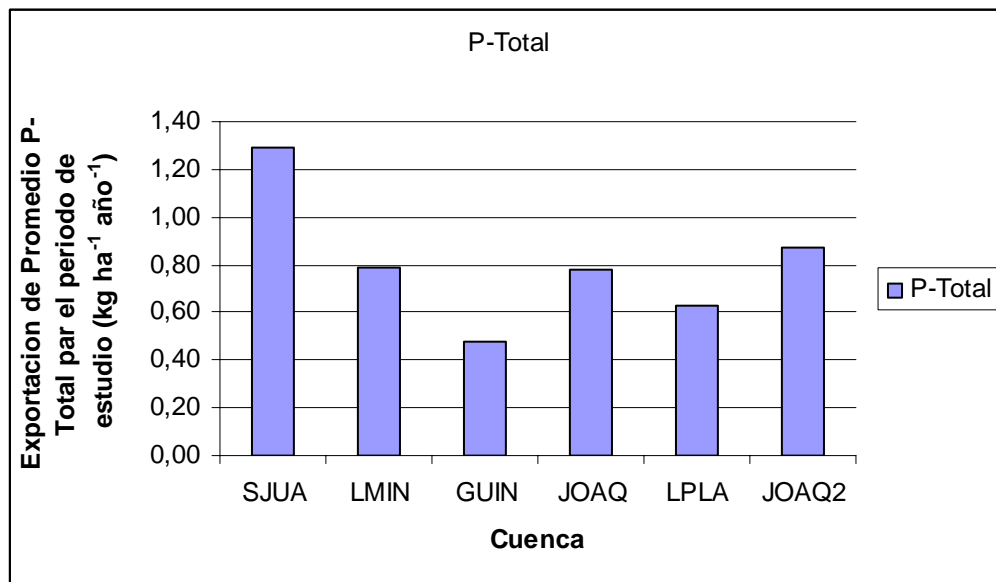


Figura 21. Exportación promedio ($\text{Kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) de P-Total para el periodo de estudio.

Al considerar la exportación promedio en kg, se pueden observar algunos cambios en las tendencias observadas en la exportación promedio del periodo. El Cuadro 6 presenta los valores de exportación promedio (kg) registrados para el periodo de estudio.

Cuadro 6. Exportación promedio (Kg año⁻¹) de nitrógeno y fósforo para el periodo de estudio.

Cuenca	NH4-N	NO3-N	DIN	DON	N Total	P-Total
SJUA	271,8	827,3	1099,1	1291,8	2390,9	1875,5
LMIN	132,0	1395,1	1527,1	619,4	2146,6	683,58
GUIN	18,4	166,0	184,5	73,2	257,6	120,06
JOAQ	39,3	319,0	358,3	132,3	490,6	219,16
LPLA	55,9	449,7	505,7	219,6	725,3	241,88
JOAQ2	6,0	55,3	61,3	24,4	85,7	47,97

La cuenca Las Minas (LMIN) es la que presenta el valor de nitrógeno inorgánico disuelto (DIN) más alto con 1527,1 Kg. Esto gracias a su alto valor de NO₃ (1395,1 Kg). La cuenca San Juan (SJUA) viene en segundo lugar con un valor de DIN igual a 1099,1 Kg. Los menores valores de exportación los posee la cuenca Joaquines 2 (JOAQ2), con un valor muy bajo de NH₄ (6 Kg.) en comparación con las otras cuencas. El valor de DIN promedio exportado desde esta cuenca es de 61,3 Kg para todo el periodo de estudio. La Figura 22 presenta los valores gráficos de exportación promedio (Kg año⁻¹) y Proporcional de DIN (NH₄+NO₃) para las cuencas en estudio. Se aprecia la superioridad en la exportación de DIN de la cuenca Las Minas sobre las demás, especialmente Joaquines 2 (JOAQ2). Sin embargo, cuando analizamos las exportaciones en proporción, se observan proporciones similares en la mayoría de las cuencas, de este modo, es la cuenca Las Minas (LMIN) la que presenta la mayor proporción en la exportación de NO₃ con un 91 %, luego le siguen las cuencas Joaquines 2 y Los Guindos ambas con 90% y por ultimo la

cuenca Joaquines (JOAQ) junto con la cuenca La Plata (LPLA) muestran una exportación de 89%.

La cuenca San Juan (SJUA) es la que presenta la mayor proporción de amonio (NH_4) como componente de la exportación de DIN, alcanzando a 25% (Figura 22).

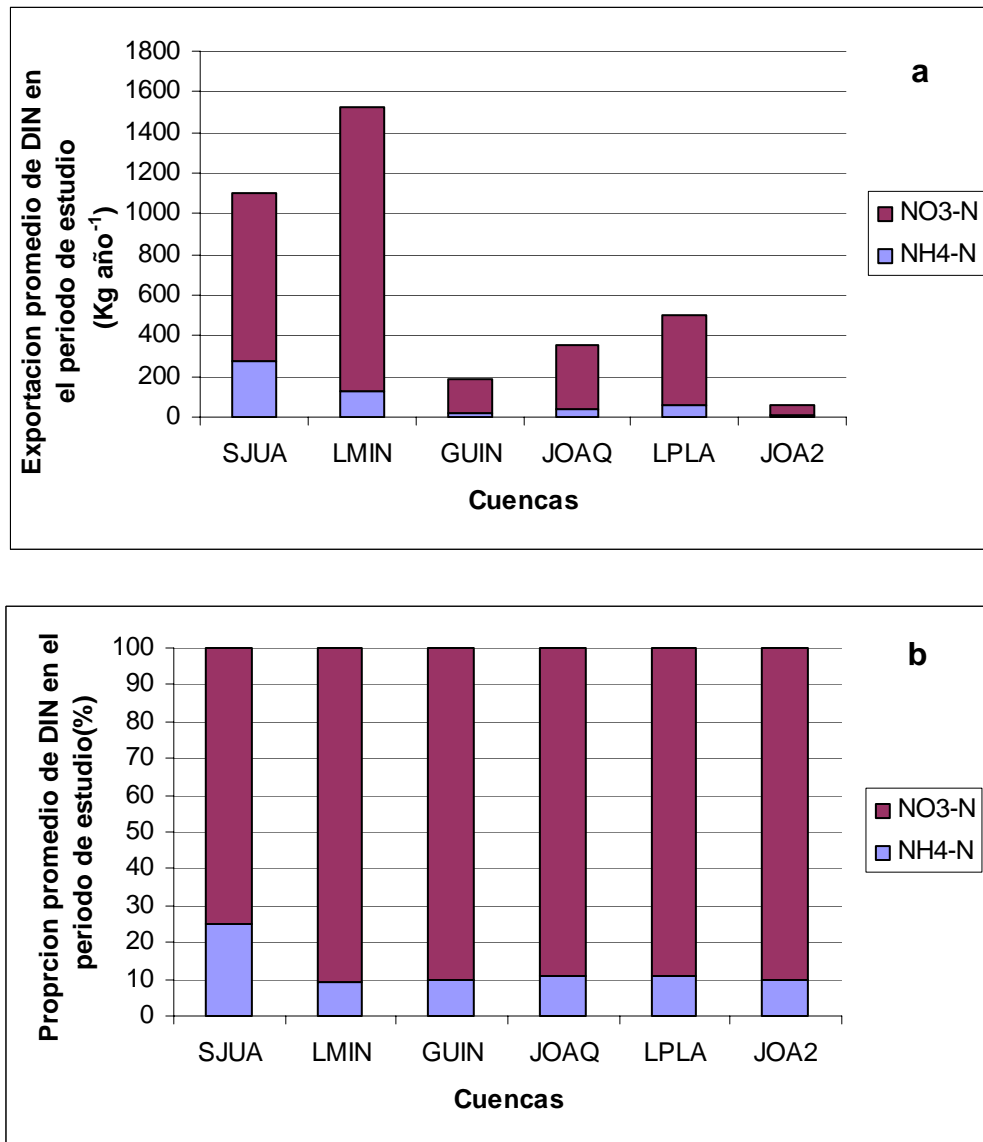


Figura 22. Exportación promedio – a- (Kg año^{-1}) y porcentual – b – (%) de nitrógeno inorgánico disuelto (DIN) y sus fracciones amonio y nitrato para el periodo de estudio.

En el caso de la exportación de nitrógeno orgánico disuelto (DON), en el Cuadro 6 se aprecia que es la cuenca San Juan (SJUA) la mayor exportadora, con 1291,8 Kg, seguida por Las Minas (LMIN), con 619,4 Kg. Las proporciones de exportación promedio (Kg) DIN y DON se aprecian en la Figura 23, donde se aprecia una clara predominancia de exportación de DIN en las cuencas. En efecto la cuenca Joaquines (JOAQ) exporta un 73% de DIN con respecto al N-Total exportado, Joaquines 2 y Guindos con 72%, en tanto que la cuenca Las Minas exporta un 71% de DIN y por ultimo está la cuenca La Plata con una exportación de DIN de 70%. La única excepción ocurre con la cuenca San Juan (SJUA), que exporta un 54% de DON.

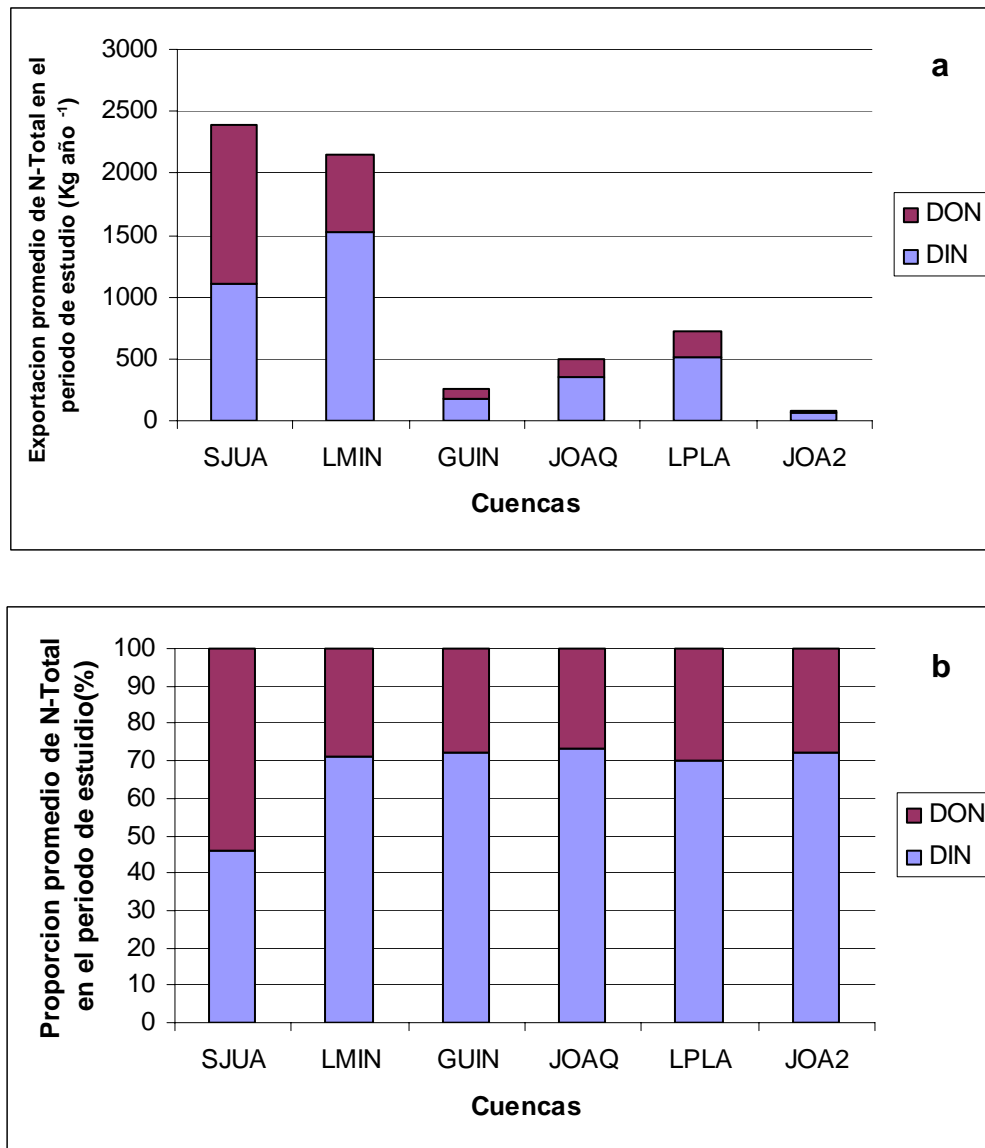


Figura 23. Exportación promedio – a- (Kg año^{-1}) y porcentual - b- (%) de nitrógeno inorgánico disuelto (DIN) y nitrógeno orgánico disuelto (DON) como fracciones del nitrógeno total (N-total).

En relación a la exportación promedio de P-total, es la cuenca San Juan (SJUA) la que presenta la mayor exportación para el periodo de estudio con 1875,5 Kg, seguida de la cuenca Las Minas (LMIN), con 683,53 Kg. La cuenca que presenta la menor exportación promedio de P-Total es

Joaquines 2 (JOAQ2), con 47,97 Kg esto se aprecia en Cuadro 6 y Figura 24. Además en la Figura 24 se puede apreciar las exportaciones promedio de P-Total relacionadas con las de N-Total, en ella se aprecia que en todas las cuencas las exportaciones promedio de N-Total son mayores que las de P-Total y en cuatro de estas la relación es 2:1 aproximadamente en tanto que en la cuenca Las Minas (LMIN) la relación es 3:1 aproximadamente y por último en la cuenca San Juan (SJUA) la exportación de P-Total se encuentra más cercana a la de N-Total.

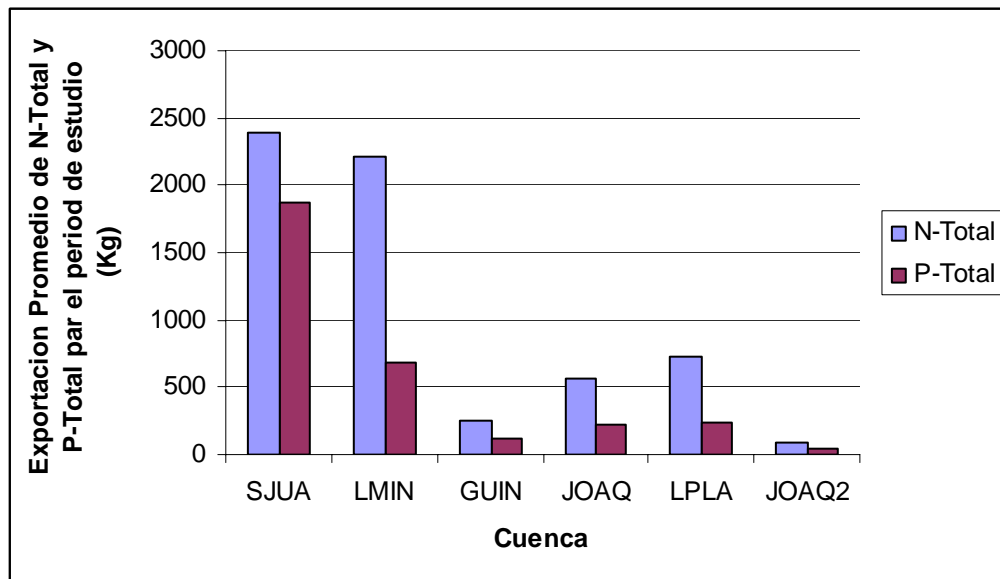


Figura 24. Exportación promedio de fósforo total (P-Total) y nitrógeno total (N-Total) de las cuencas para el periodo de estudio.

4.5 Retención de nitrógeno y fósforo

Con la información de los flujos de entrada (precipitación) y salida (escorrentía) concentraciones se determinó la capacidad de retención de nitrógeno y fósforo de las cuencas. Para esto se utilizó los promedios de las entradas y salidas de N-total y P-Total para los 2 años de estudio. En el Cuadro 7 y Figura 25, se observa la relación entre la entrada, salida y retención para N-Total. De este modo la cuenca que presenta la mayor retención de nitrógeno total es San Juan (SJUA) con un 60%, seguida de los Guindos (GUIN) que alcanza un 48%, posteriormente le siguen las cuencas Joaquines 2 (JOAQ2), Joaquines (JOAQ) y Las Minas (LMIN) con 37, 30 y 17% respectivamente. Por último la cuenca que presenta la menor retención de nitrógeno es La Plata (LPLA) con tan solo un 4% de retención de N-Total. En la Figura 25 además se puede observar, que es la cuenca San Juan la que presenta el mayor valor en las entradas de N-Total ($4,16 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) siendo este valor muy superior en relación a los valores de las demás cuencas, los cuales van desde $1,95 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, para Guindos y La Plata hasta $2,98 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para Las Minas. Aunque San Juan es la que presenta el valor mas alto de entradas para N-Total, es esta cuenca la que tiene la mayor capacidad de retención, debido a que las salidas de N-Total presenta un valor de $1,65 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que es bajo en comparación con la cantidad de N-Total que entra y similar al valor de salidas de las otras cuencas en el estudio. La cuenca que presenta el valor más alto de salidas para N-Total es Las Minas con $2,48 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, el resto de las cuencas presenta valores que están entre $1,02 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para la cuenca Guindos y $1,88 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en La Plata.

Cuadro 7. Retención de N-Total y P-Total (%) calculada usando la relación ([entradas-salidas]/entradas). Entradas y exportaciones ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) promedio de los 2 años de estudio.

Cuenca	Entradas(N)	Salidas(N)	Retención(N)	Entradas (P)	Salidas (P)	Retención(P)
SJUA	4,16	1,65	0,60	0,31	1,29	-3,10
LMIN	2,98	2,48	0,17	0,22	0,79	-2,53
GUIN	1,95	1,02	0,48	0,12	0,48	-2,97
JOAQ	2,48	1,74	0,30	0,17	0,78	-3,60
LPLA	1,95	1,88	0,04	0,12	0,63	-4,24
JOAQ2	2,48	1,56	0,37	0,17	0,88	-4,18

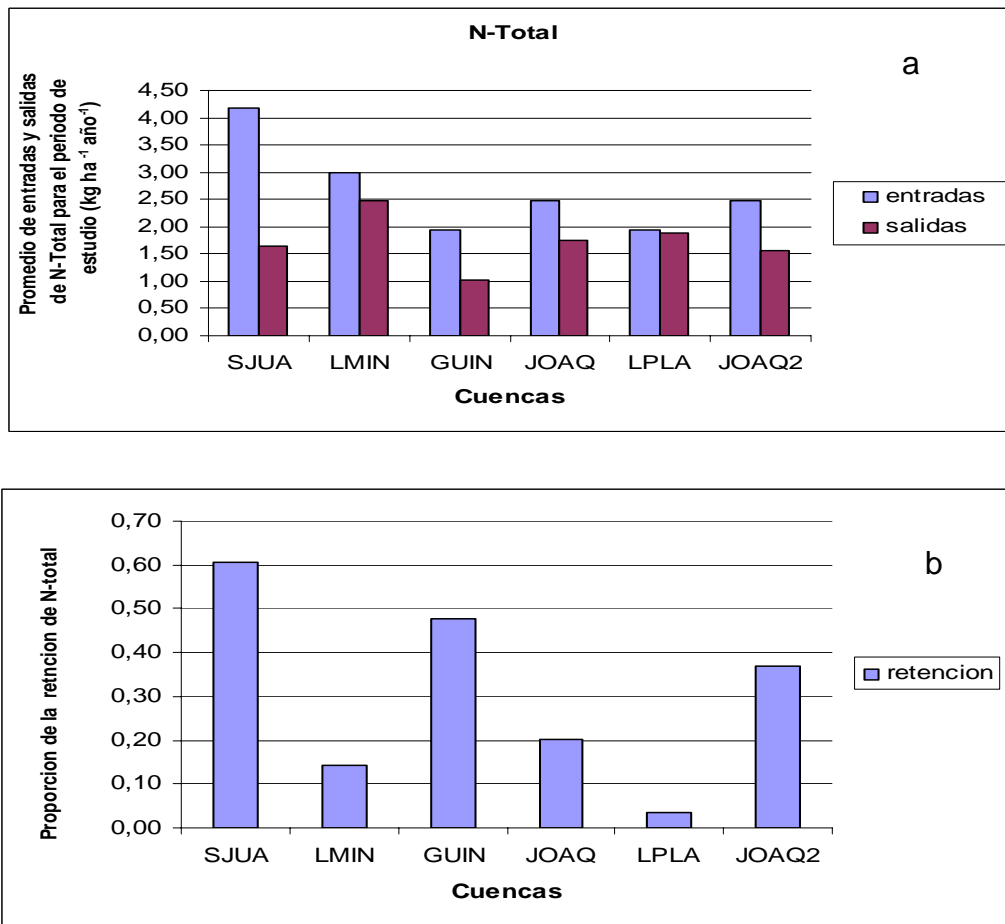


Figura 25. Promedio de entradas y salidas –a- ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y proporción de retención –b- (%) de N-Total para el periodo de estudio.

En cuanto a la proporción de retención de fósforo total (P-Total), también se utilizó un promedio de los dos años de estudio para obtener $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. De este modo, se esperaba que utilizando la relación $([\text{entradas-salidas}]/\text{entradas})$, se obtendrían resultados entre 0 y 1, pero debido a que las salidas de fósforo desde las cuencas superaron ampliamente a las entradas, los valores obtenidos fueron negativos y variaron entre -2,53 para la cuenca Las Minas, lo que en proporción equivale a un -253% y -4,24 para la cuenca La Plata (LPLA). De este modo la cuenca Los Guindos (GUIN) presenta una proporción de “retención” de P-Total de -297 %, luego esta la cuenca San Juan (SJUA) con un -310%, y finalmente están la cuencas Joaquina y Joaquina 2 con -360 y -418% respectivamente (Figura 26).

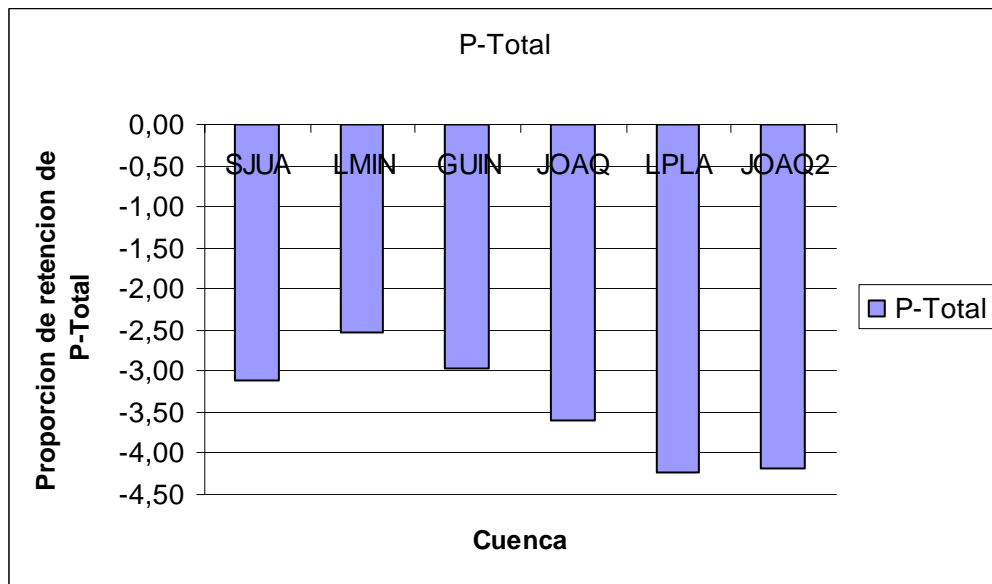


Figura 26. Proporción de “retención” (%) de P-Total para el periodo de estudio.

De acuerdo con las correlaciones bivariadas entre la retención de N-total y la cubierta vegetal, se observa una relación positiva entre la retención total de nitrógeno y la proporción

de retención de bosque nativo, con un $r = 0,573$ y una relación negativa con la proporción de plantación forestal con un $r = -0,484$ (Cuadro 8). No obstante, como se observa en la Figura 27, al obtener el coeficiente de determinación $R^2 = 0,33$ entre la proporción de retención total de nitrógeno y la proporción de bosque nativo, la relación no es estadísticamente significativa ($p > 0,05$).

Cuadro 8. Matriz de correlación bivariada ($n=6$), entre retención N-Total, proporción de bosque nativo y proporción de plantación forestal.

		RTNT	PLA	BNT
RTNT	r	1	-,484	,573
	Sig. (bilateral)	.	,331	,235
	N	6	6	6
PLA	r	-,484	1	-,990(**)
	Sig. (bilateral)	,331	.	,000
	N	6	6	6
BNT	r	,573	-,990(**)	1
	Sig. (bilateral)	,235	,000	.
	N	6	6	6

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

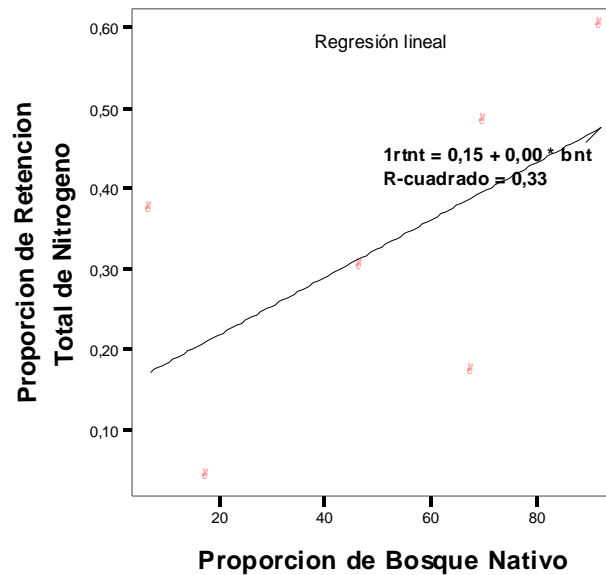


Figura 27. Relación entre la Proporción de Retención Total de Nitrógeno y el porcentaje de Bosque Nativo.

En cuanto a la retención de fósforo total, se observa en el Cuadro 9 una relación positiva con la proporción de bosque nativo (BNT) con $r = 0,867$ y una relación negativa con la proporción de plantación forestal (PLT) con $r = -0,885$. Estas relaciones son estadísticamente significativas ($p < 0,05$). En la Figura 28 se observa la regresión lineal y el $R^2 = 0,77$ entre la proporción de retención total de fósforo (RTPT) y la proporción de bosque nativo (BNT).

Cuadro 9. Matriz de correlación bivariada (n=6), entre retención P-Total, proporción de bosque nativo y proporción de plantación forestal.

		RTPT	BNT	PLA
RTPT	r	1	,867(*)	-,885(*)
	Sig. (bilateral)	.	,025	,019
	N	6	6	6
BNT	r	,867(*)	1	-,990(**)
	Sig. (bilateral)	,025	.	,000
	N	6	6	6
PLA	r	-,885(*)	-,990(**)	1
	Sig. (bilateral)	,019	,000	.
	N	6	6	6

* La correlación es significativa al nivel 0,05 (bilateral).

** La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

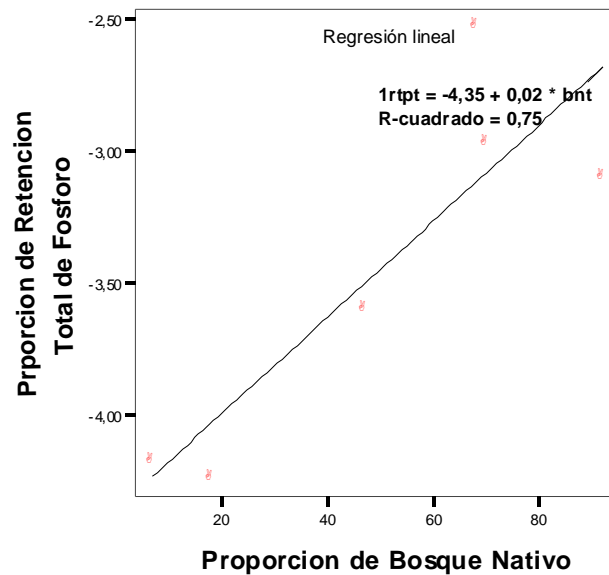


Figura 28. Relación entre la proporción de Retención Total de Fósforo y el porcentaje de Bosque nativo.

4.6 Análisis de componentes principales

Se realizó un análisis de componentes principales, para establecer la posible relación de las variables de vegetación y uso de suelo junto con las fisiográficas sobre la exportación y concertación total de nitrógeno. En el Cuadro 10 se pueden apreciar los autovalores para este análisis.

Cuadro 10. Autovalores y explicación de la varianza para cuatro componentes principales correspondientes al análisis de las variables asociadas a la exportación y concentración Total de nutrientes.

Componente	Autovalores iniciales			Sumas de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	11,162	42,931	42,931	11,162	42,931	42,931
2	5,701	21,928	64,858	5,701	21,928	64,858
3	5,023	19,318	84,176	5,023	19,318	84,176
4	2,331	8,967	93,143	2,331	8,967	93,143

Los primeros cuatro componentes tienen todos varianzas (autovalores) mayores que 1 y entre los cuatro recogen el 93% de la varianza de las variables originales.

El primer componente explica 43% de la varianza, el componente 2 el 21%, el componente 3 el 19% y el componente 4 el 9%. La suma de los autovalores representa la varianza total de las variables presentadas en cada componente, lo que determina la mayor importancia de esas variables en la determinación del objetivo final que son las características de la calidad del agua

en función de las variables analizadas. De este modo los autovalores individuales que determinan los componentes principales finales se presentan en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Matriz de componentes principales para variables de concentración y exportación Total de nutrientes mejor correlacionadas en el estudio.

Variable	Componente			
	1	2	3	4
EXNTO	-,306	,460	,797	,236
CNTO	,434	,078	,692	-,539
SPHA	-,884	-,153	,058	,419
BNT	-,940	-,146	-,253	-,155
MTR	,607	,185	,750	,184
PRA	-,537	,574	,319	-,032
PLA	,962	,078	,154	,153
SVE	-,322	,737	,380	-,323
ICOM	-,714	,249	,440	,058
IMAR	,676	,515	-,382	,283
PMED	-,535	,744	-,329	,208
IDISBNT	,929	,149	-,095	,254
IDISPLT	-,113	,669	,620	-,333
IDISMTR	,500	-,155	-,442	-,695
IDISPRA	,648	,608	,060	,431
IDISTSVE	-,447	,737	,318	-,392
DDRET	,982	-,102	,094	-,007
DDREP	,748	,374	-,422	,173
DDRECI	,312	-,587	,744	,061
DCAMT	,086	,796	,103	,175
DECAMH	,803	,504	-,187	,228
BNT20	-,939	-,081	-,066	,306
PLT20	,505	-,359	,660	,096
MTR20	,343	-,553	,713	,258
PRA20	-,895	,096	,022	,400
SVE20	,445	,635	-,365	-,229

Los datos presentados en el Cuadro 11 son representados gráficamente en la Figura 29. En ella se aprecian los grupos que poseen los mayores pesos de autovalores y por lo tanto la mayor representatividad en la varianza explicada de los datos. Estos grupos que se aprecian con distinto signo en el Cuadro 11 determinan cuáles son las variables que explican mejor los comportamientos de la concertación y exportación total de nitrógeno, pero con direcciones diferentes. Las variables que se consideran son aquellas con mayor autovalor o valor propio ($R^2 > 0,7$). El primer componente se presentan la mayor cantidad de autovalores ($R^2 > 0,7$), estas variables seleccionadas poseen en general una relación positiva entre variables fisiográficas con la excepción del Índice de Compacidad (ICOM) que presenta una relación negativa con respecto a las demás variables fisiográficas en este componente. También presenta un autovalor positivo la variable proporción de Plantación Forestal. Contrarias a estas se encuentran las variables relacionadas a bosque nativo tanto en proporción total y de áreas búfer. Los otros 3 componentes principales no poseen una tendencia clara con respecto al tipo de variable. En el Cuadro 12 se pueden apreciar las variables con mayor explicación de la varianza con sus distintas direcciones.

Cuadro 12. Variables con mayor explicación de la varianza (autovalor > 0,7) para los datos asociados a la concentración y exportación total de nutrientes en el área de estudio.

Dirección Positiva	Dirección Negativa
Proporción de plantación Forestal (PLA)	Superficie en ha (SPHA)
Proporción de matorral (MTR)	Proporción de Bosque Nativo (BNT)
Índice de distancia a bosque nativo (IDISBNT)	Proporción de Bosque Nativo en Búfer de 20 m (BNT20)
Densidad de drenaje cauces de orden I (DDRECI)	Proporción de Pradera en Búfer de 20 m (PRA20)
Densidad de drenaje Total (DDRET)	Índice de compacidad (ICOM)
Densidad de caminos excepto Huellas (DECAMEH)	Índice de distancia a Matorral (IDISMTR)
Densidad de caminos total (DECAMT)	
Proporción de áreas sin vegetación (SVE)	
Índice de distancia a áreas sin vegetación (IDISSVE)	
Índice de distancia a plantación forestal (IDISPLA)	
Índice de distancia a Bosque nativo (IDISBNT)	
Pendiente media (PME)	
Exportación de Nitrógeno Total (EXNTO)	

5. DISCUSIÓN

Al analizar los datos del presente estudio, se observa que las concentraciones media mensuales en el agua de escorrentía, muestran a la cuenca San Juan, que es la que posee una mayor proporción de bosque nativo (92%), con el valor promedio de concentración mas bajo de N-Total ($36,8 \mu\text{g L}^{-1}$), con una concentración de nitrógeno Inorgánico Disuelto (DIN) igual a $15,8 \mu\text{g L}^{-1}$ que es inferior a los $18,6 \mu\text{g L}^{-1}$ de Nitrógeno Orgánico Disuelto (DON). Estos valores son distintos en las otras cinco cuencas estudiadas en las cuales los valores de DIN superan el 70% como parte del Nitrógeno Total. Los resultados obtenidos en la concentración de nitrógeno en estas cinco cuencas, difieren de estudios realizados en cuencas con cobertura boscosa (Oyarzún y Huber, 2003) y prístinas del sur de Chile y Argentina (Perakis y Hedin, 2002; Van Breemen, 2003) donde se encontraron valores de concentración de DIN inferiores a los de DON. Estos valores se asemejan más a los obtenidos en la cuenca San Juan, no obstante y aunque en esta cuenca el DON alcanza un 54 % como parte del nitrógeno total, en la mayor parte del periodo de estudio las concentraciones de DIN superan a las de DON. Esto sumado a que en los bosques prístinos el componente con mayor concentración como parte del DIN es el N-NH_4 y en la cuenca San Juan sea el N-NO_3 el con mayor participación como parte del DIN, alejan la posibilidad de asemejar la cuenca San Juan con los bosques prístino del sur de Chile y Argentina, en cuanto a la dominancia de DON, como la fracción dominante del nitrógeno, tal como lo han presentado Perakis y Hedin (2002) y Van Breemen (2002). Esto probablemente esté explicado por el hecho de que la cuenca San Juan ha estado sometida a una presión antrópica constante, con introducción de ganado, extracción de leña y madera.

No se observaron diferencias significativas en la concentración de fósforo total (Cuadro 4), sugiriendo que las fuentes de P están ligadas al sustrato del suelo, que es semejante en las seis cuencas. Según Rutherford (2004) es razonable suponer que la abundancia de fósforo en estos tipos de suelo es más importante que las diferencias de uso de estos. Además no existen praderas ganaderas o terrenos agrícolas importantes dentro de algunas de estas cuencas que pudieran alterar las concentraciones producto de fertilización. De acuerdo con esto Borie y Rubio (2003) han encontrado en ecosistemas boscosos del sur de Chile, cantidades de P menores que las de terrenos agrícolas, aunque el Po (fósforo orgánico) supera el 50% del fósforo total al igual que en terrenos agrícolas. En suelos con baja disponibilidad de P, las plantas y los microorganismos compiten por el P en la solución del suelo. Ello favorece un rápido ciclaje a través de los procesos de mineralización e inmovilización y en donde el Po constituye una fuente importante para suplir estas demandas (Tiessen et al., 1994).

En cuanto a la exportación de nitrógeno, se aprecia que el nitrato (NO_3) es la principal forma de nitrógeno encontrado en concentración, alcanzando un promedio cercano al 86% en la conformación del nitrógeno inorgánico disuelto.

La cuenca San Juan tiene una menor exportación de NO_3 y DIN, lo que se observa claramente en las Figuras 7 y 8 con valores similares a los obtenidos por Oyarzún *et al.* (1997), en un estudio realizado en microcuencas cercanas al lago Rupanco. En este sentido los autores señalan que las diferencias en la exportación de DIN se deban posiblemente a los menores tiempos de residencia del escurrimiento subsuperficial en el suelo, lo que facilitaría la desnitrificación bajo condiciones

saturadas, la carencia de un escurrimiento fustal continuo, especialmente en la estación de crecimiento.

Como se mencionó anteriormente la concentración de DIN es mayor en cinco de las cuencas, con excepción de San Juan donde la concentración de DON supera a las de DIN. Por lo tanto las exportaciones de DON en estas cinco cuencas siguen el mismo patrón, donde la exportación de DIN supera el 70 % como parte del nitrógeno total. Lo que contrasta con lo reportado por Weathers *et al.* (2000) y Perakis y Hedin (2002) en bosques prístinos de Chiloé, donde las exportaciones de DON superan mayormente a las de DIN.

Con el análisis de componentes principales se obtiene una mejor visión de las relaciones entre la concentración y exportación de nitrógeno y fósforo con las variables fisiográficas y de uso de suelo. Se observa en el PC1 que las variables fisiográficas que se relacionan positivamente con la concentración y exportación de nutrientes, son: Índice de distancia a bosque nativo (IDISBNT), Densidad de Drenaje Total (DDRET), Densidad de Drenaje del Cauce Principal (DDREP), Densidad de Caminos Excepto Huellas (DECAMEH). También en esta misma dirección está la variable de Paisaje, Proporción de Plantación Forestal (PLT) (Cuadro11). En dirección contraria se encuentran las variables: superficie en hectáreas (SPHA), Proporción de Bosque Nativo (BNT), Proporción de Bosque Nativo en Búfer de 20 m. (BNT20), Proporción de Pradera en Búfer de 20 m.(PRA20) y el Índice de Compacidad (ICOM). De este modo, las primeras variables están agrupadas en una dirección asociada al aumento de la concentración y exportación de nutrientes. Mientras que en dirección contraria se agrupan las variables más importantes en disminuir las concentraciones (Figura 29). En el PC2, hay tan solo dos variables que presentan

una mayor explicación de la varianza ($R^2 > 0.7$), ambas relacionadas positivamente con el aumento de la concentración y exportación total de nutrientes, una es la Pendiente Media de la cuenca (PMED) que tiene una relación directa con la velocidad del agua y por lo tanto, también afecta a los flujos de agua de las cuencas, lo que tiene influencia sobre la exportación de nutrientes. La variable Densidad Total de Caminos (DTCAM), está relacionada también con la mayor concentración y exportación total de nutrientes, debido a sus características de menor protección del suelo.

Los resultados obtenidos para la retención total de nitrógeno muestran una relación positiva con la proporción de bosque nativo ($r=0,537$) y negativa con la proporción de plantación forestal ($r= -0,484$) y aunque la proporción de bosque nativo explica un 33% de la variación de retención total de nitrógeno (Figura 27), la relación no es estadísticamente significativa ($p > 0,05$). De acuerdo con nuestros datos es complicado establecer las razones exactas de la capacidad de retención de nitrógeno en las cuencas con distinto uso de suelo. Jaworsky et al. (1992) dice que los cambios en el uso de suelo que aumentan los flujos de agua, probablemente disminuyan la capacidad de retención de nitrógeno. Tales cambios incluyen actividades de agricultura y urbanismo que originan un incremento del escurrimiento, y la explotación forestal los cuales hacen disminuir las pérdidas por evapotranspiración.

Además la capacidad de la retención de N de una cuenca es controlada por la asimilación biológica de la vegetación, suelo, microbiológica, y por parámetros y procesos hidrológicos. El crecimiento de los árboles en bosques templados está generalmente limitado por nitrógeno

(Gutshick 1981). La mayoría del N disponible para las plantas, es derivado de la mineralización biológica del nitrógeno contenido en la materia orgánica del suelo y detritus (Raison *et al.* 1987). Pérez *et al* (1998) indican que los procesos de mineralización son correlacionados con una alta actividad biológica del suelo, mayor contenido de N inorgánico lábil e incremento del input vía hojarasca fina. El nitrógeno acumulado en tejidos microbianos y materia orgánica del suelo de ecosistemas boscosos, puede representar un componente significativo en la retención de N de las cuencas (Bormann *et al.* 1977; Vitousek and Matson 1984).

En cuanto a la retención de fósforo total las salidas superaron ampliamente a las entradas, debido a lo cual las proporciones de “retención” de fósforo total fueron negativas. En tanto que la relación entre la “retención” de fósforo total y la proporción de bosque nativo resulto ser positiva ($r = 0,867$) y fue estadísticamente significativa ($p < 0,05$) explicando 75 % de la variación de retención de fósforo total. Otros estudios han señalado que la retención de fósforo subsuperficial es muy variable (Vought *et al.* 1994). Hill (1982) encontró que las retenciones de fósforo son considerables en los meses de verano cuando los flujos son bajos.

De lo descrito anteriormente se puede concluir que, la conversión de bosque nativo por plantaciones forestales en el sur de Chile, producen un aumento en la concentración de nitrato en el agua de escorrentía, especialmente en las cuencas con mayor porcentaje de plantaciones forestales. El nitrato fue la forma de nitrógeno con mayor porcentaje en la exportación de nitrógeno total, presentando en las cuencas con mayor porcentaje de plantaciones forestales una exportación superior al 60%, en cambio, la cuenca San Juan que posee un mayor porcentaje de

bosque nativo solo exporto un 35% de nitrato. Del mismo modo, en esta cuenca la exportación de DON fue superior al 50%, y solo en esta cuenca fue superior a la exportación de DIN.

Estas diferencias en la retención de nutrientes probablemente se deben, a las diferencias en la cobertura vegetal y al tipo de manejo como, tala rasa, aplicación de fuego y herbicidas que se realiza en las plantaciones. En este sentido Huber y Oyarzún (1984) señalan que, el manejo del bosque (especialmente las plantaciones) afecta su balance hídrico, porque afecta el monto de agua que alcanza el suelo, la cantidad que se evapotranspira, la variación temporal y espacial del contenido de agua edáfica, y las tasas de precolación. Además la tala rasa, produce un aumento de la escorrentía, lo que acelera la erosión del suelo y arrastre de sedimentos a los cursos y cuerpos de agua afectando su calidad físico-química (Meneses y Gayoso, 1995). En relación a esto, Bormann y Likens (1979), señalan que la cosecha de árboles puede liberan grandes cantidades de nitrógeno al agua de escorrentía y subterránea.

6. BIBLIOGRAFIA

Amezaga, I., Gonzalez, A., Domingo, M., Echeandia, A. & Onaindia, M. (1997) Atmospheric deposition and canopy interactions for conifer and deciduous forests in northern Spain. *Water, Air and Soil Pollution* 97: 303-313.

Andersen, B. R. & Gundersen, P. (2000) Nitrogen and Carbon Interactions of Forest Soil Water. In: *Carbon and Nitrogen Cycling in European Forest Ecosystems*. Ecological Studies 142 (E.D Schulze ed.) pp. 3332-340. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

APHA., AWWA., & WPCF. (1975) *Standard methods for examination of water and wastewater*, 14th edition. American Public Health Association.

Borie, F. & Rubio, R. (2003) Fósforo total y fósforo orgánico en suelos volcánicos de Chile. *Gayana Bot.* 60(1): 69-78.

Bormann, F. H., Likens, G. E., & Melillo, J. M. (1977). Nitrogen budget for an aggrading northern hardwood forest ecosystem. *Science* 196:981-983.

Bormann, F. H. & Likens, G. E. (1979) *Pattern and Process in a Forested Ecosystem*. Springer-Verlag., New York.

Brown, A. H. F., & ILES, M. A. (1991) Water Chemistry Profiles under Four Tree Species at Gisburn, NW England. *Forestry*. 64: 169 - 187.

Crockford, R. H., Richardson, D. & Sageman, R. (1996a) Chemistry of rainfall, throughfall and stemflow in a Eucalypt forest and Pine plantation in south-eastern Australia: 1. Rainfall. *Hydrological Processes* 10: 1-11.

Crockford, R. H., Richardson, D. & Sageman, R. (1996b) Chemistry of rainfall, throughfall and stemflow in a Eucalypt forest and Pine plantation in south-eastern Australia: 2. Rainfall. *Hydrological Processes* 10:13-24.

De Schrijver, A., Van Hoydonck, G., Nachtergale, L., de Kreersmaecker, L., Mussche, S. & Lust, N. (2000) Comparison of nitrate leaching under silver birch (*Betula pendula*) and corsican pine (*Pinus nigra* sp. *Laricio*) in Flanders (Belgium). *Water, Air and Soil Pollution* 122:77-91.

De Vries, W. and Jensen, P. (1994) Effects of acid deposition on 150 forest stands in the Netherlands. Input-Output budgets for sulphur, nitrogen, base cations and aluminium. Report 69.3, Wageningen, The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research. 60 p.

Dinerstein, E. (1996). The Global 200: Key Ecoregions for Saving Life on Earth. World Wildlife Fund. US, Washington DC.

Donoso, C. (1993) *Ecología Forestal: Bosques templados de Chile y Argentina. Variación estructura y dinámica*. Editorial Universitaria, 484 p.

Galloway, J. N., Hiram, L. & Kasibhatla, P. S. (1994) Year 2020: Consequences of population growth and development on deposition of oxidized nitrogen. *Ambio* 23: 120-123.

Gutshick, V. P. (1981) Evolved strategies in nitrogen acquisition by plants. *American Naturalist* 118:607-637.

Jaworski, N. A., Groffman, P. M., Keller, A. A. & Prager, J. C. (1992) A Watershed Nitrogen and Phosphorus Balance: The Upper Potomac River Basin. *Estuaries* 15: 83-95

Hedin, L., Armesto, J. & Jhonson, A. H. (1995) Patterns of nutrient loss from unpolluted, old growth temperate forest: evaluation of biogeochemical theory. *Ecology* 76: 493-509.

Henriksen, A. & Hessen, D. (1997) Whole catchments studies on nitrogen cycling: nitrogen from mountains to fjords. *Ambio* 26: 254-257.

Hill, A. R. (1981) Stream phosphorus exports from watersheds with contrasting land uses in southern Ontario. *Journal of the American Water Resources Association* 17 (4), 627-634.

Huber, A. & Oyarzún, O. (1984) Factores reguladores de la intercepción en un bosque adulto de pino radiata. *Bosque* 5(2).

Lovett, G. M., Weathers, K. C. & Sobczak, W. V. (2000) Nitrogen saturation and retention in forested watersheds of the Catskill Mountains, New York. *Ecological Applications* 10: 73-84.

Meneses, M. & Gayoso, J. (1995) Estudio de impacto ambiental proyecto forestal de los predios Tepuhueico y El Canelo. Goleen Spring Forestal (Chile) CIA Ltda. Informe de convenio N° 221. Serie técnica Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, Valdivia 105 p.

Nissen, J. M., Garay, M., Aguilera, A. & Valenzuela, E. (2000) Calidad de las aguas subterráneas en la Décima Región de Chile. *Agro Sur* 28: 25-39.

Oyarzún, C. E., Campos, H. & Huber, A. (1997) Exportación de nutrientes en microcuencas con distinto uso del suelo en sur de Chile (Lago Rupanco, X Región). *Revista Chilena de Historia Natural* 70: 507-519.

Oyarzún, C. E., Godoy, R. & Leiva, S. (2002) Atmospheric deposition of nitrogen in a transect from the Central Valley to Cordillera de Los Andes, south-central Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 75:233-243.

Perakis, S. S. & Hedin, L. O. (2001) Fluxes and fates of nitrogen in soil of an unpolluted old-growth temperate forest, southern Chile. *Ecology* 82: 2245-2260.

Perakis, S. S. & Hedin, L. O. (2002) Nitrogen loss from unpolluted South American forests mainly via dissolved organic compounds. *Nature* 415: 416-419.

Pérez, C., Hedin, L. & Armesto, J. J. (1991) Descomposición de hojas, biomasa de raíces y características de los suelos en bosques mixtos de coníferas y especies laurifolias en el Parque Nacional Chiloé, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural* 64: 479-490.

Perez, C., Hedin, L. & Armesto, J. J. (1998) Nitrogen mineralization in two unpolluted old-growth forest of contrasting biodiversity and dynamics. *Ecosystems* 1: 361-373.

Raison, R., Connel, M. & Khanna, P. (1987) Methodology for studying fluxes of soil mineral-N in situ. *Soil, Biol. Biochem.* 19(5): 521-530.

Rojas, C. (1990) Análisis del consumo de fertilizantes en Chile y el mundo. Informativo Agroeconómico Fundación Chile, Agosto: 51-57.

Rutherford, P. (2004) Efectos del paisaje sobre la calidad del agua en seis cuencas costeras de la Provincia de Valdivia, Región de Los Lagos, Chile. Tesis Ingeniería Forestal. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. 187 p.

Tiessen, H., Chacon, P. & Cuevas, E. (1993) Phosphorus and nitrogen status in soil and vegetation along a troposequence of dystrophic rainforest of the upper Rio Negro. *Oecologia* 99: 145-150.

Van Breemen, N. (2002) Natural organic tendency. *Nature* 415:381-382.

Vitousek, P. M. & Matson, P. A. (1984) Mechanisms of nitrogen retention in forest ecosystems: A field experiment. *Science* 225:51-52.

Vitousek, P. (1994) Beyond global warming: ecology and global change. *Ecology* 75:1861-1876

Vought, L., Dahl, J., Pedersen, C., & Lacoursiere, J. (1994) Nutrient retention in riparian ecotones. *Ambio* 23:342-348.

Weathers, K. C., Lovett, G. M., Likens, G. E., and Caraco, N.F.M. (2000). Cloudwater inputs of nitrogen to forest ecosystems in Southern Chile: Forms, fluxes, and sources. *Ecosystems* 3:590-595.

7. ANEXO I

Variables de Uso de Suelo y fisiográficas para las cuencas estudiadas.

a) Uso de suelo y superficie (ha) total de las cuencas en estudio.

Uso de Suelo	SJUA	JOA2	LPLA	GUIN	LMIN	JOAQ
BNT	1337	3,7	68,5	176,2	588,7	131,2
MTR	85,7	7,5	70,2	15,1	115,8	37,7
PRA	0	41,6	244,6	56,1	117,4	93,2
PLT	29,2	0	1,3	0	42,1	15
SVE	0	1,9	1	4,9	3,8	4,6
Total general	1451,9	54,8	385,6	252,3	281,1	287,7

b) Superficie de Uso DE Suelo dentro de la Franja Búfer de 20 m sobre red hidrográfica.

Uso de Suelo	Cuenca Hidrográfica					
	SJUA	JOA2	LPLA	GUIN	LMIN	JOAQ
BNT	134	2,2	16,8	33	82,8	26
MTR	8,8	5,6	41,8	2,1	7	10,4
PRA	0	2,5	17,8	1,1	2	10,8
PLT	3,3	0	0	0	2,3	0,3
SVE	0	0,5	0	0,3	0,2	0,6
Superficie total (ha)	146,1	10,8	76,6	36,5	94,3	48

c) Densidad de drenaje y de caminos para las cuencas en estudio.

Cuenca Hidrográfica	Densidad de Drenaje (m/ha)			Densidad caminera (m/ha)	
	Total (Ddrt)	Cauce principal (Ddrp)	Cauces de Orden1 (Ddr1)	Total (Dtcam)	Excepto Huellas (Dcamsh)
GUIN	39,5	11,8	18,7	14,7	14,7
JOAQ	51,3	36	2,2	52,1	52,1
JOAQ2	44,5	9,6	24,9	77,4	25,8
LMIN	27,9	4,7	30,3	52,8	15,6
LPLA	51,8	8,8	171	21,6	20,8
SJUA	25,5	5	14,2	28,6	8,8

d) Pendiente y Altitud media, máxima y coeficiente de variación (CV%) y pendiente media de la caída del cauce principal, para las cuencas en estudio.

CUENCA	Pendiente(°)				Altitud (m.s.n.m.)		
	media	máxima	CV %	Cauce principal	media	máxima	CV %
GUIN	10,5	68,7	1	8,9	144,6	275	0,5
JOAQ	15,3	56,1	0,7	17,5	394,4	550	0,4
JOAQ2	14,8	47,7	0,7	14,7	339,1	505,3	0,4
LMIN	17,3	66	0,7	13,3	298,1	575	0,5
LPLA	4,9	28,9	1,4	3	1496	250	0,4
SJUA	16,5	63,4	0,8	7,6	383,3	700	0,5

e) Índice de compacidad o de Gravelius para las cuencas estudiadas. Se presenta la forma de la cuenca sugerida por el índice.

Cuenca	Superficie (ha)	Índice de Compacidad (Icom)	Forma según Icom
GUIN	252,3	1,5	Ovalada
JOAQ2	54,8	1,8	Alargada
JOAQ	281,7	1,2	Redonda
LMIN	867,7	1,1	Redonda
LPLA	385,6	1,3	Ovalada
SJUA	1451,9	1,2	Redonda

f) Índice de Martome para las cuencas estudiadas

Cuenca	Superficie (km2)	Altitud media (m)	Índice de martonne (Imar)-m/km2
GUIN	2,5	144,6	57,3
JOAQ2	0,5	339,1	618,6
JOAQ	2,8	394,4	140
LMIN	8,7	298,1	34,4
LPLA	3,9	149,6	38,8
SJUA	14,5	383,3	26,4

g) Índice de distancia por categoría de uso de suelo

Cuenca Hidrográfica	Uso de Suelo				
	BNT	PLT	MTR	PRA	SVE
LMIN	2,5	7	1,9	3,1	6,3
SJUA	2,5		1,7	1,3	1,9
GUIN	3,5	1,7	2,9		2,6
JOAQ	4	2,4	2	3,6	3,4
LPLA	5,4	2,3	2,1	3,2	1,3
JOAQ2	7,8	2,6	2,6	8	2,3