



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

MOVILIZACIÓN DE NITRÓGENO Y FÓSFORO EN LA CUENCA HIDROLÓGICA DEL  
RÍO VERDE

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
GONZALO JAYME TORRES

TUTOR PRINCIPAL  
DRA ANNE M. HANSEN, FACULTAD DE INGENIERÍA CAMPUS MORELOS

COMITÉ TUTOR  
M.C. VICENTE FUENTES GEA, FACULTAD DE INGENIERÍA  
DR. OSCAR FUENTES MARILES, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D. F. NOVIEMBRE 2014



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

**Presidente: M.C. VICENTE FUENTES GEA**

**Secretario: DR. OSCAR FUENTES MARILES**

**Vocal: M.I. CARLOS MANUEL MENENDEZ MARTÍNEZ**

**1<sup>er.</sup> Suplente: M.C. LUIS ALBERTO BRAVO INCLÁN**

**2<sup>d o.</sup> Suplente: DRA. ANNE M. HANSEN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA – CAMPUS MORELOS**

TUTOR DE TESIS:

**DRA. ANNE M. HANSEN**

-----  
FIRMA

## DEDICATORIA

A mi lugar "Donde mejor canta un pájaro", especialmente al más hermoso fruto que ese árbol ha dado

A ti Santi

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a la Facultad de Ingeniería – Campus Morelos, al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

A la Dra. Anne Hansen por ser mi tutor principal durante mis estudios de maestría y en particular por su apoyo, consejos y guía.

A los integrantes de mi comité tutorial, Dr. Oscar Fuentes Mariles, M.I. Carlos Manuel Menéndez Martínez, M.C. Luis Alberto Bravo Inclán, y M.C. Vicente Fuentes Gea, cuyas sugerencias y observaciones sirvieron para mejorar este trabajo.

Al Dr. Emilio Mayorga, al M.I. Carlos Corzo y al Biól. Marco Antonio Mijangos que me proporcionaron información y herramientas esenciales para la realización de esta tesis.

**Índice**

<b>RESUMEN .....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VII</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo.....	2
1.2 Metas .....	2
1.3 Hipótesis.....	2
<b>2 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
2.1 Eutroficación.....	3
2.2 Nitrógeno: ciclo biogeoquímico, efectos ambientales y límites.....	6
2.3 Fósforo: ciclo biogeoquímico, efectos ambientales y límites.....	9
2.4 Fuentes y movilización de nutrientes .....	10
2.4.1 Fuentes y movilización de nitrógeno.....	11
2.4.2 Fuentes y movilización de fósforo .....	12
2.5 <i>Métodos para evaluación de cargas de nutrientes</i> .....	13
2.6 <i>Modelo NEWS2</i> .....	14
2.6.1 Descripción del modelo NEWS2 .....	15
2.6.2 Bases del modelo NEWS2.....	18
<b>3 ANTECEDENTES.....</b>	<b>25</b>
3.1 <i>Descripción de la zona de estudio</i> .....	25
3.2 <i>Inventario de fuentes de nutrientes</i> .....	29
<b>4 METODOLOGÍA.....</b>	<b>30</b>
4.1 <i>Delimitación de la cuenca hidrológica</i> .....	30
4.2 <i>Selección de modelo para evaluación de cargas de nutrientes</i> .....	32
4.3 <i>Reconocimiento de campo y muestreo</i> .....	33
4.4 <i>Análisis de datos de monitoreo</i> .....	35
4.4.1 Gastos .....	36
4.4.2 Concentraciones de nutrientes.....	37
4.4.3 Cargas de nutrientes.....	38
4.5 <i>Datos de entrada al modelo NEWS2</i> .....	39
4.5.1 Propiedades físicas de la cuenca .....	40
4.5.2 Biogeofísica de la cuenca.....	42
4.5.3 Hidrología y clima .....	47
4.5.4 Fuentes puntuales .....	51

4.5.5 Uso de suelo y fuentes difusas .....	56
4.5.5.1 Uso de suelo .....	56
4.5.5.2 Fuentes difusas.....	57
4.6 Implementación del modelo NEWS2.....	75
4.6.1 Datos de entrada .....	75
4.6.2 Modificación de archivos de configuración (.cfg).....	76
4.6.2.1 General setup (gensetup.cfg).....	76
4.6.2.2 Variables (vars.cfg).....	77
4.6.3 Corrida de modelo NEWS2 .....	77
4.6.4 Datos de salida.....	78
4.7 Complementación del inventario de emisión de nutrientes .....	79
4.8 Cálculo de carga máxima admisible de nutrientes.....	80
4.9 Formulación de escenarios de reducción de cargas .....	81
4.10 Determinación de la atenuación natural.....	83
<b>5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>84</b>
5.1 Concentraciones de nutrientes.....	84
5.2 Fuentes generadoras de nutrientes .....	87
5.3 Cargas de nutrientes .....	88
5.4 Cargas máximas admisibles de nutrientes .....	89
5.5 Escenarios para reducción de carga de nutrientes.....	90
5.6 Atenuación natural de nutrientes.....	94
<b>6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>95</b>
<b>7 REFERENCIAS.....</b>	<b>96</b>
Anexo A Comparación de concentraciones de nutrientes medidos durante temporada de estiaje	103
Anexo B Inventarios ganaderos para los municipios en la cuenca hidrológica del río Verde .....	105
Anexo C Hojas de entrada para modelo NEWS2 .....	108

## Índice de figuras

Figura 1 Procesos en ciclo del nitrógeno .....	7
Figura 2 Ciclo del fósforo.....	10
Figura 3 Diagrama conceptual de retenciones y liberaciones de P en un sistema acuático .....	13
Figura 4 Fuentes y retenciones de nutrientes en cuencas hidrológicas considerados en NEWS2 ...	16
Figura 5 Cuenca hidrológica del río Verde .....	26
Figura 6 Extensión de la cuenca hidrológica del río Verde .....	27
Figura 7 Delimitación de subcuencas.....	28
Figura 8 Fuentes de contaminantes en la cuenca hidrológica del río Verde .....	29
Figura 9 Delimitación de la cuenca hidrológica.....	31
Figura 10 Sitios de muestreo en el río Verde del 8 al 10 de mayo del 2013.....	33
Figura 11 Recorrido cuenca hidrológica del río Verde .....	34
Figura 12 Localización de las desembocaduras de la cuenca Grande de Santiago y de las subcuencas en la cuenca hidrológica del río Verde .....	41
Figura 13 Mapa de clasificación climática Köppen - Geiger actualizado .....	44
Figura 14 Distribución de los seis principales tipos de rocas con resolución 1°x1° .....	45
Figura 15 Carta geológica de la República Mexicana .....	46
Figura 16 Polígonos de Thiessen para la cuenca del Arcediano con base en estaciones climatológicas .....	50
Figura 17 Localidades por subcuencas, en la cuenca hidrológica del río Verde .....	52
Figura 18 Uso de suelo en la cuenca del Arcediano .....	57
Figura 19 Curva de crecimiento (peso-edad) en ganado lechero durante todo el periodo de vida	58
Figura 20 Curva de crecimiento (peso-edad) en ganado lechero durante periodo temprano.....	59
Figura 21 Curva de crecimiento (peso-edad) en ganado lechero durante periodo de madurez.....	59
Figura 22 Curva de carga de N en excreta - peso de bovinos para producción de carne .....	60
Figura 23 Curva de carga de P en excreta - peso de bovinos para producción de carne .....	60
Figura 24 Curva de carga de N en excreta - peso de bovinos para producción de leche .....	61
Figura 25 Curva de carga de P en excreta - peso de bovinos para producción de leche .....	61
Figura 26 Curva de carga de N en excreta - peso de bovinos de uso no especificado .....	62
Figura 27 Curva de carga de P en excreta - peso de bovinos de uso no especificado .....	62
Figura 28 Relación peso-edad en porcinos criados en la República Mexicana.....	63
Figura 29 Distribución de áreas por municipio y por subcuenca en la cuenca hidrológica del río Verde.....	66
Figura 30 Modificación archivo gensetup.cfg .....	76
Figura 31 Modificación archivo vars.cfg.....	77
Figura 32 Ejecución de modelo NEWS2 .....	78
Figura 33 Concentraciones de N-NH <sub>4</sub> medidas en el río Verde. Época de estiaje. ....	84
Figura 34 Concentraciones de N medidas en el río Verde. Época de estiaje.....	85
Figura 35 Concentraciones de P-PO <sub>4</sub> medidas en el río Verde. Época de estiaje. ....	85
Figura 36 Concentraciones de P medidas en el río Verde. Época de estiaje. ....	86



Figura 37 Comparación de cargas de nutrientes en el sitio El Purgatorio .....	88
Figura 38 Comparación de cargas de nutrientes en el sitio La Cuña .....	89
Figura 39 Cargas de N estimadas en el sitio El Purgatorio para los escenarios evaluados y comparación con la CMAN y la CMAN-R.....	93
Figura 40 Cargas de P estimadas en el sitio El Purgatorio para los escenarios evaluados y comparación con la CMAN y la CMAN-R.....	93

## Índice de tablas

Tabla 1 Valores límite para el sistema fijo de clasificación trófica de OECD.....	4
Tabla 2 Valores límite para el sistema abierto de clasificación trófica de OECD .....	5
Tabla 3 Clasificación de estado trófico para P y clorofila “a” de lagos en zonas tropicales .....	6
Tabla 4 Procesos de oxidación y reducción en ciclo del nitrógeno .....	6
Tabla 5 Reacciones en el ciclo del nitrógeno .....	8
Tabla 6 Compuestos nitrogenados: efectos adversos en el ambiente .....	8
Tabla 7 Información de entrada requerida por el modelo NEWS2.....	16
Tabla 8 Ecuaciones base del modelo NEWS2.....	19
Tabla 9 Estaciones hidrométricas seleccionadas .....	26
Tabla 10 Comparativa de modelos con base en escalas temporal, escala espacial y parámetros que evalúa .....	32
Tabla 11 Comparativa de modelos con base en fuentes contaminantes, atenuación natural y condiciones de uso.....	33
Tabla 12 Métodos analíticos para determinación de nutrientes.....	34
Tabla 13 Promedios de gastos medios mensuales para la estación "El Purgatorio” .....	36
Tabla 14 Promedios de gastos medios mensuales para la estación "La Cuña” .....	37
Tabla 15 Concentraciones promedio de N y P en los sitios El Purgatorio y La Cuña .....	37
Tabla 16 Estimación de cargas de nutrientes por análisis de datos de monitoreo .....	39
Tabla 17 Áreas de las subcuencas en la cuenca hidrológica del río Verde .....	40
Tabla 18 Área total - área terrestre por subcuenca.....	41
Tabla 19 Número de celdas por subcuenca .....	42
Tabla 20 Localización de desembocaduras y centroides de subcuencas.....	42
Tabla 21 Gasto de descarga por subcuenca.....	47
Tabla 22 Retención de nutrientes en un cuerpo de agua en el centro de la República Mexicana...	48
Tabla 23 Escorrentía por subcuencas en la cuenca hidrológica del río Verde.....	49
Tabla 24 Precipitación media diaria y anual por subcuencas en la cuenca hidrológica del río Verde .....	50
Tabla 25 Densidad poblacional por subcuencas, en la cuenca hidrológica del río Verde .....	53
Tabla 26 Densidad poblacional urbana por subcuencas, en la cuenca hidrológica del río Verde ....	53
Tabla 27 Densidad poblacional urbana conectada al drenaje por subcuencas, en la cuenca hidrológica del río Verde.....	54
Tabla 28 Emisiones de nutrientes por agua residual por subcuenca, en la cuenca hidrológica del río Verde .....	55
Tabla 29 Uso de suelo por subcuenca, en la cuenca hidrológica del río Verde .....	56
Tabla 30 Cargas de nutrientes en desechos de ganado bovino.....	58
Tabla 31 Concentraciones de nutrientes y peso representativo para bovinos .....	63
Tabla 32 Relación peso – edad para cerdos criados en la República Mexicana .....	63
Tabla 33 Cargas emitidas por producción bovina y porcina en los municipios que se encuentran dentro de la cuenca hidrológica del río Verde.....	67

Tabla 34 Emisiones de nutrientes por actividad pecuaria por municipio dentro de la cuenca hidrológica del río Verde.....	70
Tabla 35 Distribución de municipios por subcuenca dentro de la cuenca hidrológica del río Verde.....	72
Tabla 36 Emisiones de nutrientes por actividad pecuarias por subcuenca, en la cuenca hidrológica del río Verde.....	74
Tabla 37 Emisiones de nutrientes por uso agrícola por subcuenca, en la cuenca hidrológica del río Verde.....	75
Tabla 38 Resultado de corrida para el sitio El Purgatorio.....	79
Tabla 39 Complementación de inventario de emisiones de nutrientes en la cuenca hidrológica del río Verde.....	80
Tabla 40 Cargas de nutrientes para los escenarios evaluados en la cuenca hidrológica del río Verde.....	82
Tabla 41 Emisión de nutrientes por fuentes generadoras, en la cuenca hidrológica del río Verde.....	87
Tabla 42 Emisión de nutrientes por actividad pecuaria en la cuenca hidrológica del río Verde.....	87
Tabla 43 Resultados de la estimación de cargas y reducciones de nutrientes para los escenarios evaluados.....	92
Tabla 44 Concentraciones de nutrientes en agua, muestreos realizados en época de estiaje sobre el cauce del río Verde.....	104
Tabla 45 Inventarios ganaderos por municipio en la cuenca hidrológica del río Verde.....	106
Tabla 46 Propiedades físicas de la cuenca (stn30v6ngnews). .....	109
Tabla 47 Áreas de la cuenca (basarea_cell_ng). .....	109
Tabla 48 Proporciones de áreas de la cuenca (stn30v601_gnews_ng). .....	110
Tabla 49 Litología y pendiente (lithologySlope_ng). .....	110
Tabla 50 Hidrología y coeficientes de retención (c00_disch_fqrem_reservret_ng). .....	110
Tabla 51 Fuentes puntuales (c00_hydro_pntsrc_other_ng). .....	111
Tabla 52 Fuentes difusas (c00_diffsrc_landuse_ng). .....	111

## RESUMEN

Las cargas de nutrientes como nitrógeno (N) y fósforo (P), que llegan a un cuerpo de agua son las principales causantes del proceso de eutroficación. Este proceso tiene varias consecuencias adversas; pero en general, se pueden resumir en la pérdida de valor del cuerpo de agua para diversos usos. Por lo tanto, es importante estimar las cargas de N y P que llegan a cuerpos de agua de interés por sus usos y/o aprovechamientos. Esta estimación no resulta sencilla ya que depende de todas las emisiones de N y P generadas en la cuenca además de diversos factores que influyen en la movilización de estos nutrientes desde su generación hasta su destino, y que provocan retenciones de los nutrientes en la cuenca hidrológica.

Es en la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde donde se tiene proyectada la construcción de la presa El Purgatorio que abastecerá de agua a la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco. Con el fin de prevenir la eutroficación en esta presa, en este trabajo se evalúan las cargas de nutrientes a este sitio mediante modelación y validación de los resultados con análisis de datos de monitoreo.

La herramienta utilizada para la evaluación de las cargas de nutrientes en la cuenca hidrológica del río Verde, fue el modelo NEWS2 (Nutrient Export WaterShed) desarrollado por la UNESCO para la predicción de cargas de nutrientes en la desembocadura de cuencas hidrológicas; tomando en cuenta, además de las emisiones, los efectos de la atenuación natural.

Se estimó que bajo las condiciones actuales, las cargas de nutrientes que llegan a la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde, son de 3,950 Mg año<sup>-1</sup> de N y 368 Mg año<sup>-1</sup> de P. Además se encontró que en la cuenca hidrológica del río Verde se presenta una atenuación natural de 96% de las emisiones de N y de 99 % de las de P.

Por otro lado, se formularon escenarios para la reducción de cargas nutrientes en la cuenca y se encontró que se obtienen mayores reducciones de las cargas de N y P en la desembocadura de la cuenca cuando se disminuyen las emisiones por aguas residuales municipales, seguidas de las emitidas por la producción pecuaria, muy por debajo se encuentran las reducciones en las emisiones por actividades agrícolas. Los resultados de la evaluación de escenarios de reducción de cargas de nutrientes por localización de las subcuencas, mostraron que la reducción es mayor cuando las emisiones se disminuyen en subcuencas más cercanas a la desembocadura de la cuenca hidrológica, ya que estas cargas sufren menor atenuación.

Para alcanzar y mantener el estado mesotrófico en el cuerpo de agua, este podría admitir como máximo  $427 \text{ Mg año}^{-1}$  de N y  $22 \text{ Mg año}^{-1}$  de P al no considerar retención alguna de nutrientes dentro de la presa El Purgatorio, mientras que si se consideran retenciones por sedimentación en la presa, las cargas máximas que podría admitir, son de  $628 \text{ Mg año}^{-1}$  para N y  $88 \text{ Mg año}^{-1}$  para P.

Considerando la retención de nutrientes por sedimentación en la presa El Purgatorio, para alcanzar y mantener el estado mesotrófico, es necesario reducir 90% de las emisiones de nutrientes por aguas residuales municipales y por lo menos 75% de las emisiones de nutrientes por actividad pecuaria en toda la cuenca hidrológica del río Verde.

## Abstract

Loads of nutrients such as nitrogen (N) and phosphorus (P), that are transported to water bodies, are the main cause of the eutrophication process; this process has several adverse consequences that can be summarized in the impairment of the water body for different uses. It is therefore very important to estimate N and P loads to water bodies of interest due to their different uses. This is not an easy task, as it depends on all N and P emissions generated in the basin as well as the mobilization and retention of these nutrients in the watershed, from the locations of their emission to their destination.

At the mouth of the Verde River Basin it is planned to construct the El Purgatorio dam which will supply water to the city of Guadalajara, Jalisco. In order to prevent eutrophication in this dam, in this thesis, the nutrient loads to this site are evaluated by modelling and validation of results with monitoring data.

The tool used for the assessment of nutrient loads in the Verde River Basin was the NEWS2 model (Nutrient Export WaterShed) developed by UNESCO for predicting nutrient loads in mouths of watersheds taking into account their emissions and the effects of natural attenuation.

Under the current conditions in the watershed, nutrient loads reaching the mouth of the Verde River Basin were estimated in  $3,950 \text{ Mg yr}^{-1}$  for N and  $368 \text{ Mg yr}^{-1}$  for P. It was also found that 96% of N emissions and 99% of P emissions are attenuated during their mobilization in the Verde River Basin.

On the other hand, scenarios for reduction in nutrient emissions in the watershed were formulated and larger reductions in N and P loads are obtained when municipal wastewater emissions are reduced, followed the emissions from livestock production; well below these are the emissions from agricultural activities. The results of the evaluation of nutrient loads reduction scenarios in separate sub-watersheds showed, that the higher loads reductions are obtained when emissions reductions are carried out closer to the mouth of the watershed, because these loads have less attenuation.

To achieve and maintain the mesotrophic state in the water body, this could receive maximum loads of  $427 \text{ Mg yr}^{-1}$  for N and  $22 \text{ Mg yr}^{-1}$  for P, when nutrient retention is not considered in the El Purgatorio dam, maximum loads could be as high as  $628 \text{ Mg yr}^{-1}$  for N and  $88 \text{ Mg N yr}^{-1}$  for P when retention of nutrients by sedimentation in the dam is considered.

Considering nutrient retention by sedimentation in the El Purgatorio dam, to achieve and maintain water in mesotrophic state, it is necessary to reduce 90% nutrient emissions by municipal wastewater and at least 75% of the nutrient emissions from livestock activities throughout the Verde River Basin.

## 1 Introducción

Las cargas de nutrientes, N y P principalmente, hacia los cuerpos de agua en una cuenca hidrológica son los principales causantes del proceso de eutroficación, debido a que la eutroficación es un proceso que limita el valor de los cuerpos de agua (Artebjerg et al., 2001), este fenómeno es de interés científico y social, por lo tanto se ha vuelto importante la estimación de las cargas de nutrientes que llegan a los cuerpos de agua.

La estimación de las cargas de nutrientes se puede realizar utilizando inventarios, los cuales se obtienen con las concentraciones de nutrientes representativas de cada actividad y los caudales de descarga o de escurrimientos. Con la realización de inventarios se estiman las emisiones de nutrientes generadas para las diversas actividades y usos de suelo, sin embargo, las cargas de nutrientes que llegan a los cuerpos de agua se ven reducidas por diversos procesos que en su conjunto son considerados como la atenuación natural. Debido a la complejidad y número de variables que intervienen en la atenuación natural, se recurre a la estimación de cargas por medio de modelación (Arabi, 2011). Los modelos para estimación de cargas de nutrientes existen en una variedad considerable, pero no todos fueron creados para este fin específicamente sino que son adaptaciones de modelos agrícolas, de calidad del agua o hidrológicos, estos últimos consideran en muchos casos a los contaminantes con características no reactivas. Por otro lado el monitoreo con base en muestreos también es útil, aunque no mide las cargas directamente ni es específico sobre su origen ya que solo determina la concentración de los nutrientes en un momento y lugar específico, por lo que sus resultados ofrecen información limitada sobre el problema. Aunado a lo anterior, la implementación del monitoreo frecuentemente resulta costosa.

La elección de uno u otro método depende del fin al que están destinados los estudios, los resultados requeridos y los datos con los que se cuente. Si se necesita determinar la condición actual de un cuerpo de agua con respecto a estándares establecidos y obtener información de las variaciones con respecto al tiempo de las concentraciones de nutrientes y contaminantes, lo más recomendable es realizar el monitoreo; si solo se requiere conocer cuáles son las actividades o usos que predominan en la emisión de nutrientes, tal vez con un inventario sea suficiente; sin embargo si el área de estudio es considerablemente amplia, las variables son diversas y se requiere simular escenarios para estimar las cargas de nutrientes que llegan a un cuerpo de agua bajo diferentes condiciones, la aplicación de un modelo es lo más recomendable, es importante mencionar que para que la modelación sea confiable, esta debe basarse en la información de buenos inventarios y verificarse con lo observado en monitoreos.

En este trabajo, se evaluaron las cargas de nutrientes en la cuenca hidrológica del río Verde, mediante la aplicación del modelo NEWS2 (Nutrient Export WaterShed) creado para la predicción de cargas de nutrientes en la boca de una cuenca hidrológica tomando en cuenta además de la emisión (a través de los inventarios) los efectos de la atenuación natural (Mayorga et al., 2010).

### **1.1 Objetivo**

Evaluar las cargas de N y P en la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde, considerando el efecto de la atenuación natural, para formular escenarios de reducción de nutrientes que ayuden a prevenir la eutroficación del agua en la presa El Purgatorio.

### **1.2 Metas**

- Utilizar un modelo y un inventario de fuentes de nutrientes, para evaluar las cargas en la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde, considerando las retenciones por efecto de la atenuación natural.
- Identificar las actividades y condiciones de mayor impacto en las cargas de N y P.
- Plantear y evaluar escenarios de mitigación de cargas de nutrientes en la desembocadura de la cuenca.

### **1.3 Hipótesis**

Las cargas de nutrientes que llegan a un cuerpo de agua dependen no sólo de las masas emitidas por las diversas fuentes sino también de sus características, la localización de las fuentes y las características de la cuenca hidrológica, lo que repercute en la atenuación natural de nutrientes durante la movilización.



## 2 Marco teórico

Como parte del marco teórico se tocan los temas de eutroficación, ciclos biogeoquímicos, efectos ambientales y límites establecidos para N y P, así como sus fuentes de generación y la forma en la que se lleva a cabo su movilización dentro de una cuenca hidrológica; también se presentan los métodos que existen para la evaluación de las cargas de nutrientes.

### 2.1 Eutroficación

Existen diferentes definiciones referentes a la eutroficación y ninguna es aceptada como única o excluyente de las demás, algunas de ellas son:

- Proceso de sobreproducción de algas y macrófitas en cuerpos de agua que puede producir problemas en ciertos usos de los mismos (CEPIS, 2001).
- Proceso en el cual la adición de nutrientes a los cuerpos de agua estimula el crecimiento algal (Bricker et al., 1999).
- Aumento en la tasa de crecimiento de materia orgánica a un ecosistema. Varios factores causan este aumento pero el más importante es el enriquecimiento de nutrientes (Nixon, 1995).

Estas definiciones coinciden en que se entiende la eutroficación como un proceso o un cambio y no como un estado permanente. El proceso de eutroficación incluye tanto el incremento de nutrientes en los cuerpos de agua como los efectos que estos nutrientes ocasionan (Stednick & Hall, 2003). Los principales nutrientes causantes de la eutroficación son las formas disueltas de N (nitrato, amoníaco y, en menor grado, nitrito) y de P (ortofosfato) (Ærtebjerg et al., 2001).

Las consecuencias de la eutroficación son de manera más importante pero no limitativas el crecimiento de algas nocivas, cambios en el sabor y olor del agua, formación de espumas, crecimiento excesivo de plancton, alteración de las cadenas tróficas, aumento de la cantidad de materia orgánica depositada en el fondo, anoxia, daños a la biodiversidad y en general reducción del valor del cuerpo de agua como fuente de abastecimiento y para fines recreativos (Ærtebjerg et al., 2001).

La eutroficación es un proceso que se presenta de forma natural y conduce de ecosistemas oligotróficos a ecosistemas eutróficos, pasando por ecosistemas mesotróficos que son sanos y productivos (Bricker et al., 1999); sin embargo, el aporte de nutrientes de fuentes antropogénicas acelera este proceso de forma importante y preocupante (CEPIS, 2001).

Para el estudio de la eutroficación es importante tomar en cuenta el concepto de nutriente limitante. El nutriente limitante es aquel que de acuerdo con la estequiometría celular de las plantas acuáticas, se consume antes que los demás nutrientes. Desde 1981, el Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del ambiente (CEPIS) lleva un programa de metodologías simplificadas para la evaluación de la eutroficación en lagos y embalses en climas tropicales de América Latina y el Caribe. Se ha encontrado que para estos cuerpos de agua el proceso de eutroficación está limitado por el fósforo (CEPIS, 2001). El concepto de nutriente limitante toma importancia al momento de controlar el proceso de eutroficación, ya que los esfuerzos deben centrarse en este nutriente, optimizando así las acciones de control.

Se han generado clasificaciones del estado trófico de los cuerpos de agua, algunas de estas clasificaciones se refieren a medidas directas de nutrientes mientras que otras se refieren a los efectos de este enriquecimiento como el aumento en biomasa o cantidad de oxígeno. Ningún parámetro es aceptado como único determinante en la evaluación del estado trófico (Zurlini, 1996).

Basado en el Programa Cooperativo Internacional en Monitoreo de Aguas Interiores la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico (OECD) estableció límites específicos (Tabla1) para P total, clorofila "a" y profundidad de disco de Secchi para la clasificación de lagos en zonas templadas (OECD, 1982). Estos límites se utilizan ampliamente como referencia tanto para evaluación de estados tróficos de aguas continentales como marinas.

**Tabla 1 Valores límite para el sistema fijo de clasificación trófica de OECD (1982) citado en Ryding & Rast (1989)**

	P total ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Clorofila "a" promedio ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Clorofila "a" máximo ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	Disco de Secchi promedio (m)	Disco de Secchi mínimo (m)
Ultraoligotrófico	$\leq 4$	$\leq 1.0$	$\leq 2.5$	$\geq 12$	$\geq 6$
Oligotrófico	$\leq 10$	$\leq 2.5$	$\leq 8.0$	$> 6$	$> 3$
Mesotrófico	10-35	2.5-8.0	8.0-25.0	3-6	3-1.5
Eutrófico	35-100	8.0-25.0	25.0-75.0	1.5-3	1.5-0.7
Hipereutrófico	$> 100$	$> 25.0$	$> 75.0$	$< 1.5$	$< 0.7$

Existen limitaciones en el uso de la anterior clasificación con valores fijos ya que un cuerpo de agua puede estar dentro de una clasificación trófica para un parámetro y en otra condición trófica para otro. La OECD intentó superar esta limitación realizando una evaluación estadística de su base de datos, el resultado fue una clasificación de limite abierto (Tabla2). En este sistema un cuerpo de agua puede ser considerado correctamente clasificado dentro de un estado trófico si no más de uno de los parámetros se desvían del promedio geométrico por +/- 2 desviaciones estándar para una clasificación trófica determinada (Ryding & Rast, 1989).

**Tabla 2 Valores límite para el sistema abierto de clasificación trófica de OECD (1982) citado en Ryding & Rast (1989)**

Parámetro		Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico	Hipereutrófico
P ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	X	8.0	26.7	84.4	
	X $\pm$ 1SD	4-85-13.3	14.5-49	48-189	
	X $\pm$ 2SD	2.9-22.1	7.9-90.8	16.8-424	
	RANGO	3.0-17.7	10.9-95.6	16.2-386	750-1200
	N	21	19 (21)	71 (72)	2
N ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	X	661	753	1 875	
	X $\pm$ 1SD	371-1180	485-1170	861-4 081	
	X $\pm$ 2SD	208-2103	313-1816	395-8 913	
	RANGO	307-1630	361-1387	393-6 100	
	N	11	8	37 (38)	
Clorofila "a" ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	X	1.7	4.7	14.3	
	X $\pm$ 1SD	0.8-3.4	3.0-7.4	6.7-31	
	X $\pm$ 2SD	0.4-7.1	1.9-11.6	3.1-66	
	RANGO	0.3-4.5	3.0-11	2.7-78	100-150
	N	22	16 (17)	70 (72)	2
Clorofila "a" valor pico ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	X	4.2	16.1	42.6	
	X $\pm$ 1SD	2.6-7.6	8.9-29	16.9-107	
	X $\pm$ 2SD	1.5-13	4.9-52.5	6.7-270	
	RANGO	1.3-10.6	4.9-49.5	9.5-275	
	N	16	12	46	
Profundidad de disco de Secchi (m)	X	9.9	4.2	2.45	
	X $\pm$ 1SD	5.9-16.5	2.4-7.4	1.5-4.0	
	X $\pm$ 2SD	3.6-27.5	1.4-13	0.9-6.7	
	RANGO	5.4-28.3	1.5-8.1	0.8-7.0	0.4-0.5
	N	13	20	70 (72)	

X= media geométrica, SD= desviación estándar, ()= número de variables usado en el primer cálculo, n= número de lagos

Los límites propuestos por la OECD fueron basados en estudios realizados en lagos en climas templados pero debido a que estas condiciones climatológicas no predominan en América Latina, la CEPIS realizó un estudio en lagos dentro de la región que se encuentran en climas tropicales y propone la clasificación mostrada en la Tabla 3.

**Tabla 3 Clasificación de estado trófico para P y clorofila “a” de lagos en zonas tropicales (CEPIS, 2001)**

Parámetro		Oligotrófico	Mesotrófico	Eutrófico
P ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	x	21.3	39.6	118.7
	X log $\pm$ SD	1.328 $\pm$ 0.165	1.598 $\pm$ 0.137	2.074 $\pm$ 0.316
	n	10	9	16
Clorofila “a” ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	x	3.56	6.67	17.39
	X log $\pm$ SD	0.552 $\pm$ 0.234	0.824 $\pm$ 0.225	1.24 $\pm$ 0.255
	n	8	7	8

X= media geométrica, X log= promedio logarítmico, SD= desviación estándar logarítmica, n= número de lagos

## 2.2 Nitrógeno: ciclo biogeoquímico, efectos ambientales y límites

El N está presente en forma importante en todo el planeta, ya sea en el agua, el suelo, organismos vivos, sus desechos y de manera predominante en la atmósfera, ya que está constituida en 78% de su volumen por  $\text{N}_2$ , convirtiéndolo en una fuente abundante de este elemento; no obstante, son pocos los organismos que pueden aprovechar el  $\text{N}_2$ . Las formas químicas orgánicas e inorgánicas de N son más biodisponibles, pero para que se rompa la molécula  $\text{N}_2$ , que es muy estable y pueda ser incorporada a los organismos, se necesita una elevada disponibilidad de energía, por ejemplo a través de los relámpagos, también puede ser fijado por procesos bioquímicos realizados por microorganismos o por fijación industrial. El N biológico se convierte en N inorgánico a través de la mineralización. Por otro lado, los procesos de desnitrificación liberan N a la atmósfera (Manahan, 2007). Todo lo anterior forma parte del ciclo del N, que se trata con más detalle a continuación.

Los procesos llevados a cabo mediante el ciclo del N son la fijación, la nitrificación, la reducción de nitrato, la asimilación, la desnitrificación, la amonificación y la aminación, la mineralización y la volatilización (Figura 1). La mayoría de las reacciones del ciclo del N son de óxido-reducción catalizadas por microorganismos (Tabla4), la incorporación de  $\text{NH}_4^+$  a la materia orgánica (aminación) o su desprendimiento (desaminación o amonificación) son las únicas reacciones que no se realizan mediante este tipo de proceso (Jenkins, 2000).

**Tabla 4 Procesos de oxidación y reducción en ciclo del nitrógeno (Jenkins, 2000)**

	Proceso	Reacción
Nitrificación	Oxidación	$\text{NH}_4^+$ a $\text{NO}_2^-$ a $\text{NO}_3^-$
Reducción de nitrato	Reducción	$\text{NO}_3^-$ a $\text{NO}_2^-$ a $\text{NH}_4^+$
Desnitrificación	Reducción	$\text{NO}_3^-$ a $\text{N}_{2(g)}$
Fijación	Reducción	$\text{N}_{2(g)}$ a $\text{NH}_4^+$

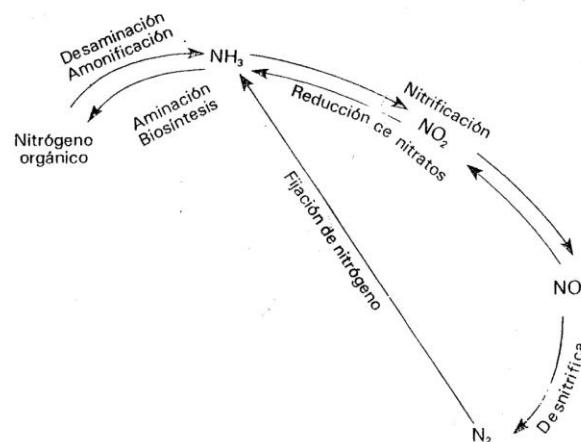


Figura 1 Procesos en ciclo del nitrógeno (Jenkins, 2000)

La fijación de N sucede en la atmósfera cuando el  $\text{N}_2$  se convierte en formas biodisponibles para plantas y animales (Raiswell & Brimblecombe, 1983). Esta fijación puede ser llevada a cabo por tres medios:

- Fijación abiótica: mediante procesos químicos espontáneos como la oxidación que producen los rayos formando óxidos de N a partir de N atmosférico.
- Fijación industrial: se hace mediante mecanismos tecnificados para la producción de amoníaco, una de las aplicaciones de este proceso es la producción de fertilizantes.
- Fijación biológica. Se lleva a cabo mediante bacterias nitrificantes que en conjunto con raíces de las plantas o por si mismas toman el N atmosférico y lo transforman a N orgánico. Este proceso también puede ser llevado a cabo por algunas algas verde – azules o cianobacterias.

En la nitrificación, el N en estado de oxidación -3 pasa a N en estado de oxidación +5 formando nitratos, esta reacción toma importancia ya que las plantas absorben el N principalmente en esta forma. En la naturaleza la nitrificación se lleva a cabo en dos pasos catalizados por dos grupos de bacterias, Nitrosomas que provocan el cambio de amoníaco a nitrito y las Nitrobacter que oxidan nitrito a nitrato. El proceso inverso a la nitrificación es la reducción de nitrato y sucede cuando el N del nitrato se reduce a estados de oxidación más bajos, esto es llevado a cabo en un ambiente reductor con ausencia de oxígeno libre. Bajo estas condiciones, algunas bacterias usan el nitrato como aceptor de electrones. Para que los organismos utilicen el N del nitrato para la síntesis de proteínas, primero deben reducirlo a su forma amoniacal (Manahan, 2007). La reducción de  $\text{NO}_3^-$  a  $\text{NH}_4^+$  es un proceso que ocurre en dos pasos, una catalizada por la enzima Nitrato Reductasa que reduce el nitrato a nitrito y otra catalizada por la Nitrito Reductasa que reduce el nitrito a amonio (Marquez & Cánovas, 2004). Un caso especial de reducción de nitrato es la desnitrificación en la que el producto es un gas que contiene nitrógeno, normalmente  $\text{N}_2$  y es llevada a cabo por acción bacteriana. La importancia de este proceso es que es el único que devuelve el nitrógeno fijado a la atmósfera (Manahan, 2007).

La forma en la que a partir de  $\text{NH}_4^+$  o  $\text{NH}_3$  es incorporada a los organismos como N orgánico es la aminación, mientras que el proceso inverso en el cual el  $\text{NH}_4^+$  se desprende de la materia orgánica nitrogenada es la amonificación (Jenkins, 2000). Otro proceso mediante el cual el N de los compuestos orgánicos principalmente aminoácidos se convierten a formas inorgánicas como  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{NO}_2^-$  es la mineralización. Este proceso sucede cuando los microorganismos descomponedores hacen lo propio con restos de plantas y animales (Raiswell & Brimblecombe, 1983).

Por último, si bien la volatilización no es considerada como una transformación dentro del ciclo es importante considerar que el amoniaco ( $\text{NH}_3$ ) puede volatilizarse lo que lleva a una contribución de N a la atmósfera. En la Tabla 5 se presentan las reacciones que suceden en cada proceso descrito.

La importancia del N para nuestro estudio son los efectos adversos que causan al medio ambiente pero sobre todo enfocado a los que ocurren en los cuerpos de agua (Tabla 6), se puede afirmar que las principales formas que influyen en estos sistemas acuáticos son los nitratos, nitritos y las formas amoniacales de N.

**Tabla 5 Reacciones en el ciclo del nitrógeno (Smil, 1996)**

Proceso	Reacción
Fijación (bacteriana)	$\text{N}_2 + 2\text{H}^+ + 3\text{H}_2 \leftrightarrow 2\text{NH}_4^+$
Nitrificación (amoniaco a nitrito)	$\text{NH}_4^+ + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NO}_2^- + 3\text{H}_2 + 2\text{H}^+$
Nitrificación (nitrito a nitrato)	$\text{NO}_2^- + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}_2$
Reducción del nitrato por plantas (asimilación)	$\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+ \leftrightarrow \text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2$
Desnitrificación	$2\text{NO}_3^- + 2\text{CH}_2\text{O} \leftrightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} + 2\text{HCO}_3^-$ $\text{N}_2\text{O} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$
Aminación-amonificación	$\text{NH}_4^+ \leftrightarrow \text{N}(\text{NH}_3)\text{-orgánico}$
Volatilización	$\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$

**Tabla 6 Compuestos nitrogenados: efectos adversos en el ambiente. Modificado de Stumm & Morgan (2012)**

Compuesto Nitrogenado	Estado de Oxidación	Principales fuentes	Efecto
$\text{NO}_3^-$	V	Fertilizantes	Salud humana, eutroficación
$\text{NO}_2^-$	III	Intermediario en nitrificación, desnitrificación y nitrato reducción	Tóxico para la vida acuática y para salud humana
$\text{NH}_3(\text{g}), \text{NH}_4^+$	-III	Fertilizantes y desechos animales	Toxicidad para la vida acuática, incremento en costo de potabilización del agua, eutroficación



Los criterios ecológicos de calidad del agua (CE-CCA-001/89) publicados en el Diario Oficial de la Federación el 13 de diciembre de 1989 (SEDUE, 1989) establecen para N los siguientes límites máximos permisibles: 5 mg L<sup>-1</sup> N-NO<sub>3</sub> como fuente de abastecimiento de agua potable y 90 mg L<sup>-1</sup> N-NO<sub>3</sub> para uso pecuario y, 0.06 mg L<sup>-1</sup> N-NH<sub>4</sub> para protección de la vida acuática en agua dulce y 0.01 mg L<sup>-1</sup> N-NH<sub>4</sub> para protección de vida en agua marina.

### 2.3 Fósforo: ciclo biogeoquímico, efectos ambientales y límites

El fósforo es un elemento importante en los ecosistemas ya que, en muchas ocasiones, se constituye como limitante para el desarrollo de los mismos. Una característica importante es que en la naturaleza, no existe en forma gaseosa estable, por lo que su ciclo es endógeno. En las plantas forma parte de los ácidos nucleicos constituyentes del material genético de los organismos y, aunque la cantidad de fósforo presente en las plantas es relativamente baja, esta es esencial para las mismas. Para que el fósforo sea aprovechado por las plantas se debe encontrar en forma inorgánica simple, que generalmente es el ión ortofosfato (Manahan, 2007). El fósforo es también un factor limitante en la fertilidad de los suelos y sistemas acuáticos pero la baja solubilidad de los compuestos inorgánicos de este elemento limitan su disponibilidad como nutriente (O'Neill, 1998).

El fósforo se presenta en la naturaleza casi exclusivamente como fosfato que es su estado totalmente oxidado con número de oxidación +5, este fosfato se presenta en los minerales como ortofosfato (PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) (Stumm & Morgan, 2012). Aunque la acción microbiana se presenta en el ciclo del fósforo, su acción no es tan importante como lo es en el ciclo del N.

Los fosfatos poliméricos se hidrolizan en agua a productos más simples, la velocidad de esta hidrólisis depende de varios factores como el pH pero el producto final siempre es una forma de ortofosfato, se ha encontrado que algunas algas y microorganismos catalizan esta hidrólisis pero aun cuando estas no estén presentes la tasa de hidrólisis es significativa en aguas naturales (Manahan, 2011). La reacción más simple de esta hidrólisis es:  $H_4P_2O_7 + H_2O \leftrightarrow 2H_3PO_4$

En la geósfera se encuentra la mayor reserva de fosfato ambiental, ya que el fósforo es retenido por minerales poco solubles como la hidroxiapatita. El fósforo soluble que proviene de los minerales fosfatados u otras fuentes como fertilizantes es asimilado por las plantas. Cuando estos organismos mueren y se descomponen por la acción microbiana se presenta la mineralización. Las acciones del hombre han impactado fuertemente en el ciclo del fósforo ya que se extraen grandes cantidades de fosfatos minerales que se utilizan como fertilizantes, detergentes, productos químicos industriales y aditivos para alimentos además de algunos compuestos tóxicos como insecticidas o gases militares venenosos (Manahan, 2007). El ciclo del fósforo está representado en la Figura 2.

El proceso de liberación del fósforo sin intervención antropológica solo depende del ciclo geológico (Figura 2). Los fenómenos naturales degradan las rocas fosfatadas y liberan fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) que por escurrimientos son arrastrados a los ríos y posteriormente a los mares donde pueden ser utilizados por la vida marina o depositados en los sedimentos. Las aves marinas se alimentan de peces siendo esta la única forma en que el fósforo puede regresar al suelo debido a que no forma compuestos volátiles (Miranda, 2005).

La solubilidad y volatilidad natural de los compuestos de fósforo es baja por lo que los flujos geoquímicos dependen de la transferencia de partículas suspendidas por los ríos hacia el océano o en forma de polvo por la atmosfera (lo que es poco significativo), por lo anterior la movilidad del fósforo en suelo se considera baja (O'Neill, 1998).

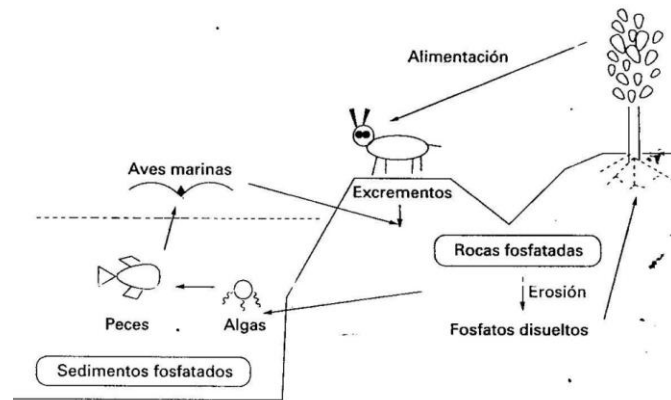


Figura 2 Ciclo del fósforo (Miranda, 2005)

Los CE-CCA-001/89 (SEDUE, 1989) establecen para P los siguientes límites máximos permisibles:  $0.1 \text{ mg L}^{-1} \text{ P-PO}_4$  como fuente de abastecimiento para agua potable,  $0.05 \text{ mg L}^{-1} \text{ P-PO}_4$  en influentes a lagos o embalses y  $0.025 \text{ mg L}^{-1}$  dentro del lago o embalse para prevenir el desarrollo de especies biológicas indeseables y para controlar la eutroficación acelerada.

## 2.4 Fuentes y movilización de nutrientes

Hay tres factores principales que influyen en la problemática de los nutrientes que se movilizan a un cuerpo de agua: la emisión, la movilización y los efectos (Nixon, 1995). La emisión se refiere a la generación de los nutrientes en las fuentes, la movilización a cómo se transportan y los procesos que provocan que los nutrientes se retengan o se liberen y los efectos, a la forma en que los cuerpos de agua reaccionan ante la incorporación de estos nutrientes. En este trabajo se abordará principalmente lo referente a la emisión y la movilización sin considerar a fondo los efectos en el cuerpo de agua.





Respecto a la emisión de nutrientes, se diferencian las fuentes puntuales y las difusas. Las fuentes puntuales son las que están bien definidas como por ejemplo el extremo de un tubo o la descarga de una industria, mientras que las fuentes difusas son aquellas en donde no se pueden identificar claramente los sitios de emisión (Dunnivant & Anders, 2006).

Las actividades antropogénicas son las mayores contribuyentes de N y P a los sistemas acuáticos; por otro lado la fijación y la depositación atmosférica son otras fuentes que contribuyen a la carga de N. Estas cargas que mayormente son no puntuales, son difíciles de estimar ya que provienen de actividades dispersas en áreas grandes además de que son variables con respecto al tiempo (Carpenter et al., 1998).

También el exceso de fertilizantes aplicados en la agricultura representa una importante carga de nutrientes a los cuerpos de agua. La excreta animal, es otra carga importante y esta se vuelve difusa cuando el ganado no está confinado sino en una extensión grande de terreno y la excreta se distribuye en esta amplia área. (Puckett, 1995).

Durante la movilización de los nutrientes, existen retenciones de los mismos que dependen de las características propias de la cuenca en la cual se movilizan, la suma de estas retenciones se denomina atenuación natural.

#### **2.4.1 Fuentes y movilización de nitrógeno**

El N puede entrar a un cuerpo de agua por cuatro rutas, fijación por cianobacterias, precipitación atmosférica, por escurrimientos y por aguas residuales, las dos primeras son consideradas de menor relevancia en el proceso de eutroficación. Los escurrimientos pueden contener N proveniente de fuentes naturales, fuentes domésticas, agrícolas, pecuarias o industriales. El N presente en los escurrimientos y/o aguas residuales se compone de nitratos, nitritos (que es rápidamente oxidado a nitrato y entonces queda en bajas concentraciones), amoníaco y nitrógeno orgánico. Los nitratos y el amoníaco son usados por plantas mientras que el N orgánico es convertido a amoníaco por mineralización bacteriana. Bajo condiciones oxigenadas el amoníaco es oxidado por bacterias a nitrito y posteriormente a nitrato, pero en aguas profundas existen fuentes de amoníaco debido a la descomposición anaeróbica, en estos casos el amoníaco representa una importante carga de nutriente que contribuye a la eutroficación (Kelly & Naguib, 1984).

La retención de N puede ser causada por la depositación en sedimentos a través de la incorporación de este nutriente en organismos, así como por la desnitrificación bacteriana. Esta desnitrificación está influenciada por la concentración de nitratos, las condiciones en el sedimento, los aportes de materia orgánica y la variación en la salinidad (Nielsen et al., 2001).

### 2.4.2 Fuentes y movilización de fósforo

Las fuentes de fósforo son en su mayor parte difusas y se presenta principalmente en forma particulado, llegan a los ríos durante eventos de lluvia por escurrimiento. En lo referente a las emisiones antropogénicas, las emisiones puntuales se deben a descargas de aguas residuales municipales e industriales y las difusas están ligadas principalmente a la agricultura y el sector pecuario. Las emisiones naturales de fósforo incluyen el desgaste natural de los suelos, restos de vegetación, migración de peces y erosiones de la orilla del río. En cuanto a las emisiones por escurrimientos de granjas, estas son una combinación de aguas de lavados, excretas de ganado, y aguas residuales. Los escurrimientos por superficies como áreas forestales, campos de cultivo y áreas de pastoreo suceden cuando la lluvia pasa sobre o a través de las áreas mencionadas, lo que hace que se transporte y movilice el P hacia los ríos, estas cargas de P están representadas principalmente por erosión de suelo, fertilizantes, heces de ganado y vegetación. Cuando se presentan las lluvias una combinación de las cargas mencionadas son movilizadas a través de los suelos. Cuando el suelo está saturados, una mayor cantidad de fósforo es transportado aun cuando los eventos de lluvias sean mínimos (Withers & Jarvie, 2008). La mayoría del P transportado es en forma particulado y sedimentos suspendidos, este transporte se ha incrementado debido a la deforestación y a las practicas intensivas de agricultura (O'Neill, 1998).

Los sedimentos en los cuerpos de agua tienen reservas de fósforo que interactúan con el agua lo que conduce a una interacción entre la fase acuosa y la fase sólida de fósforo (Stumm & Morgan, 2012), por lo que deben ser considerados potencialmente como un reservorio.

Estudios de balance de masa han demostrado que los flujos de entrada de P no corresponden con los de salida y que el fósforo tiende a ser retenido dentro de los ríos particularmente en aquellos con caudal bajo. Las retenciones en ríos son la combinación de procesos biogeoquímicos y físicos que temporalmente remueven y/o transforman el fósforo permitiendo la asimilación biótica y abiótica de este. No todo el P que entra al sistema puede participar de igual forma en los ciclos biogeoquímicos, esto depende de la forma en la que se encuentre, su disponibilidad y el tiempo de residencia. La retención de fósforo no solo afecta en la concentración aguas abajo sino que también altera la biodisponibilidad de este lo que tiene implicaciones en su asimilación (Withers & Jarvie, 2008).

Los procesos físico-químicos que se llevan a cabo en cuanto a la movilización y retención de P son: sorción y desorción, precipitación mineral y dilución, advección y difusión, también existen procesos biológicos como la asimilación (Figura 3) (Withers & Jarvie, 2008).

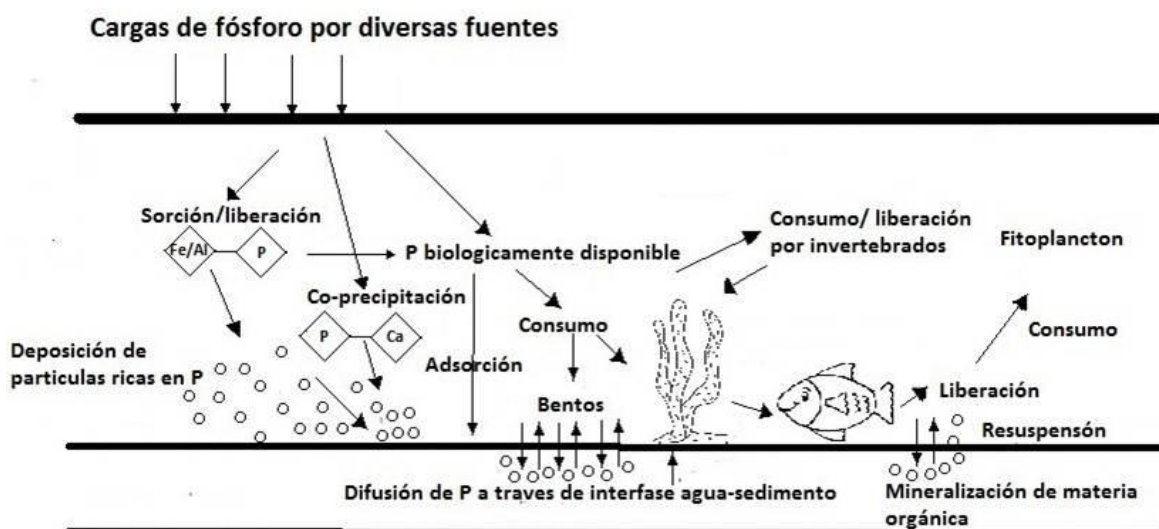


Figura 3 Diagrama conceptual de retenciones y liberaciones de P en un sistema acuático. Modificado de Withers & Jarvie (2008)

La liberación de P de los sedimentos es un proceso importante que varía espacial y temporalmente. Un factor que controla la liberación de fósforo en sedimentos es la temperatura ya que mucha de esta liberación es llevada a cabo por procesos microbianos los cuales son más eficientes en temperaturas elevadas. De la misma forma esta liberación decrece con incrementos de salinidad. Incrementos en pH pueden producir la liberación de P adsorbido en óxidos de hierro y aluminio a través de la competencia entre  $\text{OH}^-$  y  $\text{PO}_4^{3-}$ . En sistemas carbonatados una disminución en el pH libera P adsorbido en calcita. El P sorbido en óxidos de manganeso pueden ser liberados bajo condiciones anaeróbicas cuando la disolución reductiva de esos óxidos ocurre (Bianchi, 2007). Condiciones reducidas pueden incrementar la movilidad del fósforo debido a que el Fe insoluble en el cual está adsorbido es reducido a Fe soluble, lo que provoca la liberación del P. En condiciones ácidas los fosfatos de aluminio y hierro precipitan mientras que en condiciones básicas los fosfatos de calcio precipitan. La inmovilización del P depende por lo tanto de condiciones como pH, aireación, textura de los suelos, contenido de calcio, aluminio y óxidos de hierro y el consumo de fósforo por las plantas (Weiner, 2008).

## 2.5 Métodos para evaluación de cargas de nutrientes

Existen dos métodos principales para la evaluación de cargas externas de nutrientes a cuerpos de agua: la directa, mediante monitoreo y análisis y la indirecta, mediante desarrollo y aplicación de modelos (USEPA, 2008).

El monitoreo se basa en el muestreo en determinados periodos de tiempo de los gastos de agua que pasan por un punto del río y las concentraciones de nutrientes en los mismos (USEPA, 2008). En este método la atenuación natural está implícita ya que al medir las concentraciones en el cauce del río, las cargas de nutrientes se encuentran ya atenuadas, sin embargo no es posible identificar como están impactando las diferentes fuentes de nutrientes ni en que magnitud se lleva a cabo la atenuación. Por otro lado este método resulta caro debido a los costos de los muestreos y los aforos. Por otra parte, muchas veces los datos no resultan suficientes para una efectiva interpretación.

La modelación consta de tres pasos básicos que son la estimación de volúmenes de descarga de agua, la estimación de concentraciones características de nutrientes para cada fuente y el cálculo de la carga de contaminante (USEPA, 2008). Por lo anterior es necesaria y conveniente la realización de inventarios de fuentes contaminantes. Para el cálculo de la carga se han desarrollado modelos que involucran las emisiones (fuentes), posición espacial donde ocurren y procesos de retención que suceden en la movilización (atenuación natural).

La comprensión de las relaciones entre las fuentes de los nutrientes y los efectos de la carga de estos en el cuerpo receptor es necesaria para el manejo integral de las cuencas (IOC, 2008). Los modelos son desarrollados y deben ser utilizados para comprender mejor y predecir la entrada de nutrientes a los cuerpos de agua así como la respuesta de los mismos (NOAA, 2004). La modelación resulta particularmente útil cuando se requiere plantear escenarios de reducción de cargas de nutrientes.

## **2.6 Modelo NEWS2**

Global NEWS (Nutrient Exports Watersheds) es un grupo de trabajo científico interdisciplinario creado para estudiar la relación entre las actividades humanas y el enriquecimiento de nutrientes en los cuerpos de agua; se creó en 2002 como parte de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO con el respaldo de varios organismos gubernamentales. El objetivo principal de este grupo es crear y aplicar modelos para explicar la movilización de nutrientes (IOC, 2007).



### 2.6.1 Descripción del modelo NEWS2

La primera generación de los modelos NEWS fueron usados para modelar la exportación de nutrientes (N, P y carbón) en sus formas disueltas y particuladas, orgánicas e inorgánicas, provenientes de fuentes naturales y antropogénicas a las desembocaduras de las cuencas hidrológicas (Beusen et al., 2005; Harrison et al., 2005a y 2005b; Seitzinger et al., 2005). En esta primera generación se utilizó un submodelo para cada especie de nutriente.

Para los modelos NEWS2 se integraron todos los submodelos, permitiendo así describir a todas las especies de nutrientes en la misma corrida, facilitando su manejo y la interpretación de los resultados. Se puso especial atención en la representación de las fuentes de nutrientes y en sus retenciones en suelo, en redes de río y depósitos de agua, y cómo influyen éstas en la transferencia de los nutrientes hacia los cuerpos de agua receptores (Figura 4). Se distinguen las fuentes puntuales y las difusas y, el modelo NEWS2 puede ser utilizado como herramienta efectiva para examinar el impacto de acciones para reducir la eutroficación de cuerpos de agua a escala regional o global (Mayorga et al., 2010).

Por lo anterior el modelo NEWS2 consiste en un conjunto de submodelos bio-geoquímicos que describe las exportaciones anuales de nutrientes desde los ríos hacia los cuerpos receptores, considerando las características naturales de la cuenca y el impacto de las actividades humanas. NEWS2 opera en plataforma Linux o Windows y fue desarrollado en Python. Está disponible en la página web [www.marine.rutgers.edu/globalnews/GNE](http://www.marine.rutgers.edu/globalnews/GNE), es de uso libre por lo que no es requerida ningún tipo de licencia y los requerimientos de memoria son mínimos, el tiempo de procesamiento de los datos es de algunos minutos.

El modelo NEWS2 está diseñado para evaluar las cargas de nutrientes de manera global por lo que la escala espacial sugerida a trabajar, es de por lo menos 20,000 km<sup>2</sup>, así mismo la escala temporal que opera es anual, aunque en casos particulares se puede trabajar por periodos mensuales o por temporada, la escala menor a un año no ha sido tratada con los mismos procedimientos de calibración y validación, por lo que no es recomendable efectuarlo.

Un principio importante del modelo es la consideración de que los nutrientes se comportan de manera estacionaria, esto es, los nutrientes retenidos son perdidos o secuestrados de manera permanente y aunque se acumulan en suelo o agua no son posteriormente liberados. Esta consideración se ha demostrado válida en estudios regionales (Jones, 1996), continentales (Howarth et al., 1996) y en estudios globales (Bouwman et al., 2005; Boyer et al., 2006).

Los datos de entrada al modelo son los que se enlistan en la Tabla 7.

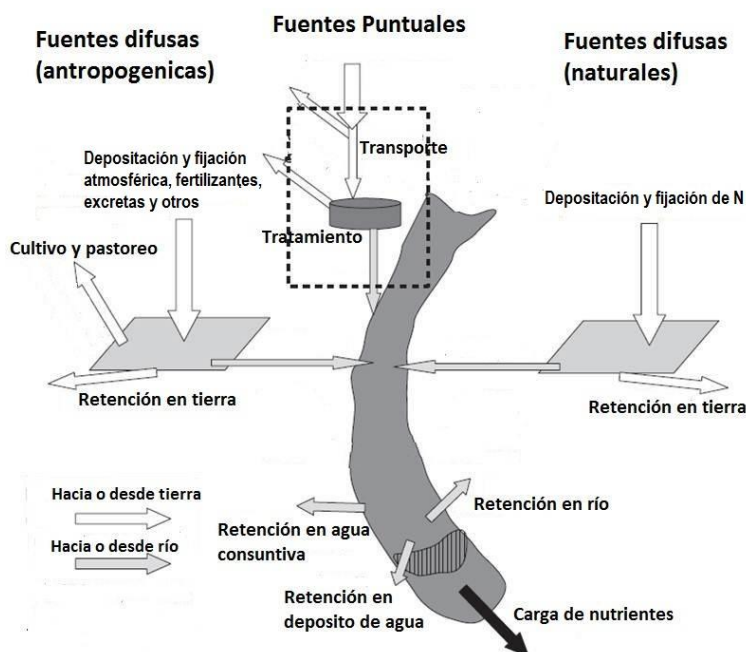


Figura 4 Fuentes y retenciones de nutrientes en cuencas hidrológicas considerados en NEWS2. Modificado de Mayorga et al. (2010)

Tabla 7 Información de entrada requerida por el modelo NEWS2. Modificado de Mayorga (2009)

Nombre en NEWS2	Descripción	Unidad
<b>Físicos</b>		
Basinid	Identificación de la cuenca	-
basinname	Nombre de la cuenca	-
area	Área de la cuenca	km <sup>2</sup>
arealand	Área terrestre en la cuenca	km <sup>2</sup>
arealandfr	Fracción de la área de la cuenca cubierta por suelo	fracción
basinorder	Orden de la cuenca (orden de Strahler)	-
basincellcnt	Número de celdas de 0.5 ° x 0.5°	Número entero
mouth_lon	Longitud de la boca de la cuenca	grados
mouth_lat	Latitud de la boca de la cuenca	grados
latband	Banda de latitud de la boca de la cuenca	-
basctr_lat	Latitud del centroide de la cuenca	grados
continent	Continente	-
ocean	Océano	-
sea	Mar	-
<b>Biogeofísicos</b>		
KoppenGrpA_prc	Porcentaje cubierto por zona tipo "A" de grupo climático Köppen-Geiger (trópicos húmedos)	%
LithClass	Clase litológica	clase
FournierSlope	Pendiente	m km <sup>-1</sup>

**Tabla 7 Información de entrada requerida por el modelo NEWS2. Modificado de Mayorga (2009)**

Nombre en NEWS2	Descripción	Unidad
<b>Hidrología y clima</b>		
QGEMsflg	Disponibilidad de datos en base GEMS-GLORI (1=yes, 0=no)	binario
Qact	Gasto actual de descarga de la cuenca	km <sup>3</sup> año <sup>-1</sup>
Qnat	Gasto natural ("prístino") de descarga de la cuenca	km <sup>3</sup> año <sup>-1</sup>
FQrem	Fracción removida a través de agua consuntiva	fracción
FQremScI GEMS	Fracción removida a través de agua consuntiva escalada a valores contemporáneos de la base de datos GEMS (cuando están disponibles)	fracción
Ddin	Factor de retención en presas para DIN	fracción
Ddip	Factor de retención en presas para DIP	fracción
Dsed	Factor de retención en presas para SST	fracción
Ddin0t01	Igual a Ddin, pero truncado en un rango de 0-1	fracción
Ddip0t01	Igual a Ddip, pero truncado en un rango de 0-1	fracción
Dsed0t01	Igual a Dsed, pero truncado en un rango de 0-1	fracción
R	Escorrentía natural antes de toma de agua consuntiva	mm año <sup>-1</sup>
frnrprec	Precipitación diaria	mm día <sup>-1</sup>
annprec	Precipitación anual	mm año <sup>-1</sup>
<b>Fuentes puntuales</b>		
GDPmer	PIB al tipo de cambio del mercado	US\$ hab <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
GDPppp	PIB considerando la paridad del poder adquisitivo	US\$ hab <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>
PopDen	Densidad poblacional	hab km <sup>-2</sup>
PUrbDen	Densidad poblacional urbana	hab km <sup>-2</sup>
PConDen	Densidad poblacional conectada a sistema de drenaje	hab km <sup>-2</sup>
E<E>sewhum	Emisión bruta por nutriente emitido por agua residual	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
EPsewdet	Emisión bruta de P emitida por detergentes (lavandería y lavavajillas)	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
T<E>frem	Porcentaje de nutriente removido por plantas de tratamiento de agua residual	%
T<E>sewhum	Emisión neta por nutriente emitido por agua residual	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
TPsewdet	Emisión bruta de P emitida por detergentes (lavandería y lavavajillas)	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
<b>Uso de suelo y fuentes difusas</b>		
Wpct	Área de humedales	%
agrpt	Área de uso agrícola	%
wrpct	Área de arrozales	%
mrgpct	Área de pastizales	%
T<E>fe	Emisiones por nutriente provenientes de fertilizantes	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
T<E>ma	Emisiones por nutriente provenientes de excreta animal	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
T<E>ex	Exportaciones de nutrientes por cultivo	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
TNfxag	Fijación de N sobre áreas agrícolas	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
TNfxna	Fijación de N sobre áreas naturales	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
TNdpag	Depositación atmosféricas de N sobre áreas agrícolas	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>
TNdpna	Depositación atmosféricas de N sobre áreas naturales (incluye cuerpos de agua)	kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup>

Todos los datos de entrada deben ser introducidos mediante archivos predeterminados en formato \*.csv. El modelo genera, de la misma forma, un archivo con datos de salida en formato \*.csv donde se encuentran las cargas anuales estimadas por nutriente y especie (Mayorga et al., 2010).

### **2.6.2 Bases del modelo NEWS2**

Las ecuaciones en las que se basa el modelo NEWS2 se dividen en dos grupos, las referentes a las especies disueltas y las que se refieren a las especies particuladas (Tabla 8). Los submodelos para especies disueltas están basados en ecuaciones explícitas para cada tipo de fuente que incluyen todas las emisiones y diferentes coeficientes para realizar los cálculos de cada una de las cargas finales de nutrientes.

Los submodelos para formas particuladas utilizados para NEWS2 están basados en una regresión estadística simple y se fundamentan esencialmente en una regresión lineal múltiple del modelo de sólidos suspendidos totales (SST) propuesto por Beusen (2005). El modelo de SST depende de cinco factores representativos: la precipitación, el relieve y la litología dominante que reflejan las condiciones climáticas y físicas, mientras que el uso de suelo de arrozales y pastizales reflejan usos de suelo específicos. A diferencia de los submodelos disueltos, los submodelos para formas particuladas no permiten atribuir las cargas a fuentes específicas, debido a su fundamentación (Mayorga et al., 2010). Aunque la modelación para formas particuladas no hace diferencia entre formas orgánicas e inorgánicas, el N particulado se presenta mayormente como materia orgánica mientras que el P particulado está dominado por formas inorgánicas (Meybeck, 1982).

Las ecuaciones del modelo NEWS2 se presentan en la Tabla 8.



Tabla 8 Ecuaciones base del modelo NEWS2

No.	Ecuación	Observaciones	Referencias
<b>Especies disueltas</b>			
1	$Ld_F = Yld_F \cdot A$		(Mayorga et al., 2010)
2	$Yld_F = FE_{riv,F} \cdot (RSpnt_F + RSdif_F)$		(Mayorga et al., 2010)
<b>Fuentes puntuales</b>			
3	$RSpnt_F = FE_{pnt,F} \cdot RSpnt_E$	$FE_{pnt}$ para N disuelto inorgánico (DIN) es una función empírica lineal de la fracción removida en el tratamiento, mientras que para todas las otras formas de N y P es igual a una constante calibrada ( $c_F$ ) (Mayorga et al., 2010)	(Van Drecht et al., 2003 y 2009)
4	$RSpnt_E = (1 - hw_{frem,E}) \cdot I \cdot Wshw_E$	Las emisiones en áreas sin colección que se presentan de forma difusa se asumen como retenidas en el suelo y que no llegan al cauce del río	(Van Drecht et al., 2003 y 2009)
5	$WShw_N = WShwExC_N$		(Van Drecht et al., 2003 y 2009)
6	$WShw_P = WShwExC_P + WShwDet_P$		(Van Drecht et al., 2003 y 2009)
<b>Fuentes difusas</b>			
7	$RSdif_F = RSdif_{expl,F} + RSdif_{ec,F}$		
8	$RSdif_{expl,F} = FE_{WS,F} \cdot Wsdif_E$	Se asume estado estacionario, las retenciones son tratadas como perdidas permanentes	(Caraco & Cole, 1999; Dumont et al., 2005; Harrison et al., 2005a y 2005b; Meybeck & Vorösmarty, 2005; Howarth et al., 2006).

Tabla 8 Ecuaciones base del modelo NEWS2

No.	Ecuación	Observaciones	Referencias
<u>Fuentes difusas (continuación)</u>			
9	$RSdif_{ec,F} = f_F(R_{nat}) \cdot EC_F$	Para el P inorgánico disuelto, el modelo incluye fuentes difusas provenientes de diferentes procesos de liberación que suceden tanto en áreas antropogénicas como naturales (meteorización). Estas fuentes son expresadas con coeficientes calibrados	(Jones, 1996; Worrall & Burt, 1996; Alexander et al., 2002)
10	$WSdif_E = WSdif_{ant,E} + WSdif_{nat,E}$		(Bouwman et al., 2005 y 2009)
11	$WSdif_{ant,E} = WSdif_{fe,E} + WSdif_{ma,E} + WSdif_{fix,ant,E} + WSdif_{dep,ant,E} - WSdif_{ex,E}$	La fijación y la depositación atmosférica para P es igual a cero	(Bouwman et al., 2005 y 2009)
12	$WSdif_{nat,E} = WSdif_{fix,nat,E} + WSdif_{dep,nat,E}$	La fijación y la depositación atmosférica para P es igual a cero	(Bouwman et al., 2005 y 2009)
13	$FE_{WS,F} = e_F \cdot f_F(R_{nat})$		(Caraco & Cole, 1999; Dumont et al., 2005; Harrison et al., 2005a y 2005b; Meybeck & Vorösmarty, 2005; Howarth et al., 2006).
<u>Retenciones</u>			
14	$f_F(R_{nat}) = (R_{nat})^{a_F}$	Para todas las especies de nutriente excepto P inorgánico disuelto	(Harrison et al., 2005 a)
15	$f_F(R_{nat}) = \left\{ 1 + \left( R_{nat}/a_F \right)^{-b_F} \right\}^{-1}$	Para P inorgánico disuelto	(Harrison et al., 2005 a)
16	$FE_{riv,F} = (1 - L_F) \cdot (1 - D_F) \cdot (1 - FQrem)$		(Mayorga et al., 2010)
17	$FQrem = (Q_{nat} - Q_{act})/Q_{nat}$		

Tabla 8 Ecuaciones base del modelo NEWS2

No.	Ecuación	Observaciones	Referencias
<b>Especies particuladas</b>			
18	$Ld_F = Yld_F \cdot A$		(Mayorga et al., 2010)
19	$Yld_F = (1 - D_{TSS}) \cdot Yld_{F,pred}$	Se asume que las partículas y sus nutrientes asociados son retenidos en la misma razón	(Mayorga et al., 2010)
20	$Yld_{F,pred} = 1000 \cdot \left( \frac{TSSp_{C_{F,pred}}}{100} \right) \cdot Yld_{TSS,pred}$		(Mayorga et al., 2010)
21	$Yld_{TSS} = (1 - D_{TSS}) \cdot Yld_{TSS,pred}$		(Beusen et al., 2005)
22	$Ld_{TSS} = Yld_{TSS} \cdot A$		
23	$TSS_{pC_{POC,pred}} = -0.16 \left[ \log(TSS_{C_{pred}}) \right]^3 + 2.83 \left[ \log(TSS_{C_{pred}}) \right]^2 - 13.6 \log(TSS_{C_{pred}}) + 20.3$		(Ludwing et al., 1996)
24	$TSS_{C_{pred}} = \frac{Yld_{TSS,pred}}{R_{nat}}$		(Ludwing et al., 1996)
25	$TSSp_{C_{PN,pred}} = 0.116 \cdot TSSp_{C_{POC,pred}} - 0.019$		(Ittekkot & Zhang, 1989)
26	$\ln(1000 \cdot Ld_{PP,pred}) = -3.096 + 1.002 \cdot \ln(1000 \cdot Ld_{POC,pred})$	El contenido de PP como porcentaje de SST, se obtiene con los valores de la carga de PP y la carga de SST	(Beusen et al., 2005)

Donde:

A	= área (km <sup>2</sup> )
a <sub>F</sub>	= constante calibrada para cada forma de nutriente
ant	= antropogénico
b <sub>F</sub>	= segunda constante calibrada usada únicamente para P inorgánico disuelto
D <sub>F</sub>	= fracción de retención dentro de las presas (0-1). Para N y P inorgánicos disueltos, se calcula mediante una función empírica de la variación media anual del tiempo de residencia en el depósito y en las condiciones no embalsadas (Vörösmarty et al., 2003); D <sub>F</sub> es calculada como el promedio ponderado de la retención con respecto a la descarga dentro de cada depósito. Para las formas orgánicas disueltas la fracción de retención dentro del modelo se consideró cero debido a la insuficiencia de datos existentes (Harrison et al., 2005 b)
D <sub>TSS</sub>	= fracción de retención de SST en represas (0-1) (Vörösmarty et al., 2003)
e	= constante de exportación de la cuenca, calibrada y adimensional
E	= nutriente
EC <sub>F</sub>	= constante de exportación calibrada (kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> ), representa la meteorización de P contenido en minerales
F	= forma de nutriente
f(R <sub>nat</sub> )	= función de escorrentía calibrada, determinada empíricamente
FE <sub>pnt</sub>	= fracción de la emisión de nutriente por fuente puntual para cada especie (0-1)
FE <sub>riv</sub>	= fracción de los nutrientes que se exportan a la boca de la cuenca (0-1), correspondiente a la retención dentro del sistema de río (1- FE <sub>riv</sub> )
FE <sub>WS</sub>	= fracción de exportación de la cuenca (0-1)
FQ <sub>rem</sub>	= fracción removida por agua consuntiva, igual para todas las formas (0-1)
hw <sub>frem</sub>	= fracción removida por tratamiento (0-1)
I	= fracción de la población conectada al drenaje (0-1)
Ld	= carga (kg año <sup>-1</sup> ), a nivel cuenca se utiliza (Mg año <sup>-1</sup> )



$Ld_{POC,pred}$	= carga de COP antes de represamiento ( $Mg\ año^{-1}$ )
$Ld_{PP,pred}$	= carga de PP antes de represamiento ( $Mg\ año^{-1}$ )
$Ld_{TSS}$	= carga de SST ( $Mg\ año^{-1}$ )
$L_F$	= fracción de retención en la red de río (0-1). Igual a cero para todos los nutrientes en forma disuelta excepto para N inorgánico donde se adopta formula empírica de perdida por desnitrificación en función del área (Dumont et al., 2005)
N	= nitrógeno
nat	= natural
P	= fósforo
Qact	= gasto de descarga en la boca de la cuenca después de consumo ( $km^3\ año^{-1}$ )
Qnat	= gasto de descarga en la boca de la cuenca antes de consumo ( $km^3\ año^{-1}$ )
RSdif	= carga de nutrientes por área provenientes de fuentes difusas ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
RSdif <sub>ec</sub>	= carga de nutrientes por área provenientes de procesos de liberación no explícitos ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
RSdif <sub>expl</sub>	= carga por fuentes difusas explicitas (después de retenciones) ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
RSpnt	= carga de nutrientes por área cuenca provenientes de fuentes puntuales ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
Rnat	= escorrentía promedio anual antes de extracción de agua consuntiva ( $m\ año^{-1}$ )
TSS <sub>c,pred</sub>	= promedio anual de la concentración de SST antes de represamiento ( $mg\ L^{-1}$ )
TSS <sub>pcPN,pred</sub>	= contenido de NP antes de represamiento como % de SST
TSS <sub>pcPOC,pred</sub>	= contenido de COP antes de represamiento como % de SST
WSdif	= emisión de nutrientes por área de nutrientes por fuentes difusas ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )



$WSdif_{ant}$	= emisión de nutrientes por área por fuentes difusas en áreas antropogénicas ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WSdif_{dep,ant}$	= emisión de nutriente por área por depositación atmosférica en áreas antropogénicas ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WSdif_{dep,nat}$	= emisión de nutriente por área por depositación atmosférica en áreas naturales ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WSdif_{ex}$	= exportación por área de nutrientes por cosecha y pastoreo ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WSdif_{fe}$	= emisión de nutriente por área por fertilizantes ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WSdif_{fix,ant}$	= emisión de nutriente por área por fijación en cultivos ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WSdif_{fix,nat}$	= emisión de nutriente por área por fijación en áreas naturales ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WSdif_{ma}$	= emisión de nutriente por área por excreta animal ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WSdif_{nat}$	= emisión de nutrientes por área por fuentes difusas en áreas naturales ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WShw$	= emisión de nutrientes por área por fuentes puntuales ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WShwDet$	= emisión de nutrientes por área por detergentes ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$WShwExc$	= emisión de nutrientes por área por excreta humana ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$Yld$	= carga por área ( $kg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$Yld_{TSS}$	= carga exportada por área de SST ( $Mg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )
$Yld_{TSS,pred}$	= carga exportada por área de SST predicha por el modelo de regresión ( $Mg\ km^{-2}\ año^{-1}$ )



### 3 Antecedentes

En la cuenca hidrológica del río Verde se han llevado a cabo diversos estudios con el fin de proteger las presas que se construyen y se proyectan para aprovechamiento de aguas superficiales. En esta sección se presenta cual es la zona de estudio, cual es la división de las subcuencas que se utilizará para la realización de este trabajo y la descripción del inventario existente de fuentes contaminantes.

#### 3.1 Descripción de la zona de estudio

El río Verde se localiza dentro de la Región Hidrológica No. 12 "Lerma-Santiago". Su longitud rebasa los 200 km desde su origen hasta su confluencia con el río Santiago. El cauce del río Verde fluye en tres estados del occidente de México, nace en el estado de Zacatecas, cruza el de Aguascalientes y recorre una parte del estado de Jalisco hasta su confluencia con el río Santiago. En su origen, aproximadamente a 40 km al sur de la ciudad de Zacatecas, se le conoce como río San Pedro, cambia de nombre a río Aguascalientes una vez que ingresa a este estado y hasta la confluencia con el río de Lagos, y desde ahí adquiere el nombre de río Verde hasta su parte final. La cuenca hidrológica del río Verde se divide en tres partes denominadas cuenca alta, cuenca media y cuenca baja (AyMA Ingeniería y Consultoría, 2006a).

Es en la parte baja de la cuenca donde se construye la presa El Zapotillo y se tiene proyectada la construcción de la presa El Purgatorio que servirá para suministrar agua a la zona conurbada de Guadalajara (Figura 5), debido a lo anterior se hace necesario evaluar el riesgo que existe de que la presa El Purgatorio tenga problemas de eutroficación.

La extensión de la cuenca propia del río Verde abarca también el estado de Guanajuato y una pequeña parte de San Luis Potosí (Figura 6). Llegando en su totalidad a tener un área de aproximadamente 20,632 km<sup>2</sup> (AyMA Ingeniería y Consultoría, 2006 a).

Durante los años 2002, 2003, 2007 y 2011 (AyMA Ingeniería y Consultoría, 2003 y 2007; Aqua Innova Consultoría e Ingeniería, 2011) se realizaron estudios de calidad del agua en el río Verde para la Comisión Estatal de Agua y Saneamiento (CEA) y el Sistema Intermunicipal de Agua y Alcantarillado (SIAPA) donde se evaluaron parámetros de calidad del agua. Dentro de estos estudios se evaluaron parámetros que son de interés para este trabajo; para N se obtuvieron nitratos, nitritos, N amoniacal y N orgánico y para P, fosfatos y P orgánico.



Figura 5 Cuenca hidrológica del río Verde. Modificado de CONAGUA (2009)

Corzo-Juárez (2009) generó un inventario de contaminantes en la cuenca del Arcediano, mismo que incluye a la cuenca hidrológica del río Verde. En el trabajo referido se establecieron subcuencas donde los puntos de drenaje de cada una coinciden con la localización de estaciones hidrométricas para facilitar el cálculo del escurrimiento. Se eligieron 6 estaciones hidrométricas (Tabla 9) que se encuentran dentro de la cuenca hidrológica y tienen los registros más completos en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (CONAGUA, 2011). Con los seis puntos establecidos, se delimitaron las cuencas propias para cada uno y así se subdividió la cuenca hidrológica del río Verde en seis subcuencas (Figura 7). Esta división fue adoptada para esta tesis.

Tabla 9 Estaciones hidrométricas seleccionadas por Corzo-Juárez (2009)

Clave	Nombre	Latitud	Longitud
12545	El Niágara III	21° 46' 45" Norte	102° 22' 30" Oeste
12422	Cuarenta II	21° 29' 20" Norte	101° 45' 10" Oeste
12358	Ajojuacar	21° 33' 48" Norte	102° 26' 22" Oeste
12370	San Gaspar	21° 17' 05" Norte	102° 29' 50" Oeste
12504	La Cuña	21° 00' 19" Norte	102° 49' 16" Oeste
12472	Arcediano (Verde)	20° 44' 30" Norte	103° 16' 50" Oeste



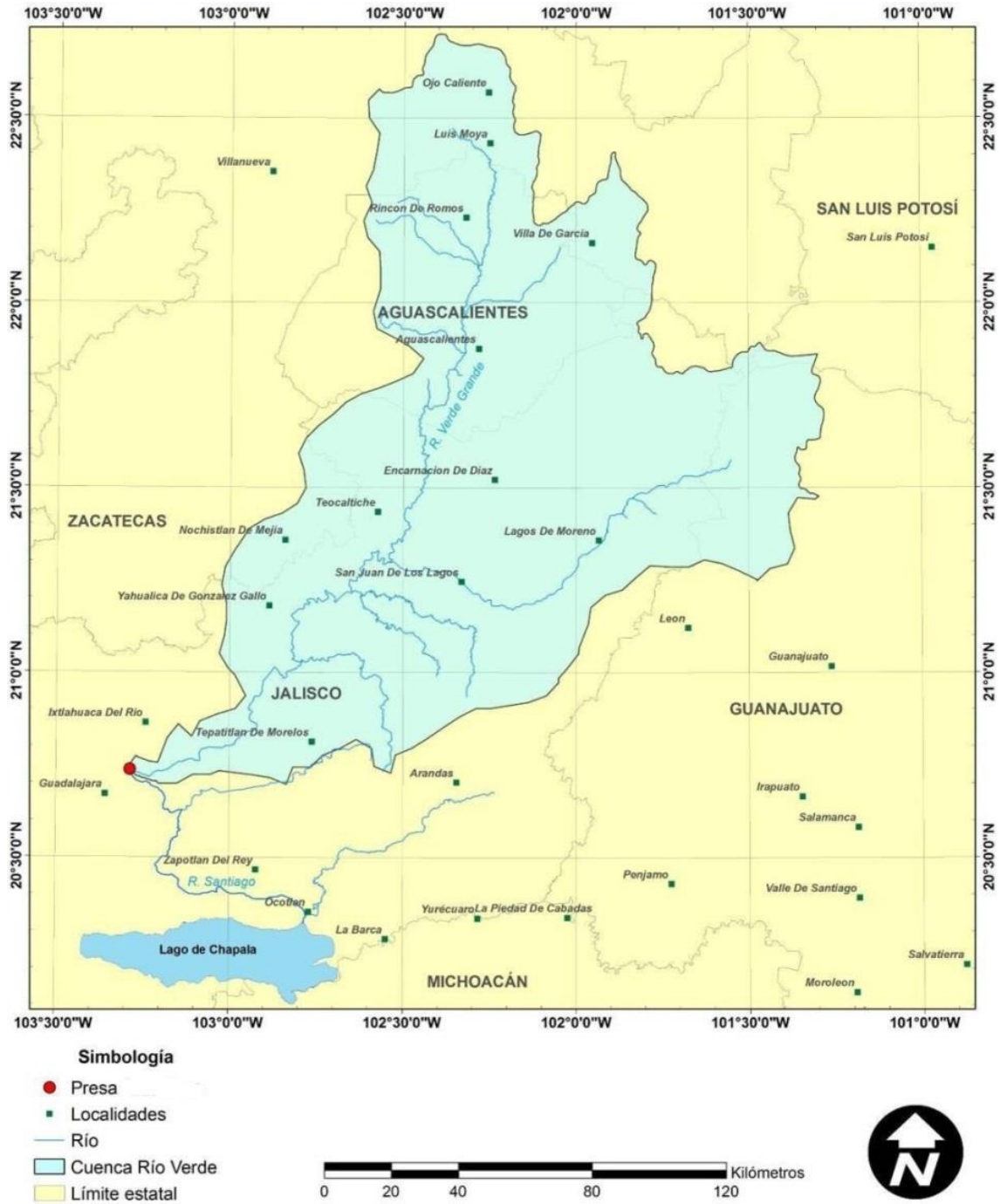


Figura 6 Extensión de la cuenca hidrológica del río Verde (Corzo-Juárez, 2009)

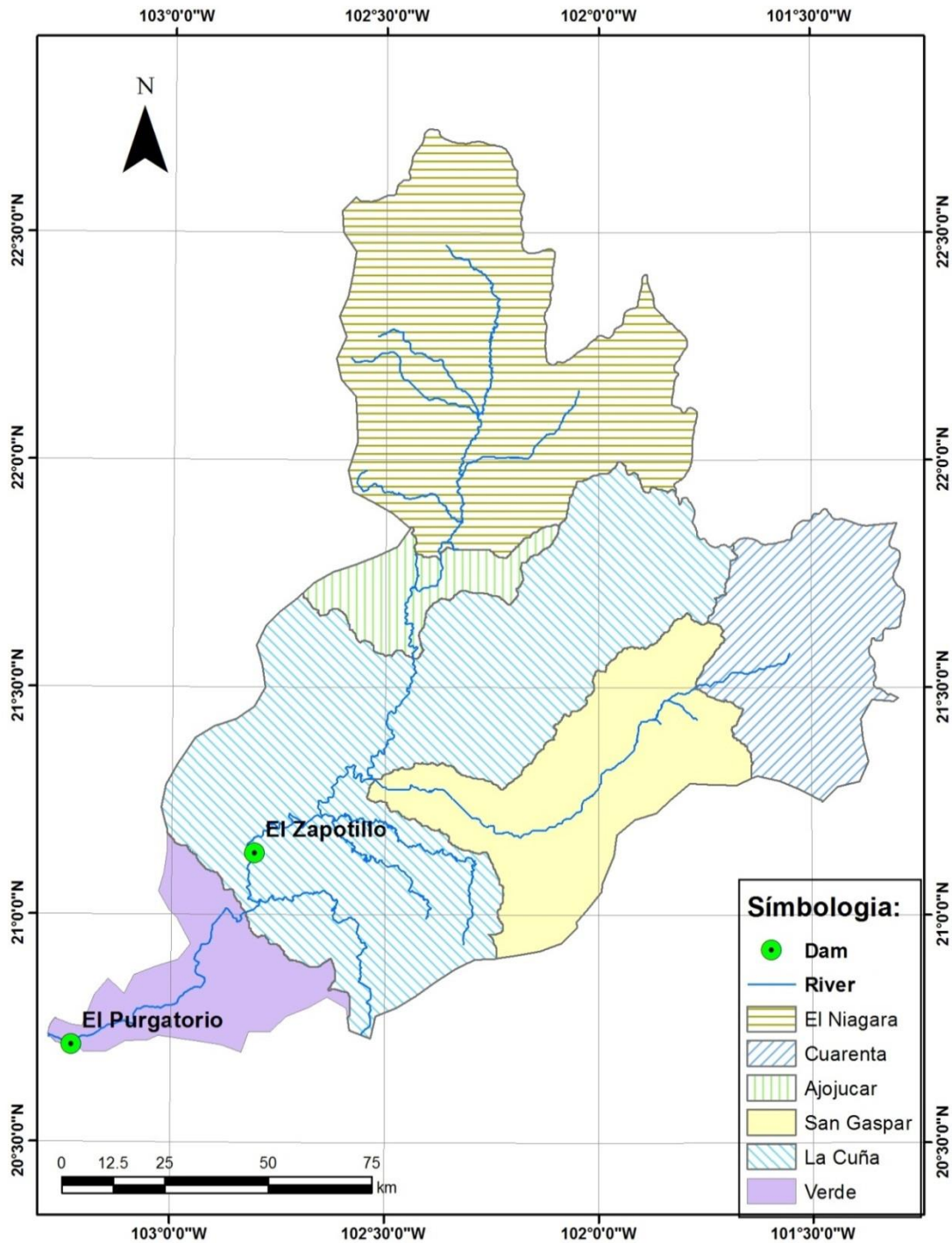
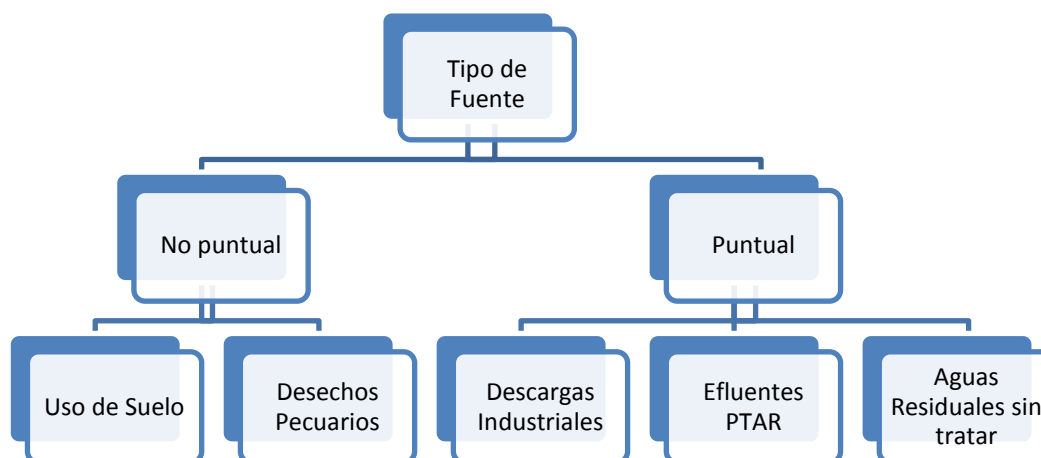


Figura 7 Delimitación de subcuencas

### 3.2 Inventario de fuentes de nutrientes

El inventario de contaminantes generado por Corzo-Juárez (2009) está estructurado como se ve en la Figura 8.



**Figura 8 Fuentes de contaminantes en la cuenca hidrológica del río Verde (Corzo-Juárez, 2009)**

Los usos de suelo considerados fueron: asentamiento urbano, agricultura, pastizal, matorral y bosque. Para estas fuentes, las estimaciones de las cargas fueron calculadas mediante una relación de escurrimiento y concentraciones representativas para cada uso. Las cargas pecuarias están subdivididas en porcinas y bovinas; fueron obtenidas con base en inventarios ganaderos de los estados que están dentro de la cuenca y concentraciones de nutrientes representativas en las excretas animales.

En lo referente a las descargas industriales, se utilizó un listado de industrias (Hansen et al., 2006) y las características de concentraciones de las mismas (Hansen et al., 1995). Los caudales provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales se obtuvieron de los inventarios nacionales (CONAGUA, 2008), y las concentraciones características de cada tipo de planta de los estudios de caracterizaciones de efluentes realizadas en la zona (Aqua Innova Consultoría e Ingeniería, 2004; AyMA Ingeniería y Consultoría, 2006a y 2006b). Para las aguas residuales sin tratar se obtuvieron las localidades dentro de la zona de estudio que carecen de sistemas de tratamiento de agua y su información poblacional, datos de cobertura de drenaje y aportaciones de aguas residuales (CONAGUA, 1994; ORVA Ingeniería, 2003; INAFED, 2006; CEA, 2008). Para todas las fuentes puntuales, se obtuvieron las cargas multiplicando los gastos generados por las concentraciones representativas.

Las cargas estimadas de generación de nutrientes para la cuenca hidrológica del río Verde fueron  $89,127 \text{ Mg año}^{-1}$  para N y  $40,484 \text{ Mg año}^{-1}$  para P (Corzo-Juárez, 2009).

## 4 Metodología

Para evaluar las cargas de nutrientes, se delimitó la cuenca, se seleccionó un modelo de estimación de nutrientes, se llevó a cabo un muestreo y visita de campo, se analizaron los datos de monitoreos existentes, se recopilaron y calcularon los datos de entrada al modelo y se implementó el modelo seleccionado. De manera complementaria se recalculó el inventario existente con las consideraciones hechas para este trabajo, se calcularon las cargas límite que soportaría el cuerpo de agua para mantenerse en estado mesotrófico, se formularon escenarios de mitigación de cargas de nutrientes y se calculó la atenuación natural que se presenta en la cuenca.

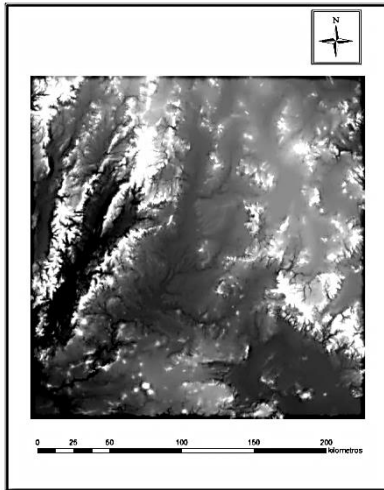
### 4.1 Delimitación de la cuenca hidrológica

La delimitación de la cuenca hidrológica del río Verde se efectuó con base en un modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) a escala 1:50,000 (INEGI, 2013 a), que es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar (Figura 9 a).

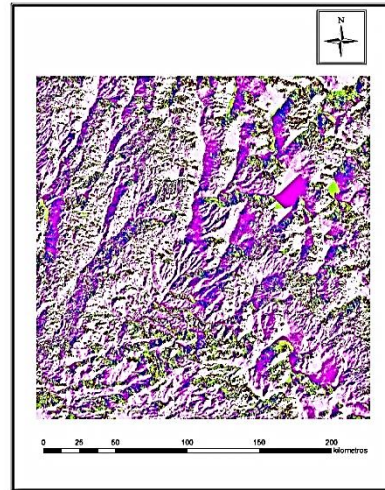
Mediante la utilización de la herramienta Arc Hydro que funciona dentro del ambiente Arc GIS (Sistema de Información geográfica) se realizó la delimitación de la cuenca hidrológica del río Verde, que consiste en los siguientes procesos generales:

- Dirección de flujo (Figura 9 b), el código de color indica cual sería la dirección que tomaría una gota de agua si cayera en ese punto.
- Flujo acumulado (Figura 9 c), es la sumatoria del flujo para cada punto.
- Definición de cauces (Figura 9 d), se generó mediante la definición de una captación mínima de flujo acumulado como cauce.
- Cuencas propias de captación (Figura 9 e), para cada cauce se delimitó su cuenca propia de captación.
- Cuencas propias (Figura 9 f), para este trabajo se delimitaron las cuencas propias para la presa El Zapotillo, la confluencia del río Verde con el río Santiago y un punto adicional con una diferencial aguas abajo de la confluencia de los ríos, este último punto corresponde a la cuenca correspondiente al río Santiago.

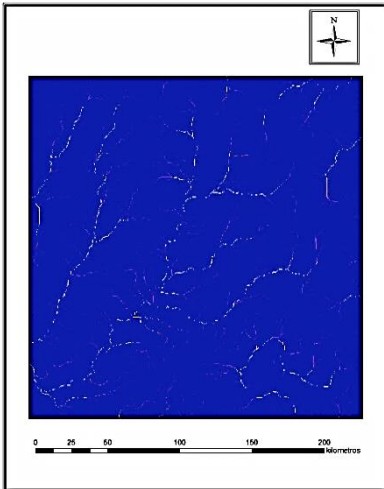
a) DEM



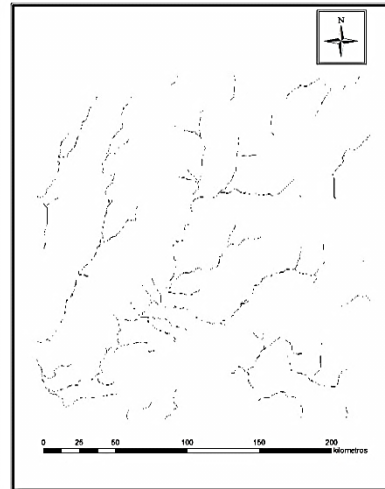
b) Dirección de flujo



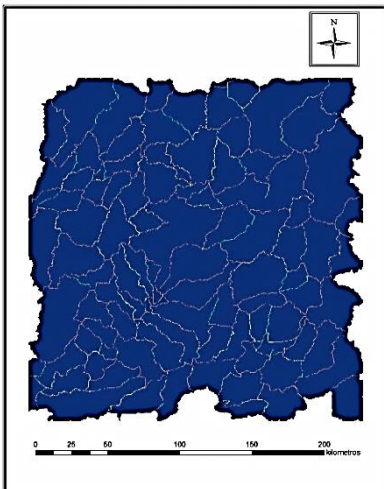
c) Flujo acumulado



d) Definición de cauces



e) Cuencas propias de captación



f) Cuencas propias para sitios de interes



Figura 9 Delimitación de la cuenca hidrológica

Se comparó la delimitación realizada con la delimitación hecha por Corzo-Juárez (2009), y se encontró que aunque las escalas de los modelos DEM utilizados son diferentes, los límites de la cuenca no muestran diferencias significativas, por lo que los datos obtenidos en su trabajo se utilizaron como base del inventario utilizado en esta tesis.

## 4.2 Selección de modelo para evaluación de cargas de nutrientes

Se revisó la evaluación de modelos existentes realizada por Arabi (2011), poniendo especial atención en la escala temporal, la escala espacial y los parámetros que son evaluados (Tabla 10) y a esta evaluación se agregó la información del modelo NEWS2 (Mayorga et al., 2010). Considerando el objetivo de este trabajo y la disponibilidad de información con la que se cuenta para la zona de estudio, se eligen aquellos modelos que evalúen nutrientes en una escala temporal anual y que permitan describir la movilización de nutrientes a nivel de cuenca hidrológica.

En una segunda etapa de selección, se evaluaron los tipos de fuentes considerados (puntuales y no puntuales) y medios de movilización considerados donde sucede la atenuación natural (suelo, ríos, lagos, depósitos y presas) así como las condiciones de uso (Tabla11).

**Tabla 10 Comparativa de modelos con base en escalas temporal, escala espacial y parámetros que evalúa. Modificada de Arabi (2011)**

Modelo	Escala Temporal	Escala Espacial	Parámetros que evalúa
USGS Regretion	Anual	Cuenca	Nutrientes
NEWS2	Anual	Cuenca	Nutrientes (diferenciación entre especies)
SPARROW	Anual	Cuenca	Sedimentos, nutrientes y pesticidas
GWLF	Mensual	Cuenca pequeña	Sedimentos y nutrientes
QUAL2E	Edo. Estacionario	Cuerpo de agua	$N_T$ , $P_T$ , $NH_3$ , DO, clorofila a, patógenos
WASP	Horario	Cuerpo de agua	$N_T$ , $P_T$ , $NH_3$ , DO, clorofila a, SST, tóxicos
SWMM	Sub-diario	Cuenca pequeña	Sedimentos, nutrientes, pesticidas, metales, DBO
MIKE SHE	Horario o diario	Cuenca	Contaminantes
SWAT	Diario	Cuenca mediana y grande	Sedimentos, nutrientes, pesticidas, metales, DBO
HSPF	Sub-diario	Cuenca mediana y grande	Sedimentos, nutrientes, pesticidas, metales, DBO

Modelos seleccionados en esta comparativa

**Tabla 11 Comparativa de modelos con base en fuentes contaminantes, atenuación natural y condiciones de uso. Modificada de Arabi (2011)**

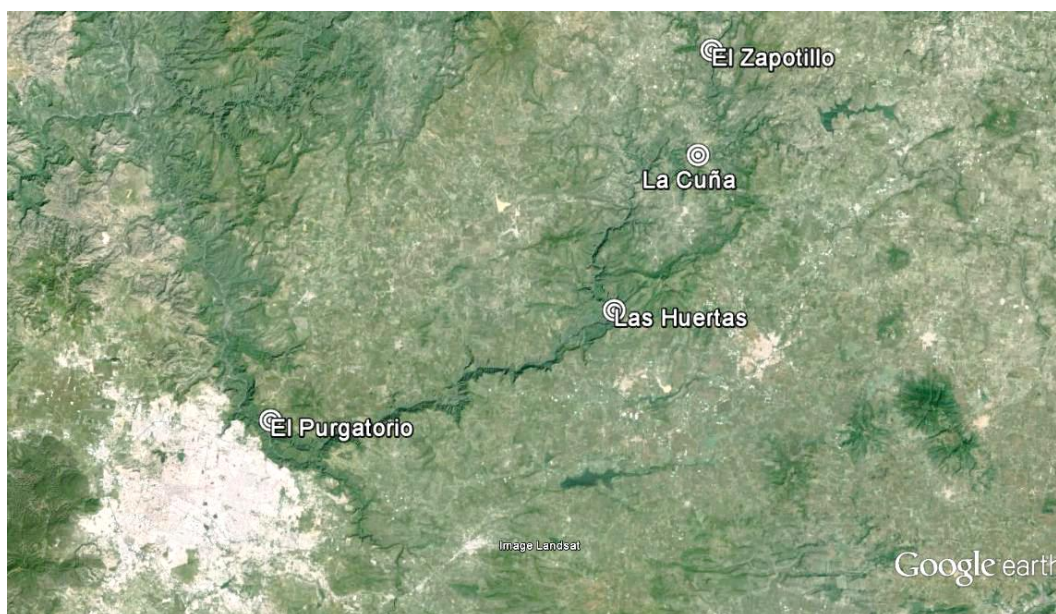
Modelo	Fuentes contaminantes		Atenuación natural					Condiciones de uso
	Puntuales	Difusas	Suelo	Ríos	Lago	Depósitos	Presas	
USGS Regretion	OK	OK						Costo
NEWS2	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Gratuita
SPARROW	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	Costo

Modelo seleccionado en esta comparativa

El modelo elegido fue NEWS2 debido a que además de cumplir con la escala temporal, espacial y ser específico para la evaluación de nutrientes, también considera los efectos de la atenuación natural en la cuenca y se encuentra disponible de manera gratuita.

### 4.3 Reconocimiento de campo y muestreo

Del 8 al 10 de mayo del 2013, se llevó a cabo un reconocimiento de la zona de estudio, donde se acudió a los sitios El Zapotillo, La Cuña, Las Huertas y El Purgatorio (Figura 10). En estos sitios se obtuvieron muestras de agua, que fueron analizadas para conocer la concentración de nutrientes, de acuerdo con las metodologías enlistadas en la Tabla 12. Los resultados fueron comparados con los obtenidos en muestreos anteriores (Anexo A) así como con los límites aplicables para cada caso



**Figura 10 Sitios de muestreo en el río Verde del 8 al 10 de mayo del 2013**

Tabla 12 Métodos analíticos para determinación de nutrientes

Parámetro	Método Analítico*
$P_T$ ( $mg\ L^{-1}$ )	Spectroquant Merck, 1.14543
$P-PO_4$ ( $mg\ L^{-1}$ )	Spectroquant Merck, 1.14848
$N_T$ ( $mg\ L^{-1}$ )	Spectroquant Merck, 1.14537
$N-NO_3$ ( $mg\ L^{-1}$ )	Spectroquant Merck, 1.14544

\*Métodos analíticos disponibles en Merck (2013)

Además de la realización de muestreos, se recorrió parte de la cuenca hidrológica para identificar las condiciones y actividades que impactan tanto en la generación de nutrientes como en su llegada a los cuerpos de agua, encontrando la presencia de actividades agrícolas, ganadería y deforestación así como la presencia de cuerpos de agua como la presa el Zapotillo (en construcción) que influyen en la carga de nutrientes en la desembocadura final de la cuenca (Figura 11).



a) Ganadería



b) Agricultura



c) Deforestación



d) Construcción de la presa El Zapotillo

Figura 11 Recorrido cuenca hidrológica del río Verde





e) Cauce del río Verde en el sitio La Cuña



f) Cauce del río Verde en el sitio Las Huertas

**Figura 11 Recorrido cuenca hidrológica del río Verde**

#### 4.4 Análisis de datos de monitoreo

Uno de los métodos para poder estimar las cargas de nutrientes, es el análisis de datos de monitoreo. Este no es un método directo ya que, por un lado, se debe medir la concentración de nutrientes en un río y por otro medir el caudal en el cual se obtuvo dicha concentración. La ecuación para obtener las cargas de nutrientes es:

$$Carga = \frac{Conc \cdot Gasto}{1,000,000}$$

Donde:

Carga = carga de nutrientes ( $Mg \text{ día}^{-1}$ ),

Conc = concentración de nutrientes ( $mg \text{ L}^{-1}$ )

Gasto = escurrimiento medido ( $m^3 \text{ día}^{-1}$ )

1,000,000 = factor de conversión

El principal sitio de interés para este trabajo, es el sitio El Purgatorio, donde está proyectada la construcción de la presa; por lo tanto los datos de monitoreo en este sitio son los que inicialmente se analizaron.

#### 4.4.1 Gastos

Se recopilaron los datos de gasto medio mensual ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) de la estación hidrométrica "El Purgatorio" con clave 12939 (CONAGUA, 2011); los datos disponibles van de septiembre de 1990 a mayo del 2003.

Analizando los datos de gastos, se obtuvieron los promedios mensuales (Tabla 13); con esta información se concluye que la temporada de lluvia en la zona de estudio abarca los meses de julio a octubre, mientras que la temporada de estiaje se presenta de noviembre a junio.

La temporada de estiaje es más larga que la temporada de lluvias por lo que se ponderaron estos periodos para la estimación de las cargas de nutrientes. De esta forma, para realizar la estimación de cargas anuales, se obtuvieron promedios de gastos medios mensuales para cada temporada (Tabla 13).

**Tabla 13 Promedios de gastos medios mensuales para la estación "El Purgatorio" en el período de septiembre 1990 – mayo 2003 (CONAGUA, 2011)**

Temporada	Mes	Promedio de gasto mensual ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	Promedio gasto por temporada ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )
Época de estiaje	Noviembre	4.16 ± 3.01	4.32 ± 3.35
	Diciembre	2.44 ± 0.59	
	Enero	11.50 ± 31.88	
	Febrero	5.21 ± 10.13	
	Marzo	2.15 ± 1.06	
	Abril	1.62 ± 0.49	
	Mayo	1.50 ± 0.63	
	Junio	5.97 ± 4.31	
Época de lluvias	Julio	66.41 ± 127.66	44.85 ± 17.58
	Agosto	40.11 ± 32.46	
	Septiembre	48.65 ± 25.84	
	Octubre	24.22 ± 30.42	

Con el fin de confirmar los resultados estimados para el sitio El Purgatorio después de aplicar la metodología aquí descrita, se analizaron también los datos de monitoreo en la estación hidrométrica "La Cuña" con clave 12504 (CONAGUA, 2011). Esta estación se encuentra dentro de la misma cuenca hidrológica del río Verde, aguas arriba del sitio El Purgatorio. Los datos registrados para esta estación abarcan el período de junio de 1947 a julio de 2011. Los gastos promedio se reportan en la Tabla 14.

**Tabla 14 Promedios de gastos medios mensuales para la estación "La Cuña" en el período de junio 1947 – julio 2011 (CONAGUA, 2011)**

Temporada	Mes	Promedio de gasto mensual ( $m^3 s^{-1}$ )	Promedio gasto por temporada ( $m^3 s^{-1}$ )
Época de estiaje	Noviembre	6.55 ± 14.43	4.04 ± 4.03
	Diciembre	2.57 ± 1.39	
	Enero	4.23 ± 15.13	
	Febrero	2.45 ± 4.18	
	Marzo	1.58 ± 0.78	
	Abril	1.10 ± 0.47	
	Mayo	0.95 ± 0.91	
	Junio	12.89 ± 12.61	
Época de lluvias	Julio	59.73 ± 78.45	50.40 ± 20.66
	Agosto	65.28 ± 74.02	
	Septiembre	56.74 ± 62.58	
	Octubre	19.87 ± 24.05	

En ambas estaciones se obtuvieron resultados de gasto promedio muy semejantes, para las dos temporadas de estiaje y de lluvias.

#### 4.4.2 Concentraciones de nutrientes

Los datos de monitoreo de concentraciones de nutrientes también se dividieron en las correspondientes a las temporadas de lluvia y de estiaje. Para la temporada de estiaje se tuvieron datos de los años 2002, 2003, 2007 y 2011 (AyMA Ingeniería y Consultoría, 2007 y 2011; Aqua Innova Consultoría e Ingeniería, 2011) mientras que para la temporada de lluvias se tienen datos de los años 2003 y 2011 (AyMA Ingeniería y Consultoría, 2007 y 2011). Con esta información se obtuvo el promedio de concentraciones N y P para cada temporada en los diferentes sitios de muestreo (Tabla 15).

**Tabla 15 Concentraciones promedio de N y P en los sitios El Purgatorio y La Cuña (AyMA Ingeniería y Consultoría, 2007 y 2011; Aqua Innova Consultoría e Ingeniería, 2011)**

	Época de estiaje	Época de lluvias
<b>El Purgatorio</b>		
[N] ( $mg L^{-1}$ )	1.01 ± 0.57	5.13 ± 1.70
[P] ( $mg L^{-1}$ )	0.49 ± 0.30	1.14 ± 0.46
<b>La Cuña</b>		
[N] ( $mg L^{-1}$ )	1.25 ± 0.83	3.65 ± 0.92
[P] ( $mg L^{-1}$ )	0.59 ± 0.36	1.30 ± 1.14

#### 4.4.3 Cargas de nutrientes

Para estimar las cargas de nutrientes para un periodo anual, se calcularon las cargas estacionales usando los promedios estacionales tanto de gastos como de concentraciones con sus respectivas desviaciones estándar. En la Tabla 16 se presentan estos resultados.

La carga media se obtiene:

$$Carga_{med} = \frac{Conc_{prom} \cdot Gasto_{prom}}{1,000,000}$$

La carga máxima se obtiene:

$$Carga_{max} = \frac{(Conc_{prom} + desv_{conc}) \cdot (Gasto_{prom} + desv_{gasto})}{1,000,000}$$

La carga mínima se obtiene:

$$Carga_{min} = \frac{(Conc_{prom} - desv_{conc}) \cdot (Gasto_{prom} - desv_{gasto})}{1,000,000}$$

Donde:

$Carga_{max}$  = carga máxima esperada de nutriente (Mg día<sup>-1</sup>)

$Carga_{med}$  = carga media esperada de nutriente (Mg día<sup>-1</sup>)

$Carga_{min}$  = carga mínima esperada de nutriente (Mg día<sup>-1</sup>)

$Conc_{prom}$  = concentración promedio de nutrientes (mg L<sup>-1</sup>)

$desv_{conc}$  = desviación estándar de la concentración de nutrientes (mg L<sup>-1</sup>)

$desv_{gasto}$  = desviación estándar de escurrimiento (m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup>)

$Gasto_{prom}$  = escurrimiento promedio (m<sup>3</sup> día<sup>-1</sup>)

1,000,000 = factor de conversión

Se calcularon las cargas anuales como las sumas de las cargas estacionales, considerando 123 días de lluvia y 242 días de estiaje, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$Carga_{anual} = Carga_{lluvias} \cdot dias_{lluvias} + Carga_{estiaje} \cdot dias_{estiaje}$$

Donde:

$Carga_{anual}$  = carga anual de nutriente ( $Mg \text{ año}^{-1}$ )

$Carga_{estiaje}$  = carga de nutriente para época de estiaje ( $Mg \text{ día}^{-1}$ )

$Carga_{lluvias}$  = carga de nutriente para época de lluvias ( $Mg \text{ día}^{-1}$ )

$días_{estiaje}$  = duración de la época de estiaje (días)

$días_{lluvias}$  = duración de la época de lluvias (días)

**Tabla 16 Estimación de cargas de nutrientes por análisis de datos de monitoreo**

		<i>Época de lluvias</i>			<i>Época de estiaje</i>			<i>Anual</i>
		$Q (m^3 s^{-1})$	$[ ] (mg L^{-1})$	<i>Carga (Mg)</i>	$Q (m^3 s^{-1})$	$[ ] (mg L^{-1})$	<i>Carga (Mg)</i>	<i>Carga (Mg año<sup>-1</sup>)</i>
<b>Estación El Purgatorio</b>								
<b>N</b>	med	44.85	5.13	2,446	4.32	1.01	91	2,537
	max	62.43	6.83	4,534	7.67	1.58	254	4,788
	min	27.27	3.43	994	0.97	0.44	9	1,003
<b>P</b>	med	44.85	1.14	545	4.32	0.49	44	589
	max	62.43	1.60	1,061	7.67	0.79	126	1,187
	min	27.27	0.68	199	0.97	0.19	4	203
<b>Estación La Cuña</b>								
<b>N</b>	med	50.40	3.65	1,957	4.04	1.25	106	2,063
	max	71.06	4.57	3,455	8.07	2.08	352	3,807
	min	29.74	2.73	864	0.01	0.42	<1	864
<b>P</b>	med	50.40	1.30	699	4.04	0.59	50	749
	max	71.06	2.44	1,844	8.07	1.07	159	2,003
	min	29.74	0.16	53	0.01	0.23	<1	53

[ ] = concentración, Q = gasto de escurrimiento

#### 4.5 Datos de entrada al modelo NEWS2

Los datos de entrada al modelo NEWS2 se dividen en cinco grandes grupos: 1. Propiedades físicas de la cuenca, 2. Biogeofísica de la cuenca, 3. Hidrología y clima, 4. Fuentes puntuales, 5. Uso de suelo y fuentes difusas. En este apartado se describirá a detalle cómo fue la obtención de todos los datos requeridos.

#### 4.5.1 Propiedades físicas de la cuenca

Para el estudio de la cuenca hidrológica del río Verde, se consideraron seis subcuencas como se describió en la parte referente a la delimitación de la zona de estudio. Los nombres de las subcuencas son: El Niágara, El Cuarenta, Ajojucar, San Gaspar, La Cuña y Verde. Para cada subcuenca la superficie total se obtuvo directamente de la tabla de atributos que se genera en el sistema de información geográfica, las áreas por subcuenca están contenidas en la Tabla 17.

**Tabla 17 Áreas de las subcuencas en la cuenca hidrológica del río Verde**

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )
El Niágara	5,462
El Cuarenta	2,327
Ajojucar	816
San Gaspar	2,939
La Cuña	7,618
Verde	1,470
TOTAL	20,632

El modelo NEWS2 se ha utilizado para estimar las cargas de nutrientes hacia los océanos a nivel global, utilizando la delimitación del sistema global de cuencas propuesto por Vörösmarty (2000). Esta delimitación sirvió para caracterizar y dar valores a algunos parámetros y coeficientes necesarios para la implementación del modelo en la zona de estudio. La cuenca de estudio del río Verde se encuentra dentro de la cuenca Grande de Santiago, cuya desembocadura está ubicada en las coordenadas 21°45'00" Norte y 105°15'00" Oeste (Figura 12).

Se consideró que la proporción de área terrestre con respecto al área total en la cuenca Grande de Santiago (Bouwman et al., 2009) es representativa para todas las subcuencas dentro de la cuenca hidrológica del río Verde. Esta proporción fue calculada con los datos de área terrestre, obteniendo que el 98.98% del área total de la cuenca está cubierta por suelo. Utilizando esta proporción se estimó el área terrestre para cada subcuenca (Tabla 18).

$$A_{terr} = \frac{A_{tot} \cdot Pct_{terr}}{100}$$

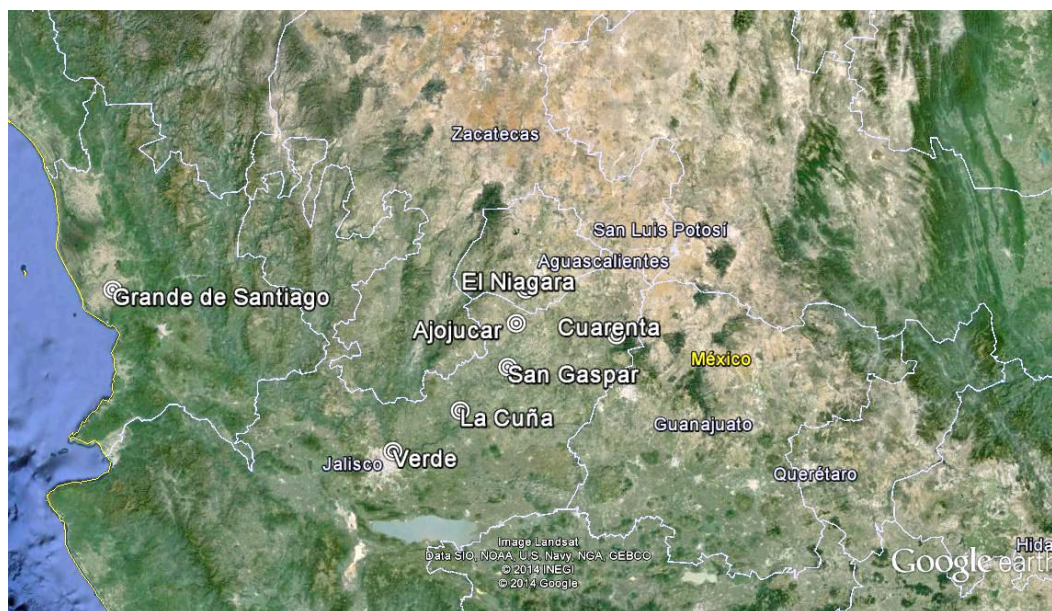
Donde:

$A_{terr}$  = área terrestre en el cuenca (km<sup>2</sup>)

$A_{tot}$  = área total en el cuenca (km<sup>2</sup>)

$Pct_{terr}$  = proporción área terrestre - área total en el cuenca (%)

100 = factor de conversión



**Figura 12** Localización de las desembocaduras de la cuenca Grande de Santiago y de las subcuencas en la cuenca hidrológica del río Verde

**Tabla 18** Área total - área terrestre por subcuenca

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Área terrestre (km <sup>2</sup> )
El Niágara	5,462	5,406
El Cuarenta	2,327	2,303
Ajojuar	816	808
San Gaspar	2,939	2,909
La Cuña	7,618	7,540
Verde	1,470	1,455
<b>TOTAL</b>	<b>20,632</b>	<b>20,421</b>

De la misma forma se asignó para todas las subcuencas el orden de Strahler obtenido por Vörösmarty et al. (2000) para la cuenca Grande de Santiago, por lo que el orden en todas las subcuencas se estableció como de orden 4.

Para la implementación del modelo es necesario definir el número de celdas con un tamaño de 0.5° x 0.5° contenidas en cada subcuenca. Debido a la curvatura de la Tierra, el tamaño en unidades de superficie de las celdas varía con la latitud; para la cuenca Grande de Santiago, el área total de 191,671 km<sup>2</sup> comprende 67 celdas de 0.5° x 0.5° (Vörösmarty et al., 2000) por lo que el tamaño de cada celda en esta zona es de aproximadamente 2 861 km<sup>2</sup>. Con este valor se calculó el número de celdas para cada subcuenca, tomando en cuenta que debido a que este tiene que ser un número entero, el resultado se redondeó hacia arriba (Tabla 19).

$$N = \frac{A_{tot}}{Tam_{celda}}$$

Donde:

$A_{tot}$  = área total en la subcuenca (km<sup>2</sup>)

N = número de celdas de 0.5° x 0.5° contenidas en la subcuenca

$Tam_{celda}$  = tamaño de una celda de 0.5° x 0.5° en esta latitud (km<sup>2</sup>)

**Tabla 19 Número de celdas por subcuenca**

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Área terrestre (km <sup>2</sup> )
El Niágara	5,462	2
El Cuarenta	2,327	1
Ajojucar	816	1
San Gaspar	2,939	2
La Cuña	7,618	3
Verde	1,470	1

Las coordenadas de las desembocaduras de cada subcuenca así como la latitud del centroide de cada una de ellas se obtuvieron utilizando el sistema de información geográfica Arc Gis. Los datos se presentan en la Tabla 20.

**Tabla 20 Localización de desembocaduras y centroides de subcuencas**

Subcuenca	Longitud desembocadura (°)	Latitud desembocadura (°)	Latitud de centroide (°)
El Niágara	102°22'30" O	21°46'45" N	21°46'45" N
El Cuarenta	101°45'10" O	21°29'20" N	21°36'02" N
Ajojucar	102°26'22" O	21°33'48" N	21°42'53" N
San Gaspar	102°29'50" O	21°17'05" N	21°17'27" N
La Cuña	102°49'16" O	21°00'19" N	21°22'30" N
Verde	103°16'50" O	20°44'30" N	20°51'24" N

#### 4.5.2 Biogeofísica de la cuenca

Las características biogeofísicas de las subcuencas incluyen la clasificación climática, litología y pendiente.



#### 4.5.2.1 Clasificación climática Köppen – Geiger

La clasificación climática se llevó a cabo en base a la última actualización realizada al mapa climático presentado originalmente por Wladimir Köppen y posteriormente modificado por Rudolf Geiger (mapa de clasificación climática de Köppen-Geiger), dicha actualización fue realizada en base a datos del servicio climático alemán (Kottek et al., 2006).

La clasificación climática de Köppen – Geiger (Figura 13) divide los climas en:

- A) Ecuatorial o trópicos húmedos
- B) Árido
- C) Clima templado
- D) Nieve
- E) Polar

Secundariamente los subclasifica de acuerdo a la precipitación y temperatura, sin embargo para el interés de datos requeridos por el modelo NEWS2 solo es importante conocer el porcentaje del área de la subcuenca que se encuentre clasificada como trópico húmedo (Grupo A).

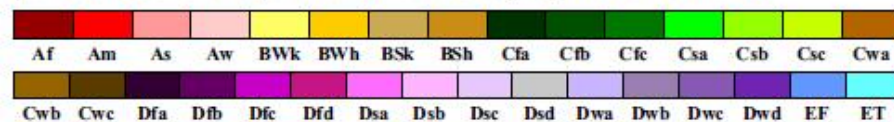
Para la cuenca hidrológica del río Verde, ninguna parte de su área se encuentra en el grupo A por lo que el porcentaje de las diferentes subcuencas pertenecientes al grupo de trópico húmedo, será igual a cero.

#### 4.5.2.2 Litología

La evaluación de la litología de las cuencas se realizó con base en el primer mapa mundial de litología (Amiotte-Suchet et al., 2003), dicho mapa se tiene disponible en forma de sistema de información digital (Figura 14). Mediante el procesamiento de los datos se observa que lo que predomina en la cuenca hidrológica del río Verde es la presencia de rocas volcánicas, esto se verificó con la carta geológica de la República Mexicana 5ª edición (Figura 15) (Instituto de Geología UNAM, 2000). Lo anterior coincide con la clasificación que se tiene para la cuenca Grande de Santiago y que para el modelo NEWS2 corresponde a la clase litológica 6.

## World Map of Köppen–Geiger Climate Classification

updated with CRU TS 2.1 temperature and VASClmO v1.1 precipitation data 1951 to 2000



### Main climates

- A: equatorial
- B: arid
- C: warm temperate
- D: snow
- E: polar

### Precipitation

- W: desert
- S: steppe
- f: fully humid
- s: summer dry
- w: winter dry
- m: monsoonal

### Temperature

- h: hot arid
- k: cold arid
- a: hot summer
- b: warm summer
- c: cool summer
- d: extremely continental
- F: polar frost
- T: polar tundra

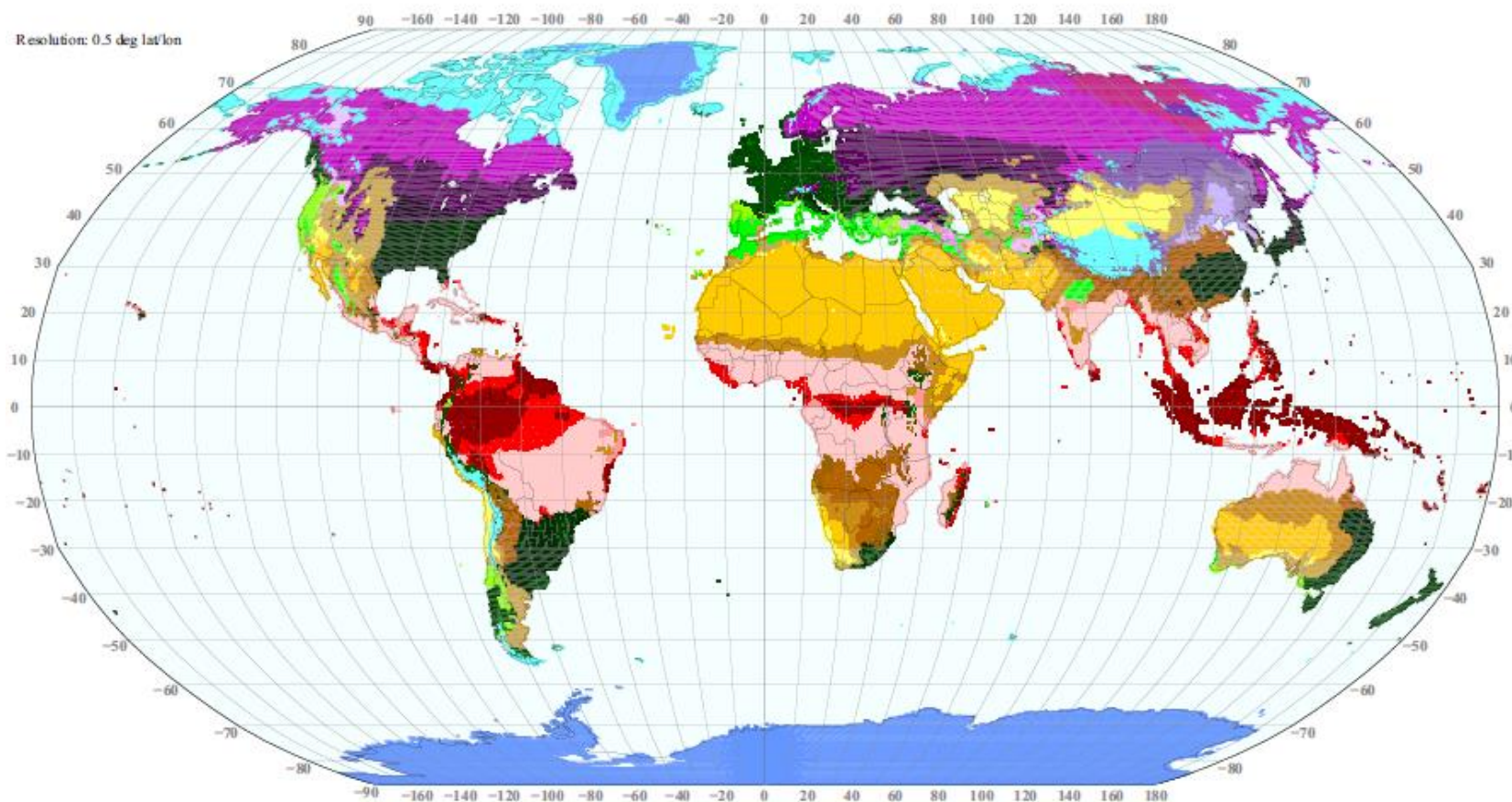


Figura 13 Mapa de clasificación climática Köppen - Geiger actualizado con datos del periodo 1951-2000 (Kottek et al., 2006)

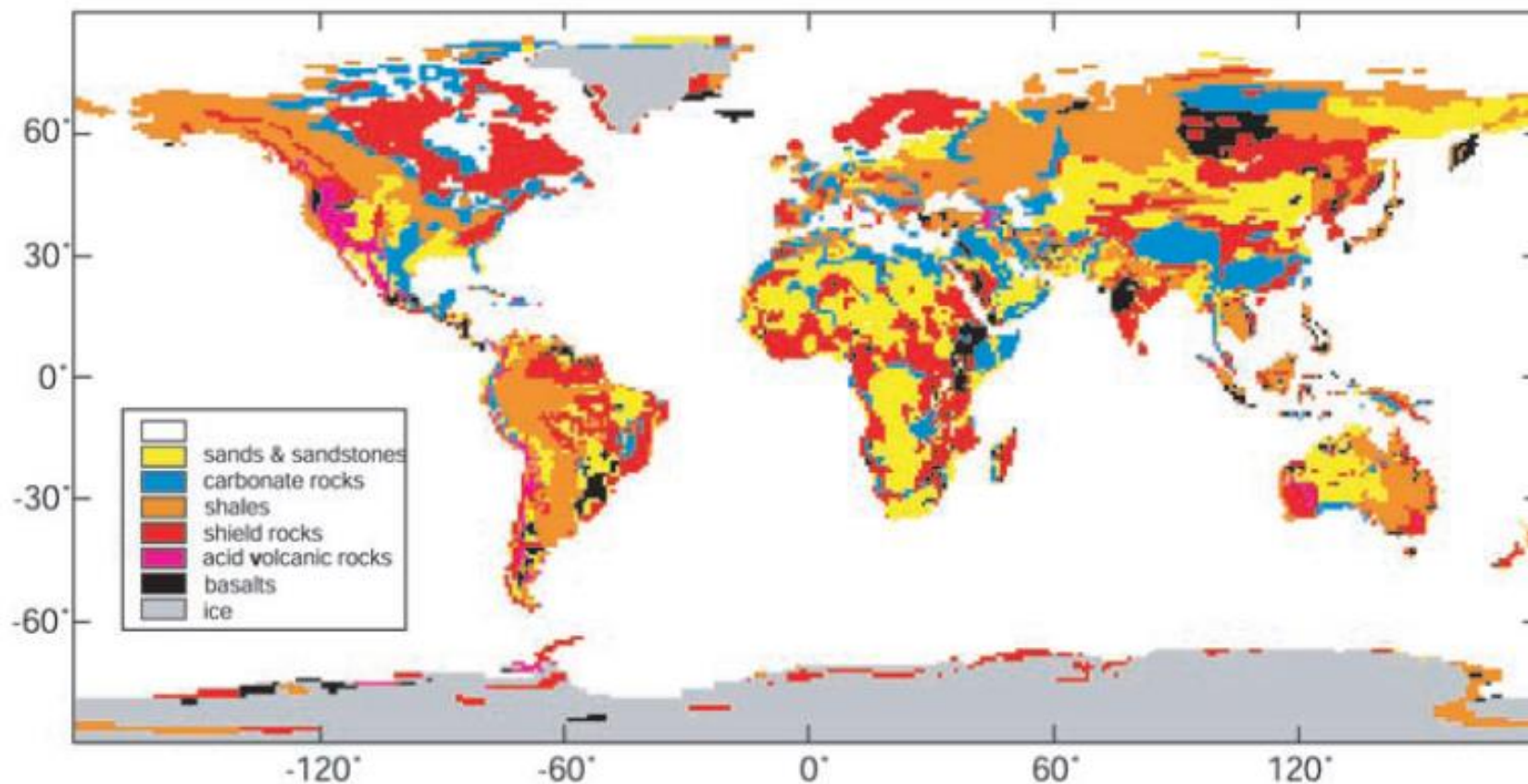


Figura 14 Distribución de los seis principales tipos de rocas con resolución 1°x1° (Amiotte-Suchet et al., 2003)



Figura 15 Carta geológica de la República Mexicana (Instituto de Geología UNAM, 2000)

#### 4.5.2.3 Pendiente

La obtención de la pendiente predominante en las subcuencas puede hacerse mediante herramientas digitales en base a un modelo DEM, sin embargo por considerar que la escala espacial a la cual se está realizando el estudio no es tan pequeña como para que las variaciones en esta pendiente a lo largo de la cuenca adquieran demasiada importancia, se consideró que la pendiente predominante en las seis cuencas es similar a la que se calculó para la cuenca Grande de Santiago. El valor de esta pendiente se considera de  $23.5260 \text{ m km}^{-1}$  (Beusen et al., 2005).

#### 4.5.3 Hidrología y clima

Los datos de entrada de hidrología y clima incluyen para cada subcuenca: los gastos de descarga, los datos de agua consuntiva, factores de retención de nutrientes, la escorrentía y los datos de precipitación.

##### 4.5.3.1 Gasto de descarga

Como se mencionó en la parte referente a la delimitación de la cuenca, los puntos de descarga a partir de los cuales se establecieron las subcuencas para dividir la zona de estudio, coinciden con sitios donde se tienen datos hidrométricos en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (CONAGUA, 2011). Por lo tanto, el gasto descargado por cada subcuenca en un periodo anual, corresponde también con el volumen anual de escurrimiento medido en la estación.

Debido a que los periodos reportados en cada estación hidrométrica no son los mismos, para nuestro trabajo se unificó el criterio y se tomaron los datos disponibles a partir del año de 1990 (disponibles en todas las estaciones), para obtener el gasto de descarga en cada subcuenca ( $\text{km}^3 \text{ año}^{-1}$ ) se promediaron los volúmenes de escurrimiento anual reportado en el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (CONAGUA, 2011). Es importante considerar que este volumen descargado es el que pasa por la estación, es decir de toda la cuenca propia para ese punto, por lo que al tratarse de subcuencas consecutivas, se tuvo el cuidado de considerar solo el gasto que se genera en esa subcuenca. Los gastos para cada subcuenca se presentan en la Tabla 21.

**Tabla 21 Gasto de descarga por subcuenca**

Cuenca	Q ( $\text{Mm}^3 \text{ año}^{-1}$ )
El Niágara (12656)	29.26
El Cuarenta (12422)	27.04
Ajojuar (12358)	45.10
San Gaspar (12370)	106.40
La Cuña (12504)	510.00
Verde (Arcediano 12472)	141.99

NEWS2 requiere, si se conoce, la referencia de cuál sería el gasto de descarga en cada subcuenca en estado prístino (sin alteraciones); sin embargo esta información no es conocida para la cuenca hidrológica del río Verde. La condición prístina sirve dentro del modelo para medir de manera indirecta el nivel de alteración que existe en la cuenca, pero no afecta en el cálculo de las cargas de nutrientes ya que estas son predicciones y trabajan solo con los gastos actuales (Mayorga et al., 2010), por lo anterior para efectos de cálculo en este trabajo se considerara el gasto en estado prístino igual al gasto actual.

#### 4.5.3.2 Agua consuntiva

En la actualidad el agua que se extrae de la red de ríos, presas o agua subterránea se utiliza dentro de la cuenca y se vierte de regreso en la misma después de su aprovechamiento. Por lo anterior se consideró que al no haber exportación de agua consuntiva fuera de la cuenca, no existe tampoco exportación de nutrientes. Tanto el agua como los nutrientes no salen de la cuenca hidrológica, por lo tanto para efectos de cálculo el valor de esta agua consuntiva se consideró igual a cero.

#### 4.5.3.3 Factor de retención de nitrógeno, fósforo y sólidos suspendidos en cuerpos de agua

Los coeficientes de retención de nutrientes utilizados para este trabajo se obtuvieron realizando balances de masas de nutrientes dentro de cuerpos de agua (Tabla 22) con datos de estudios realizados en un cuerpo de agua en el centro de la República Mexicana (Ramírez-Zierold et al., 2010; Márquez-Pacheco et al., 2013), por su cercanía y similitud con los cuerpos de agua de la zona de estudio. Las cargas de entrada fueron calculadas a través de concentraciones medidas en las entradas al cuerpo de agua y las salientes correspondieron a las concentraciones medidas en el agua contenida en el embalse. La diferencia entre las cargas fue ponderada con la carga entrante y el resultado se considera como la retención propia del cuerpo de agua (%).

**Tabla 22 Retención de nutrientes en un cuerpo de agua en el centro de la República Mexicana**

Referencia	Carga N entrante (Mg año <sup>-1</sup> )	Carga P entrante (Mg año <sup>-1</sup> )	Carga N saliente (Mg año <sup>-1</sup> )	Carga P salientes (Mg año <sup>-1</sup> )	Retención N (%)	Retención P (%)
(Márquez-Pacheco et al., 2013)	245	66	202	19	18	71
(Ramírez-Zierold et al., 2010)	592	121	320	26	46	78
				<b>Promedio</b>	<b>32</b>	<b>74.5</b>

No se encontraron estudios reportados en la literatura con datos referentes a retenciones de sólidos suspendidos totales para cuerpos de agua cercanos o con características similares a los que se presentan en la zona de estudio, por lo anterior se adoptaron los valores calculados para la cuenca Grande de Santiago (Vörösmarty et al., 2003) con un valor de 84.91%.

#### 4.5.3.4 Escorrentía

La escorrentía se calculó a partir de los gastos de escurrimiento y considerando una distribución uniforme en toda el área de la subcuenca.

$$R = \frac{Q}{A} \times 1,000,000$$

Donde:

A = área de la subcuenca (km<sup>2</sup>)

Q = gasto anual o escurrimiento anual (km<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>)

R = escorrentía (mm año<sup>-1</sup>)

1,000,000 = factor de conversión

Aplicando la ecuación de escorrentía se obtienen los valores presentados en la Tabla 23.

**Tabla 23 Escorrentía por subcuencas en la cuenca hidrológica del río Verde**

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Q (km <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> )	R (mm año <sup>-1</sup> )
El Niágara	5,462	0.02926	5.36
El Cuarenta	2,327	0.02704	11.62
Ajojucar	816	0.04510	55.25
San Gaspar	2,939	0.10640	36.20
La Cuña	7,618	0.51000	66.95
Verde	1,470	0.14199	96.59

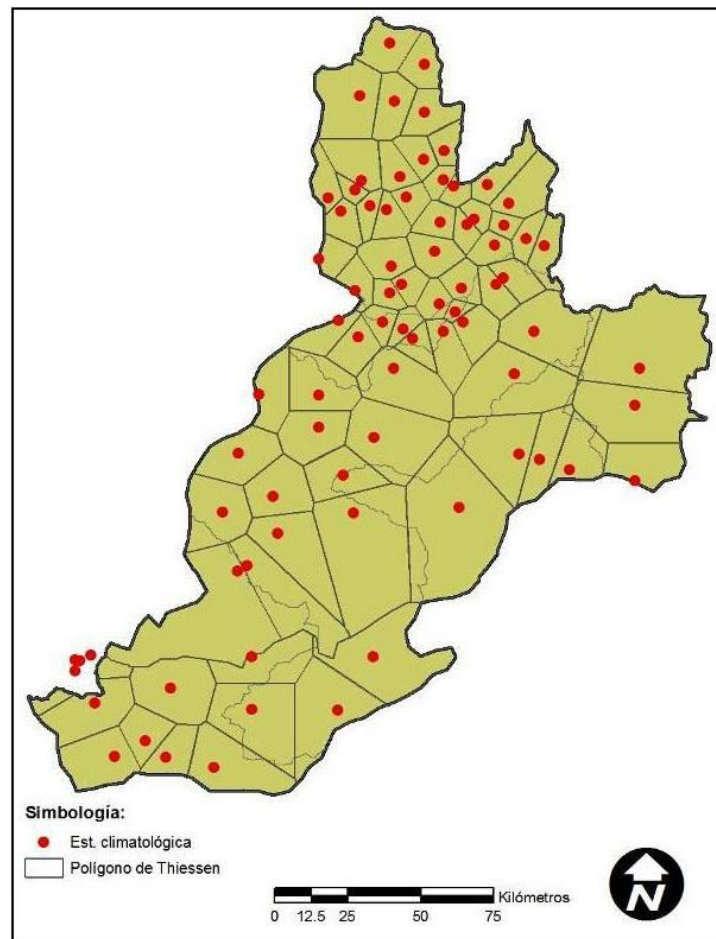
#### 4.5.3.5 Precipitación diaria y anual

Para la determinación de la precipitación media diaria y media anual, se siguió la metodología propuesta por Corzo–Juárez (2009). En esta determinación Corzo–Juárez seleccionó del extractor rápido de información climatológica (ERIC III) (IMTA, 2005), 80 estaciones dentro de la cuenca hidrológica del río Verde (Figura 16) que tienen los reportes más completos desde por lo menos el año de 1990 y hasta por lo menos el año de 2002. Con estos reportes se obtuvo promedios para cada estación en el periodo.

Cada una de las seis subcuencas contiene varias estaciones climatológicas y por lo tanto varios valores de precipitación promedio, se obtuvo un único valor de precipitación media diaria y precipitación media anual para cada una de las subcuencas, mediante la implementación del método de polígonos de Thiessen (Aparicio-Mijares, 2001) se obtuvieron los valores presentados en la Tabla 24.

**Tabla 24 Precipitación media diaria y anual por subcuencas en la cuenca hidrológica del río Verde**

Subcuenca	Precipitación media diaria (mm día <sup>-1</sup> )	Precipitación media anual (mm año <sup>-1</sup> )
El Niágara	2.93	478
El Cuarenta	2.85	465
Ajojucar	3.26	532
San Gaspar	3.86	630
La Cuña	3.91	637
Verde	4.83	788



**Figura 16 Polígonos de Thiessen para la cuenca del Arcediano con base en estaciones climatológicas tomada de Corzo-Juárez (2009)**



#### 4.5.4 Fuentes puntuales

Los factores que influyen la emisión de nutrientes en fuentes puntuales son la densidad poblacional, factores socioeconómicos (reflejados en el producto interno bruto), las emisiones de nutrientes en aguas residuales y emisiones de nutrientes por detergentes además de la eficiencia de tratamiento de estas aguas. En esta sección se estiman estas emisiones por fuentes puntuales para cada subcuenca.

##### 4.5.4.1 Producto interno bruto

Algunas características que tienen impacto en la concentración y composición de los nutrientes en las aguas residuales municipales dependen del desarrollo de las poblaciones y del estilo y calidad de vida de sus habitantes. Estas variables pueden relacionarse mediante el producto interno bruto del sitio.

El modelo NEWS2 requiere como dato de entrada el producto interno bruto generado en la cuenca estudiada, dicho valor debe ser introducido en dólares americanos corrientes al año de 1995. Dos valores son necesarios, el primero el producto interno actual y el segundo es tomando en consideración la variación en el poder adquisitivo presentado en la región.

Los estudios económicos se realizan en el mayor de los casos por regiones, para la cuenca hidrológica del río Verde los valores del producto interno bruto son tomados de los trabajos realizados sobre los contenidos de N y P en aguas residuales municipales y sus variaciones a nivel mundial (Van Dreht et al., 2009). El valor del producto interno bruto sin considerar la variación en el poder adquisitivo es de \$3,802.70 mientras que considerando la variación del poder adquisitivo es de \$8,182.30 para la cuenca estudiada.

##### 4.5.4.2 Densidad poblacional

Se consultó el último censo de población y vivienda disponible (INEGI, 2010), obteniendo datos de población por localidades. La información se obtuvo en formato de sistema de información geográfica por lo que mediante Arc Gis, se separaron todas las localidades que están dentro de cada subcuenca en la cuenca hidrológica del río Verde (Figura 17).

Con las herramientas de información digital, se generó la información del número de habitantes por cada localidad dentro de cada subcuenca determinada, realizando la integración de la información de todas las localidades dentro de una subcuenca, se obtuvo el número total de habitantes censados para esa región. Posteriormente dividiendo el total de habitantes entre el área de la subcuenca se obtuvo la densidad poblacional por subcuenca ( $\text{hab km}^{-2}$ ) (Tabla 25).

$$Dens_{pob} = \frac{Pobl}{A}$$

Donde:

A = área de la subcuenca (km<sup>2</sup>)

Dens<sub>pob</sub> = densidad poblacional (hab km<sup>-2</sup>)

Pobl = población censada (hab)

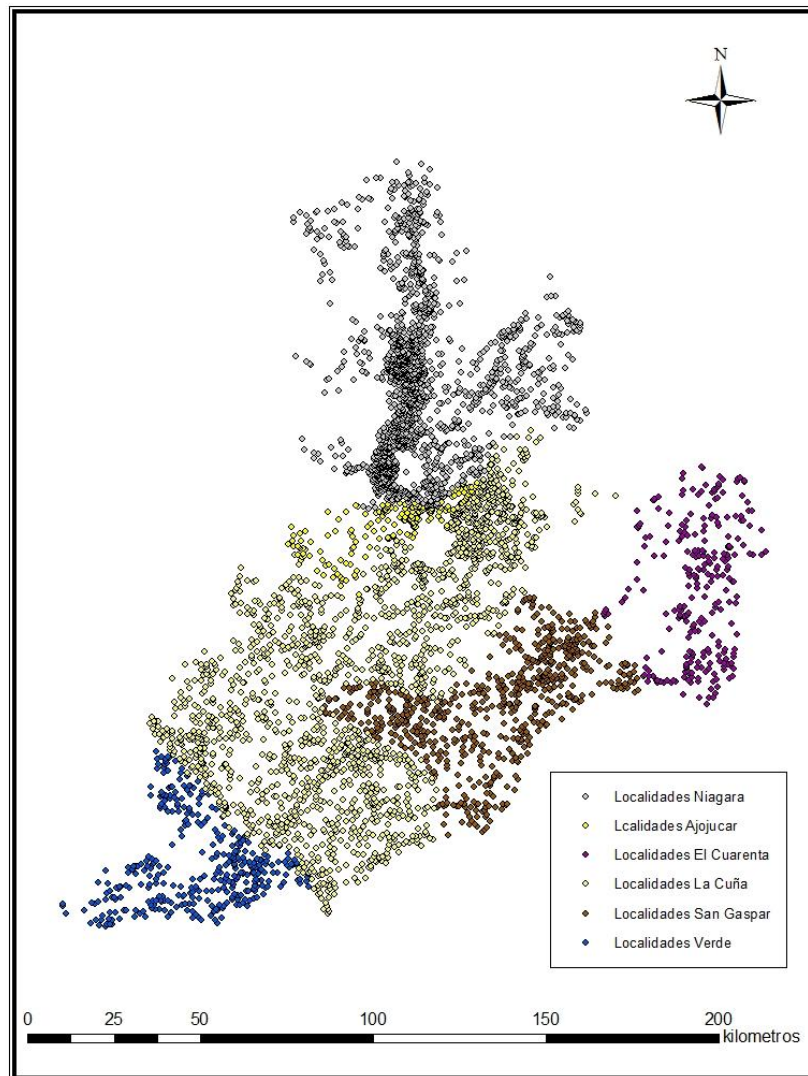


Figura 17 Localidades por subcuencas, en la cuenca hidrológica del río Verde

**Tabla 25 Densidad poblacional por subcuencas, en la cuenca hidrológica del río Verde**

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Población (hab)	Densidad poblacional (hab km <sup>-2</sup> )
El Niágara	5,462	1,062,582	194.54
El Cuarenta	2,327	39,199	16.85
Ajojucar	816	34,672	42.48
San Gaspar	2,939	198,664	67.59
La Cuña	7,618	266,751	35.02
Verde	1,470	135,507	92.18

#### 4.5.4.3 Densidad poblacional urbana

De acuerdo al INEGI una población se considera urbana si en ella viven más de 2,500 personas (INEGI, 2013 b). La información obtenida del censo del total de población por subcuenca, se sometió a un filtro donde se separaron las poblaciones que cumplen con el requisito de poblaciones urbanas. De manera similar a lo realizado para calcular la densidad poblacional total, se calcula la densidad poblacional urbana (Tabla 26).

$$Dens_{pob.urb} = \frac{Pobl_{urb}}{A}$$

Donde:

A = área de la subcuenca (km<sup>2</sup>)

Dens<sub>pob.urb</sub> = densidad poblacional urbana (hab km<sup>-2</sup>)

Pobl<sub>urb</sub> = población censada que reside dentro de una zona urbana (hab)

**Tabla 26 Densidad poblacional urbana por subcuencas, en la cuenca hidrológica del río Verde**

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Población en zonas urbanas (hab.)	Densidad poblacional urbana (hab km <sup>-2</sup> )
El Niágara	5,462	869,052	159.11
El Cuarenta	2,327	12,609	5.42
Ajojucar	816	13,782	16.88
San Gaspar	2,939	153,483	52.22
La Cuña	7,618	149,732	19.65
Verde	1,470	105,882	72.03

#### 4.5.4.4 Densidad de población conectada al drenaje

Se supuso que los habitantes conectados al drenaje con respecto a la población urbana para la cuenca hidrológica del río Verde, representa una fracción semejante a la calculada para la cuenca Grande de Santiago, el porcentaje considerado es que el 88% de la población urbana se encuentra conectada al drenaje (Van Drecht et al., 2009). La densidad de población conectada a drenaje se calcula con la ecuación siguiente y se presentan los resultados en la Tabla 27.

$$Dens_{pob.urb.dren} = \frac{Dens_{pob.urb.dren} \cdot F_{dren}}{100}$$

Donde:

$Dens_{pob.urb}$  = densidad poblacional urbana (hab km<sup>-2</sup>)

$Dens_{pob.urb.dren}$  = densidad poblacional urbana conectada a drenaje (hab km<sup>-2</sup>)

$F_{dren}$  = fracción de población urbana conectada a drenaje (%)

100 = factor de conversión

**Tabla 27 Densidad poblacional urbana conectada al drenaje por subcuencas, en la cuenca hidrológica del río Verde**

Subcuenca	Densidad poblacional urbana (hab km <sup>-2</sup> )	Densidad poblacional conectada al drenaje (hab km <sup>-2</sup> )
El Niágara	159.11	140.02
El Cuarenta	5.42	4.77
Ajojucar	16.88	14.86
San Gaspar	52.22	45.95
La Cuña	19.65	17.30
Verde	72.03	63.38

#### 4.5.4.5 Emisiones de N y P por agua residual

Las descargas de nutrientes provenientes de aguas residuales municipales son calculadas con base a la población existente en cada cuenca (INEGI,2010). Se consideró la cobertura de agua potable (CEA, 2008) así como la dotación media de agua potable (ORVA Ingeniería, 2003) y la aportación de aguas residuales (CONAGUA, 1994) determinando así el volumen de aguas residuales municipales generado, con concentraciones típicas que existen publicadas para este tipo de aguas (FAO ,1992) se calcularon las cargas de nutrientes que se emiten en la cuenca. Debido a que el dato de entrada al modelo debe ser por unidad de área y en un periodo anual, la ecuación para el cálculo de emisiones de nutrientes por agua residual queda de la siguiente manera:

$$E_{sew} = \frac{P \cdot C_{ap} \cdot D_{ap} \cdot A_{p_{res}} \cdot C_{nut} \cdot 365}{A \times 1,000,000}$$

Donde:

A	= área (km <sup>2</sup> )
A <sub>p<sub>res</sub></sub>	= aportación de agua residual (fracción). 0.75 (CONAGUA, 1994)
C <sub>ap</sub>	= cobertura agua potable (fracción). 0.95 simplificado de CEA (2008)
C <sub>nut</sub>	= concentración típica de nutriente (mg L <sup>-1</sup> ). 40 para N y 8.5 para P (FAO, 1992)
D <sub>ap</sub>	= dotación de agua potable (L hab <sup>-1</sup> día <sup>-1</sup> ). 280 (ORVA Ingeniería, 2003)
E <sub>sew</sub>	= emisión de nutriente por agua residual (Kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )
P	= población (hab)
365	= factor de conversión
1,000,000	= factor de conversión

Los resultados del cálculo de emisiones por aguas residuales municipales se presentan en la Tabla 28.

**Tabla 28 Emisiones de nutrientes por agua residual por subcuenca, en la cuenca hidrológica del río Verde**

Subcuenca	Área (km <sup>2</sup> )	Población (hab)	Emisión N (kg km <sup>2</sup> año <sup>-1</sup> )	Emisión P (kg km <sup>2</sup> año <sup>-1</sup> )
El Niágara	5,462	1,062,582	566.65	120.41
El Cuarenta	2,327	39,199	49.07	10.43
Ajojucar	816	34,672	123.72	26.29
San Gaspar	2,939	198,664	196.88	41.84
La Cuña	7,618	266,751	101.99	21.67
Verde	1,470	135,507	268.49	57.05

#### 4.5.4.6 Emisiones de P por detergentes

La concentración representativa utilizada para el cálculo de las emisiones por aguas residuales municipales incluye la masa de nutrientes generada por el uso de detergentes, por lo que la emisión específica de P por detergentes, para los datos de entrada del modelo, se consideró igual a cero. De esta forma se evitó duplicar las cargas emitidas por esta actividad.

#### 4.5.4.7 Remoción de nutrientes en plantas de tratamiento de aguas

En la zona de estudio, los tratamientos que se dan a las aguas residuales municipales son procesos secundarios enfocados a disminución de DBO (CONAGUA, 2008), en lo que se refiere a nutrientes es mínima la remoción. Por otro lado aun cuando se remuevan nutrientes de las aguas residuales, estos quedan en los lodos generados en los procesos. Los lodos, al no salir de la cuenca se convierten en una fuente latente de nutrientes que tarde o temprano serán liberados. Se debe recordar que los nutrientes no pueden degradarse ya que son elementos químicos y no pueden convertirse a algo más simple.

Por las razones anteriores, se consideró la condición más desfavorable, esto es, aun en lugares donde existen plantas de tratamiento de aguas residuales, se consideró nula la remoción de nutrientes, por lo que la emisión neta después de tratamiento, para este estudio, es igual a la emisión antes de tratamiento.

#### 4.5.5 Uso de suelo y fuentes difusas

##### 4.5.5.1 Uso de suelo

Los 4 usos de suelo que se consideraron para la implementación del modelo NEWS2 son: humedales, uso agrícola, arrozales y pastizales. Para la determinación de los porcentajes en los que se encuentran el uso agrícola y los pastizales en la cuenca, se procesó la carta geográfica de uso de suelo 2000 (Figura 18) (SEMARNAT, 2013), en la versión digital de esta carta se sobrepusieron mediante herramientas del sistema de información geográfica, las subcuencas definidas y se determinaron los porcentajes con respecto al área total de cobertura para cada uso de suelo.

En la carta de uso de suelo no aparecen como tales los arrozales, sin embargo considerando la condición más desfavorable, se supuso un porcentaje igual al que tiene la cuenca Grande de Santiago que es un valor conservador y corresponde a la cantidad de 0.06% (Bouwman et al., 2009). En la Tabla 29 se resumen los porcentajes de uso de suelo para cada subcuenca.

**Tabla 29 Uso de suelo por subcuenca, en la cuenca hidrológica del río Verde**

Subcuenca	Humedales (%)	Uso agrícola (%)	Arrozales (%)	Pastizales (%)
El Niágara	0.00	41.91	0.06	31.34
El Cuarenta	0.00	36.63	0.06	41.97
Ajojucar	0.00	36.99	0.06	43.59
San Gaspar	0.00	30.08	0.06	51.08
La Cuña	0.00	38.82	0.06	42.36
Verde	0.00	59.02	0.06	10.24

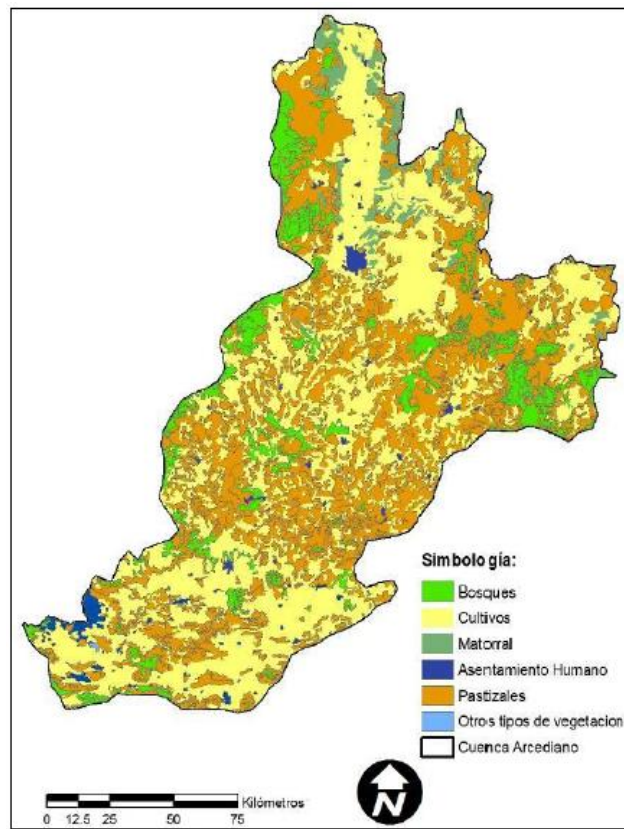


Figura 18 Uso de suelo en la cuenca del Arcediano tomada de Corzo-Juárez (2009)

#### 4.5.5.2 Fuentes difusas

En las emisiones por fuentes difusas se consideran las generadas por desechos pecuarios y las generadas por uso agrícola así como por fijación y depositación atmosférica, la estimación de las mismas para cada subcuenca se describe en esta sección.

##### 4.5.5.2.1 Emisiones por desechos pecuarios

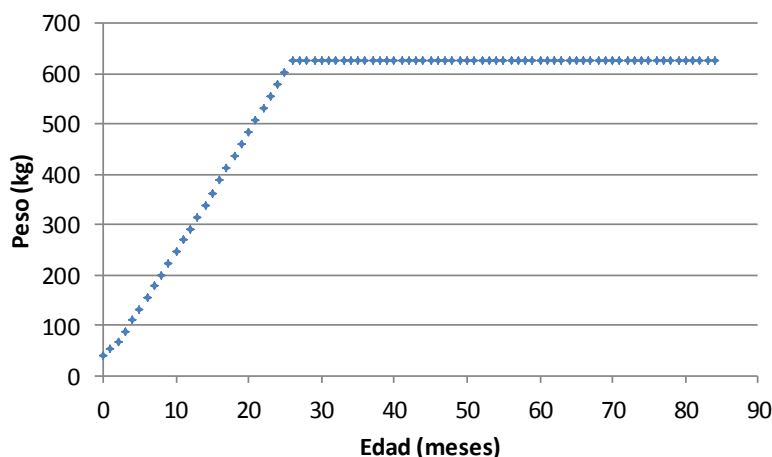
Para estimar la emisión de nutrientes por desechos pecuarios se consultaron los cuadernos estadísticos de INEGI, mismos que contienen el inventario ganadero, para los 5 estados que se encuentran dentro de la cuenca hidrológica del río Verde (INEGI, 2008a, 2008b, 2008c, 2008d y 2008e) (Anexo B). Por otro lado, se han realizado estudios de caracterización de contenido de nutrientes en desechos pecuarios, para los desechos de bovinos se consideraran las cargas de la Tabla 30 que están dadas en función del peso del animal vivo para diferentes etapas de su crecimiento (Jones & Sutton, 2003), mientras que para los desechos porcícolas se utilizaron  $50 \text{ g UPA}^{-1} \text{ día}^{-1}$  para N y  $13 \text{ g UPA}^{-1} \text{ día}^{-1}$  para P (1 UPA= 100 kg de peso vivo de animal) (Taiganides & Sánchez, 1996).

**Tabla 30 Cargas de nutrientes en desechos de ganado bovino (Jones & Sutton, 2003)**

	Peso (kg)	N (g día <sup>-1</sup> )	P (g día <sup>-1</sup> )
Ganado lechero	68	27	10
	113	45	20
	227	91	37
	453	186	75
	634	258	105
Ganado de Carne	227	77	57
	340	118	86
	453	154	133
	567	195	144

El crecimiento de los bovinos destinados a la producción de carne presenta un comportamiento lineal; tomando en cuenta un peso promedio de 40 kg al nacimiento y un peso promedio de sacrificio de 567 kg (Jones & Sutton, 2003), se obtiene un peso representativo para todo su periodo de vida de 303.50 kg.

El comportamiento del crecimiento del ganado bovino destinado a la producción de leche presenta una variación con respecto al crecimiento del ganado bovino destinado a la producción de carne. Esta diferencia consiste en que para la producción eficiente de leche, se hace que el animal llegue a un peso óptimo y se mantiene produciendo con este peso por varios años. Por lo tanto para obtener un peso representativo para todo su tiempo de vida para este tipo de ganado, es necesario construir una curva de crecimiento (peso vs edad) para todo su periodo de vida (Figura 19, 20 y 21). Las tasas de crecimiento son de 425 g día<sup>-1</sup> desde el nacimiento hasta a los 2 meses de edad, 737.50 g día<sup>-1</sup> desde los 2 meses y hasta los 6 meses de edad, 750 g día<sup>-1</sup> desde los 6 meses y hasta los 13 meses de edad y 775 g día<sup>-1</sup> desde los 13 meses y hasta llegar a un peso promedio de 627 kg, posteriormente conservan este peso promedio hasta su sacrificio a una edad de aproximadamente 7 años (FMVZ UNAM, 2009).



**Figura 19 Curva de crecimiento (peso-edad) en ganado lechero durante todo el periodo de vida, construida con datos de la FMVZ UNAM (2009)**



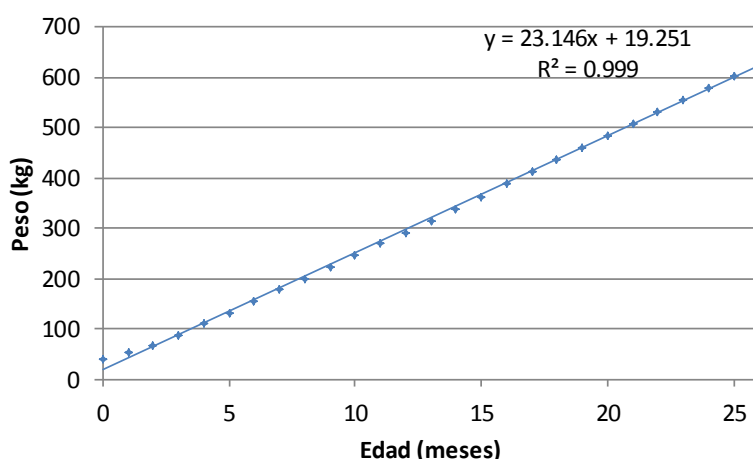


Figura 20 Curva de crecimiento (peso-edad) en ganado lechero durante periodo temprano, construida con datos de la FMVZ UNAM (2009)

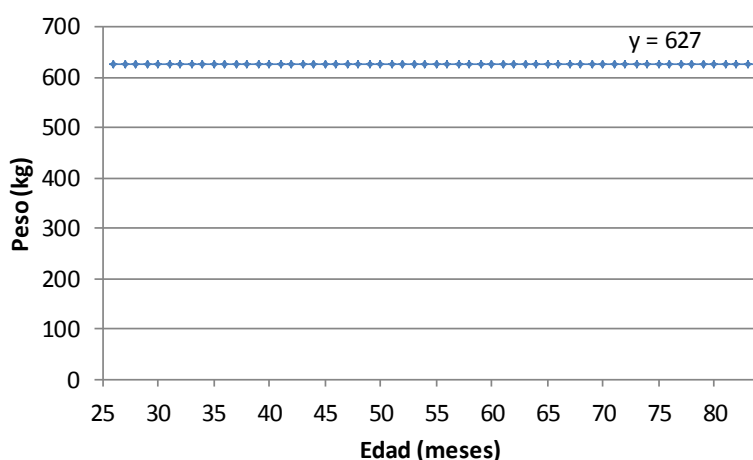


Figura 21 Curva de crecimiento (peso-edad) en ganado lechero durante periodo de madurez, construida con datos de FMVZ UNAM (2009)

Haciendo la integración de la curva de crecimiento para ganado bovino destinado a producción de leche se obtiene el peso representativo para este tipo de ganado, resultando de 532.02 kg.

En los inventarios ganaderos del estado de Jalisco, la proporción presentada para ganado productor de leche es de 47% y el utilizado para producción de carne es de 53%. Debido a que en los inventarios del resto de los estados no se define el tipo de uso que se le da al ganado bovino, se consideró una probabilidad de que el uso para producción de leche o producción de carne es de 50% - 50%, por lo tanto el valor medio entre el los pesos representativos de uso para producción de carne y uso para producción de leche será el utilizado cuando el uso no está especificado, obteniendo un peso representativo de 417.76 kg.

Aunque el crecimiento de los bovinos se considera con un comportamiento lineal, no ocurre lo mismo con las concentraciones de nutrientes que contienen los desechos de este tipo de ganado durante las diferentes etapas de crecimiento (Tabla 30), para este trabajo se construyeron graficas donde se relacionan las diferentes concentraciones de nutrientes en excreta con las diferentes edades del animal (Figuras 22, 23, 24, 25, 26 y 27), se ajustaron a una línea de tendencia apropiada y se obtuvieron así ecuaciones donde para un peso específico del animal, se obtiene la concentración representativa de cada nutriente en los desechos excretados.

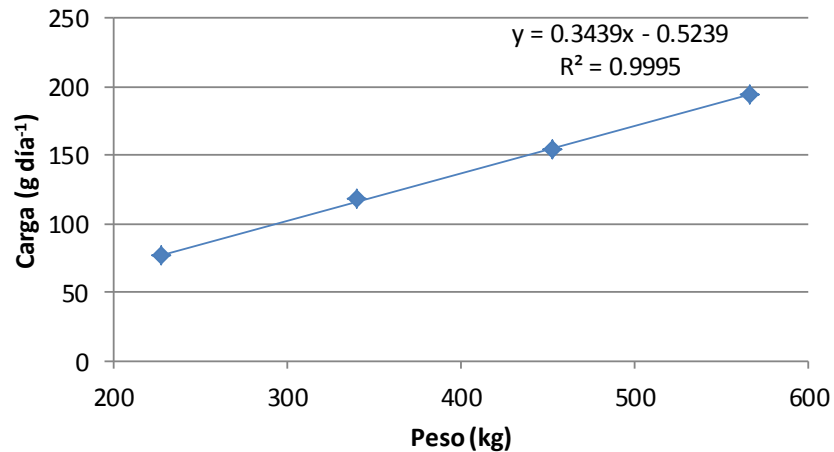


Figura 22 Curva de carga de N en excreta - peso de bovinos para producción de carne, construida con valores de Jones & Sutton (2003)

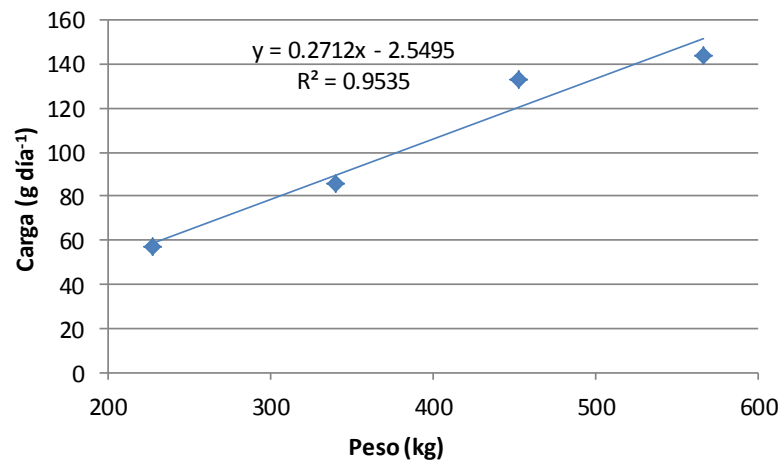


Figura 23 Curva de carga de P en excreta - peso de bovinos para producción de carne, construida con valores de Jones & Sutton (2003)

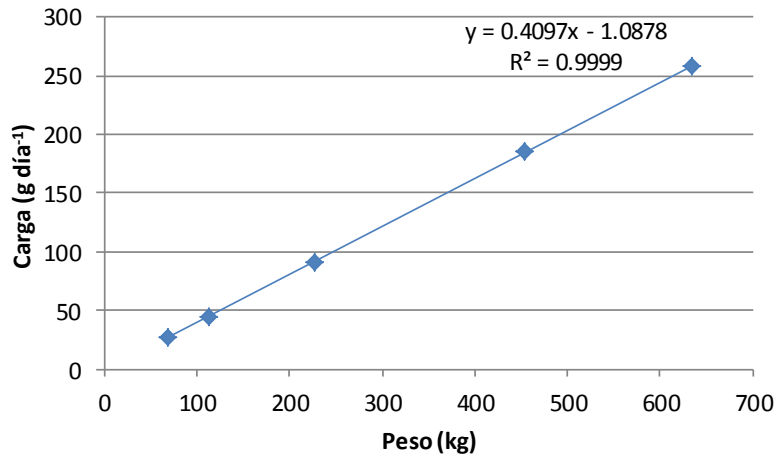


Figura 24 Curva de carga de N en excreta - peso de bovinos para producción de leche, construida con valores de Jones & Sutton (2003)

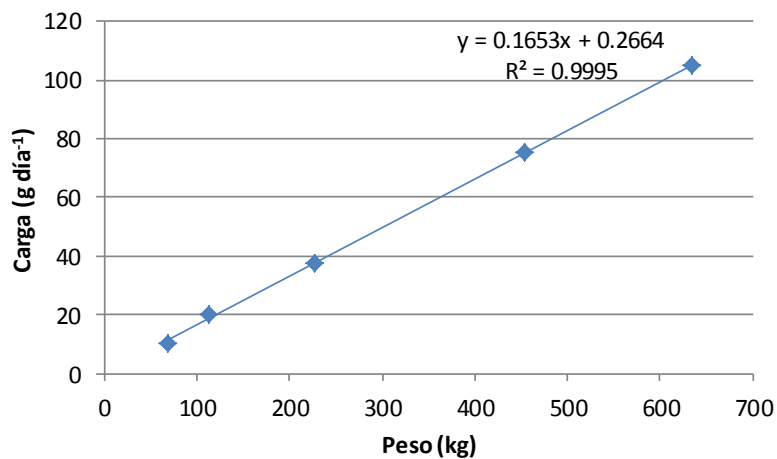


Figura 25 Curva de carga de P en excreta - peso de bovinos para producción de leche, construida con valores de Jones & Sutton (2003)

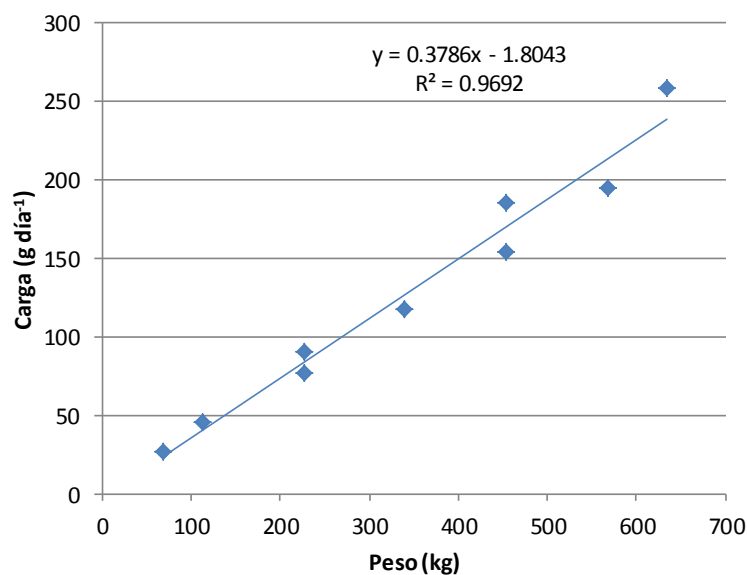


Figura 26 Curva de carga de N en excreta - peso de bovinos de uso no especificado, construida con valores de Jones & Sutton (2003)

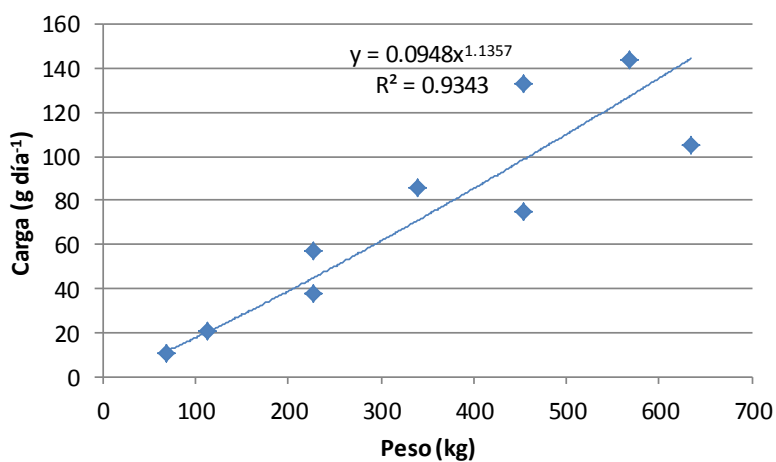


Figura 27 Curva de carga de P en excreta - peso de bovinos de uso no especificado, construida con valores de Jones & Sutton (2003)

Con las ecuaciones para cálculo de concentración de nutriente a partir del peso del animal y los pesos representativos para cada tipo de uso del ganado bovino, se obtienen las concentraciones promedio representativas para el ganado bovino en sus diferentes usos, los resultados de los cálculos se presentan en la Tabla 31.

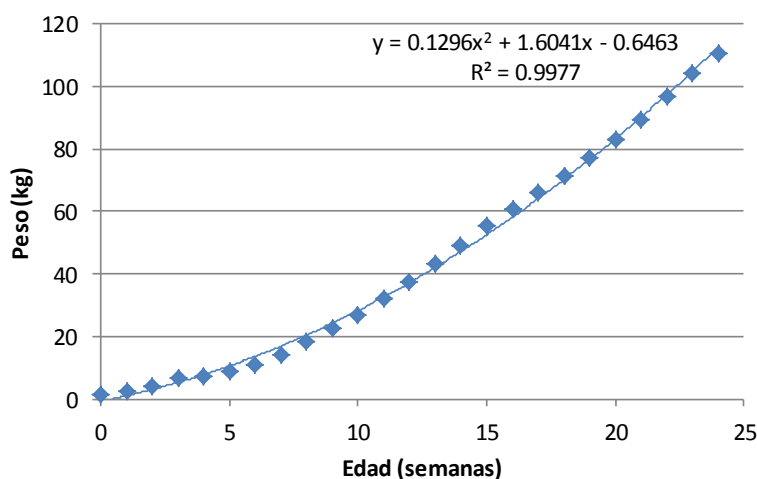
**Tabla 31 Concentraciones de nutrientes y peso representativo para bovinos**

	Lechero	Carne	Uso no definido
Peso representativo (kg)	532.02	303.50	417.76
Carga promedio de N (g día <sup>-1</sup> )	216.88	103.85	156.36
Carga promedio de P (g día <sup>-1</sup> )	88.21	79.76	89.82

El ganado porcino no presenta un crecimiento lineal durante sus diferentes etapas de crecimiento, por lo que se obtuvieron los pesos monitoreados en granjas porcinas de la República Mexicana para las diferentes semanas de edad desde el nacimiento del animal hasta su edad de sacrificio (Tabla 32) (Pradal - Roa, 2013), se construyó la gráfica peso-edad (Figura 28) y haciendo la integración de esta se obtuvo el peso representativo para un cerdo. El peso resultante representativo fue de 43.07 kg.

**Tabla 32 Relación peso – edad para cerdos criados en la República Mexicana. Modificado de Pradal-Roa (2013)**

Edad (semanas)	Peso (kg)	Edad (semanas)	Peso (kg)
1	2.5	13	43.1
2	4.3	14	49.0
3	6.5	15	55.4
4	7.5	16	61.0
5	9.0	17	66.2
6	10.8	18	71.5
7	14.2	19	77.0
8	18.2	20	83.2
9	22.5	21	89.8
10	27.0	22	96.8
11	32.0	23	104.0
12	37.5	24	110.6



**Figura 28 Relación peso-edad en porcinos criados en la República Mexicana, construida con datos de Pradal-Roa (2013)**

Las cargas de nutrientes por municipio para ganado bovino y porcino se obtuvieron con las siguientes ecuaciones.

Para bovinos:

$$Emisión = \frac{No. cabezas \cdot Carga_{prom} \times 365}{1,000,000}$$

Donde:

No. cabezas = bovinos en el municipio

Carga<sub>prom</sub> = carga de nutriente (g día<sup>-1</sup> cabeza<sup>-1</sup>)

Emisión = emisión anual de nutriente por municipio (Mg año<sup>-1</sup>)

365 = factor de conversión

1,000,000 = factor de conversión

Para porcinos:

$$Emisión = \frac{No. cabezas \cdot \frac{peso rep}{100} \cdot Carga_{prom} \cdot 365}{1,000}$$

Donde:

No cabezas = porcinos en el municipio

Carga<sub>prom</sub> = carga de nutriente (kg UPA<sup>-1</sup> día<sup>-1</sup>)

Emisión = emisión anual de nutriente por municipio (Mg año<sup>-1</sup>)

Peso rep = peso representativo del porcino en el municipio (kg cabeza<sup>-1</sup>)

100 = conversión de peso a UPA (kg UPA<sup>-1</sup>)

365 = factor de conversión

1,000 = factor de conversión

Aplicando las ecuaciones presentadas para el cálculo de emisiones de nutrientes por uso pecuario de cada municipio, se obtienen los resultados presentados en la Tabla 33.

Los cálculos de cargas se efectuaron considerando el total de cabezas contenidas en el inventario ganadero para todo el municipio. Existen municipios que se encuentran parcialmente localizados dentro de la cuenca hidrológica del río Verde, por lo que se hizo una reconsideración para la estimación de las cargas emitidas por usos pecuarios en los municipios que presentan esta condición (parte dentro y parte fuera de la cuenca). Para este fin se consideró que las cabezas de ganado presentan una distribución uniforme dentro del municipio, por lo tanto, se multiplicó el total de la carga emitida en el municipio por la parte proporcional del municipio que se encuentra dentro de la cuenca. El área del municipio que se encuentran dentro de la cuenca se obtuvo mediante herramientas de información digital (Figura 29). Las cargas emitidas por municipio dentro de la cuenca hidrológica del río Verde se calcularon con la siguiente ecuación y están contenidas en la Tabla 34.

$$Emisión_{cue\_mun} = \frac{(Emisión_{bovina} + Emisión_{porcina}) \cdot A_{dentro}}{A_{total}}$$

Donde:

$A_{dentro}$  = área del municipio dentro de la cuenca hidrológica del río Verde (km<sup>2</sup>)

$A_{total}$  = área total del municipio (km<sup>2</sup>)

$Emisión_{bovina}$  = emisión anual de nutriente por ganado bovino en el total del municipio (Mg año<sup>-1</sup>)

$Emisión_{cue\_mun}$  = emisión anual de nutrientes por actividad pecuaria dentro de la cuenca hidrológica del río Verde por municipio (Mg año<sup>-1</sup>)

$Emisión_{porcina}$  = emisión anual de nutriente por ganado porcino en el total del municipio (Mg año<sup>-1</sup>)

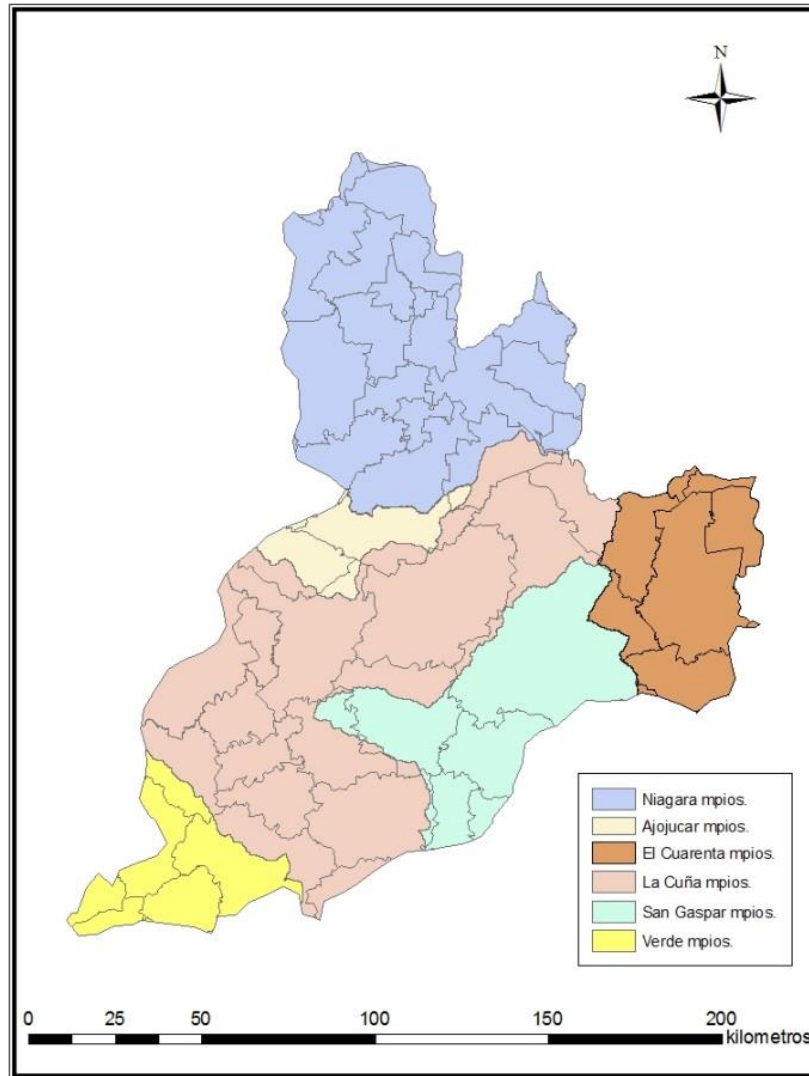


Figura 29 Distribución de áreas por municipio y por subcuena en la cuenca hidrológica del río Verde



Tabla 33 Cargas emitidas por producción bovina y porcina en los municipios que se encuentran dentro de la cuenca hidrológica del río Verde

Estado	Municipio	Cargas N (Mg año <sup>-1</sup> )				Cargas P (Mg año <sup>-1</sup> )			
		Bovino uso no especificado	Bovino Leche	Bovino Carne	Porcino	Bovino uso no especificado	Bovino Leche	Bovino Carne	Porcino
Aguascalientes	Aguascalientes	2,322.91	0.00	0.00	130.55	1,334.45	0.00	0.00	33.94
	Asientos	181.66	0.00	0.00	187.70	104.36	0.00	0.00	48.80
	Calvillo	107.47	0.00	0.00	10.63	61.74	0.00	0.00	2.77
	Cosío	823.25	0.00	0.00	12.92	472.94	0.00	0.00	3.36
	El Llano	156.38	0.00	0.00	22.35	89.83	0.00	0.00	5.81
	Jesús María	924.50	0.00	0.00	87.42	531.10	0.00	0.00	22.73
	Pabellón de Arteaga	367.03	0.00	0.00	249.13	210.85	0.00	0.00	64.77
	Rincón de Romos	146.96	0.00	0.00	85.51	84.42	0.00	0.00	22.23
	San Francisco de los R.	59.81	0.00	0.00	37.67	34.36	0.00	0.00	9.79
	San José de Gracia	607.81	0.00	0.00	4.89	349.17	0.00	0.00	1.27
	Tepezalá	137.43	0.00	0.00	204.09	78.95	0.00	0.00	53.06
Guanajuato	León	4,910.75	0.00	0.00	311.69	2,821.10	0.00	0.00	81.04
	Ocampo	650.73	0.00	0.00	14.84	373.83	0.00	0.00	3.86
	San Felipe	1,246.49	0.00	0.00	34.20	716.08	0.00	0.00	8.89
Jalisco	Acatic	0.00	976.62	1,368.49	2,299.98	0.00	397.21	1,051.04	597.99
	Cañadas de Obregón	0.00	78.37	206.47	38.59	0.00	31.87	158.57	10.03
	Cuquio	0.00	85.81	854.46	37.97	0.00	34.90	656.25	9.87
	Encarnación de Díaz	0.00	5,743.01	495.57	387.87	0.00	2,335.78	380.61	100.85
	Ixtlahuacan del río	0.00	280.47	868.52	75.34	0.00	114.07	667.05	19.59
	Jalostotitlán	0.00	1,480.48	668.08	499.65	0.00	602.14	513.10	129.91

Tabla 33 Cargas emitidas por producción bovina y porcina en los municipios que se encuentran dentro de la cuenca hidrológica del río Verde

Estado	Municipio	Cargas N (Mg año <sup>-1</sup> )				Cargas P (Mg año <sup>-1</sup> )			
		Bovino uso no especificado	Bovino Leche	Bovino Carne	Porcino	Bovino uso no especificado	Bovino Leche	Bovino Carne	Porcino
Jalisco	Lagos de moreno	0.00	5,427.87	3,107.39	3,458.62	0.00	2,207.61	2,386.57	899.24
	Mexticacán	0.00	45.76	259.20	15.54	0.00	18.61	199.07	4.04
	Ojuelos de Jalisco	0.00	506.08	1,488.91	38.71	0.00	205.83	1,143.53	10.07
	San Diego de Alejandría	0.00	264.32	555.50	71.39	0.00	107.50	426.64	18.56
	San Juan de los Lagos	0.00	5,380.69	1,949.08	5,495.37	0.00	2,188.42	1,496.95	1,428.80
	San Julián	0.00	1,118.95	252.94	695.30	0.00	455.10	194.27	180.78
	San Miguel el Alto	0.00	3,953.40	779.52	168.53	0.00	1,607.92	598.69	43.82
	Teocaltiche	0.00	3,784.39	824.93	199.35	0.00	1,539.18	633.57	51.83
	Tepatitlán	0.00	5,326.62	2,941.82	3,772.50	0.00	2,166.43	2,259.40	980.85
	Unión de San Antonio	0.00	61.83	651.02	70.48	0.00	25.15	500.00	18.32
	Valle de Guadalupe	0.00	572.97	209.20	328.35	0.00	233.04	160.67	85.37
	Villa Hidalgo	0.00	89.69	982.92	429.08	0.00	36.48	754.91	111.56
	Yahualica de González	0.00	324.80	650.19	322.62	0.00	132.10	499.36	83.88
SLP	Villa de Arriaga	1,025.57	0.00	0.00	77.93	589.16	0.00	0.00	20.26
Zacatecas	Apulco	333.30	0.00	0.00	6.49	191.47	0.00	0.00	1.69
	Cauhtémoc	284.96	0.00	0.00	3.97	163.70	0.00	0.00	1.03
	Genaro Codina	187.02	0.00	0.00	5.16	107.44	0.00	0.00	1.34
	Guadalupe	799.97	0.00	0.00	14.26	459.56	0.00	0.00	3.71
	Loreto	356.12	0.00	0.00	18.64	204.58	0.00	0.00	4.85

Tabla 33 Cargas emitidas por producción bovina y porcina en los municipios que se encuentran dentro de la cuenca hidrológica del río Verde

Estado	Municipio	Cargas N (Mg año <sup>-1</sup> )				Cargas P (Mg año <sup>-1</sup> )			
		Bovino uso no especificado	Bovino Leche	Bovino Carne	Porcino	Bovino uso no especificado	Bovino Leche	Bovino Carne	Porcino
Zacatecas	Luis Moya	429.58	0.00	0.00	7.08	246.78	0.00	0.00	1.84
	Nochistlán de Mejía	1,288.44	0.00	0.00	24.92	740.18	0.00	0.00	6.48
	Noria de Ángeles	215.96	0.00	0.00	5.90	124.06	0.00	0.00	1.53
	Ojo Caliente	791.69	0.00	0.00	15.78	454.81	0.00	0.00	4.10
	Pinos	1,846.48	0.00	0.00	79.26	1,060.76	0.00	0.00	20.61
	Trancoso	248.49	0.00	0.00	2.92	142.75	0.00	0.00	0.76
	Villa García	178.18	0.00	0.00	11.48	102.36	0.00	0.00	2.98
	Villanueva	3,617.35	0.00	0.00	37.12	2,078.07	0.00	0.00	9.65

**Tabla 34 Emisiones de nutrientes por actividad pecuaria por municipio dentro de la cuenca hidrológica del río Verde**

Estado	Municipio	Área dentro de la cuenca hidrológica del río Verde (%)	N (Mg año <sup>-1</sup> )	P (Mg año <sup>-1</sup> )
Aguascalientes	Aguascalientes	99.00	2 428.93	1 354.71
	Asientos	86.20	318.38	132.02
	Calvillo	1.50	1.77	0.97
	Cosío	100.00	836.18	476.30
	El Llano	100.00	178.73	95.65
	Jesús María	73.20	740.73	405.40
	Pabellón de Arteaga	100.00	616.16	275.62
	Rincón de Romos	100.00	232.47	106.66
	San Francisco de los R.	100.00	97.48	44.15
	San José de Gracia	76.50	468.71	268.09
	Tepezalá	100.00	341.52	132.01
Guanajuato	León	0.94	49.09	27.28
	Ocampo	93.11	619.71	351.66
	San Felipe	22.22	284.57	161.09
Jalisco	Acatic	100.00	4 645.08	2 046.24
	Cañadas de Obregón	100.00	323.43	200.48
	Cuquío	45.90	449.01	321.77
	Encarnación de Díaz	100.00	6 626.45	2 817.25
	Ixtlahuacán del río	16.00	195.89	128.11
	Jalostotitlán	100.00	2 648.21	1 245.15
	Lagos de moreno	96.50	11 574.09	5 301.15
	Mexxicacán	100.00	320.49	221.72
	Ojuelos de Jalisco	69.80	1 419.53	948.88
	San Diego de Alejandría	25.90	230.82	143.15
	San Juan de los Lagos	100.00	12 825.14	5 114.17
	San Julián	87.80	1 814.99	728.86
	San Miguel el Alto	98.30	4 818.13	2 212.18
	Teocaltiche	97.80	4 702.89	2 175.64
	Tepatitlán	61.00	7 344.97	3 298.08
	Unión de San Antonio	65.80	515.43	357.60
	Valle de Guadalupe	100.00	1 110.52	479.08
	Villa Hidalgo	90.70	1 362.03	818.97
	Yahualica de González	80.30	1 041.98	574.42
SLP	Villa de Arriaga	8.20	90.49	49.97
Zacatecas	Apulco	100.00	339.79	193.16
	Cauhtémoc	100.00	288.93	164.73

**Tabla 34 Emisiones de nutrientes por actividad pecuaria por municipio dentro de la cuenca hidrológica del río Verde**

Estado	Municipio	Área dentro de la cuenca hidrológica del río Verde (%)	N (Mg año <sup>-1</sup> )	P (Mg año <sup>-1</sup> )
Zacatecas	Genaro Codina	59.40	114.15	64.62
	Guadalupe	8.70	70.84	40.30
	Loreto	60.70	227.48	127.13
	Luis Moya	99.90	436.22	248.37
	Nochistlán de Mejía	63.50	833.98	474.13
	Noria de Ángeles	7.20	15.97	9.04
	Ojo Caliente	62.20	502.25	285.44
	Pinos	1.70	32.74	18.38
	Trancoso	7.90	19.86	11.34
	Villa García	92.10	174.67	97.02
	Villanueva	0.10	3.65	2.09
<b>Total cuenca hidrológica del río Verde</b>			<b>74 334.53</b>	<b>34 750.25</b>

Después de haber calculado las emisiones de nutrientes por cada municipio y estimar la parte que corresponde a las localizadas dentro de la cuenca hidrológica del río Verde, estas cargas se redistribuyeron por cada subcuenca definida para el estudio, suponiendo que las emisiones de nutrientes se dividen de una manera proporcional a el área que ocupan dentro de cada subcuenca con respecto al área total del municipio contenida en la cuenca hidrológica del río Verde (Figura 29). El porcentaje del área del municipio dentro de cada subcuenca se presenta en la Tabla 35.

La emisión total de nutrientes por subcuenca se calculó con la ecuación siguiente y los resultados se encuentran contenidos en la Tabla 36.

$$Emisión_{subc} = \frac{\sum_{i=0}^{i=No. \text{ mpios}} Emisión_{cue\_mun} \cdot Pct_{mun\_subc}}{100,000 \cdot A_{subc}}$$

Donde:

$A_{subc}$  = área de la subcuenca (km<sup>2</sup>)

$Emisión_{subc}$  = emisión anual de nutriente por subcuenca (kg año<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>)

$Emisión_{cue\_mun}$  = emisión anual de nutriente dentro de la cuenca hidrológica del río Verde por municipio (Mg año<sup>-1</sup>)

$Pct_{mun\_subc}$  = fracción del municipio dentro de la subcuenca (%)

100,0000 = factor de conversión

Tabla 35 Distribución de municipios por subcuenca dentro de la cuenca hidrológica del río Verde

Estado	Municipio	% del municipio en subcuenca					
		El Niágara	El cuarenta	Ajojujar	San Gaspar	La Cuña	Verde
Aguascalientes	Aguascalientes	45.94	0.00	37.77	0.00	16.29	0.00
	Asientos	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Calvillo	27.74	0.00	72.26	0.00	0.00	0.00
	Cosío	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	El Llano	45.69	0.00	6.02	0.00	48.28	0.00
	Jesús María	98.85	0.00	1.15	0.00	0.00	0.00
	Pabellón de Arteaga	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Rincón de Romos	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	San Francisco de los Romo	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	San José de Gracia	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Tepezala	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Guanajuato	León	0.00	92.06	0.00	7.94	0.00	0.00
	Ocampo	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	San Felipe	0.00	99.81	0.00	0.19	0.00	0.00
Jalisco	Acatic	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	Arandas	0.00	0.00	0.00	0.21	99.79	0.00
	Cañadas de Obregón	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
	Cuquio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	Encarnación de Díaz	0.00	0.00	0.13	0.03	99.84	0.00
	Ixtlahuacan del Rio	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
	Jalostotitlán	0.00	0.00	0.00	19.23	80.77	0.00
	Lagos de Moreno	0.00	9.23	0.00	62.63	28.13	0.00
	Mexicacán	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
	Ojuelos de Jalisco	11.22	46.83	0.00	0.21	41.75	0.00
	San Diego de Alejandría	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00

Tabla 35 Distribución de municipios por subcuenca dentro de la cuenca hidrológica del río Verde

Estado	Municipio	% del municipio en subcuenca					
		El Niágara	El cuarenta	Ajojucar	San Gaspar	La Cuña	Verde
Jalisco	San Juan de los Lagos	0.00	0.00	0.00	60.07	39.93	0.00
	San Julián	0.00	0.00	0.00	99.35	0.65	0.00
	San Miguel el Alto	0.00	0.00	0.00	5.26	94.74	0.00
	Teocaltiche	0.00	0.00	6.94	0.00	93.06	0.00
	Tepatitlán de Morelos	0.00	0.00	0.00	0.00	43.72	56.28
	Unión de San Antonio	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00
	Valle de Guadalupe	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
	Villa Hidalgo	0.00	0.00	66.96	0.00	33.04	0.00
	Yahualica de González Gallo	0.00	0.00	0.00	0.00	68.93	31.07
	Zapotlanejo	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
San Luis Potosí	Villa de Arriaga	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zacatecas	Apulco	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
	Cauhtémoc	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Genaro Codina	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Guadalupe	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Loreto	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Luis Moya	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Nochistlán de Mejía	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
	Noria de Ángeles	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Ojocaliente	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Pinos	27.80	72.20	0.00	0.00	0.00	0.00
	Trancoso	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Villa García	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Villanueva	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

**Tabla 36 Emisiones de nutrientes por actividad pecuarias por subcuenca, en la cuenca hidrológica del río Verde**

Subcuenca	N (kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )	P (kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )
El Niágara	1,256.62	670.75
El Cuarenta	1,201.59	659.41
Ajojucar	2,676.66	1,501.71
San Gaspar	6,217.60	2,714.46
La Cuña	4,524.59	2,076.34
Verde	6,630.63	3,082.01

#### 4.5.5.2.2 Emisiones por uso agrícola

Para estimar las emisiones de nutrientes por uso agrícola se utilizaron concentraciones representativas para este uso reportadas para climas tropicales (Benaman et al., 1996), estas indican 1.56 mg L<sup>-1</sup> para N y 0.36 mg L<sup>-1</sup> para P. Por otro lado se consideraron las áreas correspondientes a uso agrícola y los valores de escorrentía para cada uno de los polígonos de Thiessen considerados (Figuras 16 y 18).

La ecuación para determinar la carga por uso agrícola es:

$$Emisión = \frac{C_{nutriente} \cdot Escorrentia_{poligono} \cdot Area_{poligono\_agr}}{1,000,000,000}$$

Donde:

Área<sub>poligono\_agr</sub> = área dentro del polígono de Thiessen con uso agrícola (m<sup>2</sup>)

C<sub>nutriente</sub> = concentración del nutriente en uso agrícola (mg L<sup>-1</sup>)

Emisión = emisión por uso de suelo agrícola en el polígono de Thiessen (Mg año<sup>-1</sup>)

Escorrentía<sub>poligono</sub> = escorrentía en el polígono de Thiessen (mm año<sup>-1</sup>)

1,000,000,000 = factor de conversión

Se calcularon las emisiones por uso agrícola para cada polígono de Thiessen y se agruparon por localización y parte proporcional para cada subcuenca, por último se dividió la emisión total por subcuenca entre su área total obteniendo la Tabla 37.



**Tabla 37 Emisiones de nutrientes por uso agrícola por subcuenca, en la cuenca hidrológica del río Verde**

Subcuenca	N (Mg año <sup>-1</sup> )	P (Mg año <sup>-1</sup> )	N (kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )	P (kg km <sup>-2</sup> año <sup>-1</sup> )
El Niágara	19.68	4.54	3.60	0.83
El Cuarenta	0.72	0.17	0.31	0.07
Ajojucar	21.05	4.86	25.79	5.95
San Gaspar	41.10	9.49	13.98	3.23
La Cuña	245.06	56.55	32.17	7.42
Verde	118.95	27.45	80.92	18.67

Las exportaciones de nutrientes por cultivos se desprecian ya que las concentraciones representativas consideradas incluyen estas salidas en el aprovechamiento de la planta, por lo que las emisiones son netas.

#### **4.5.5.2.3 Emisiones por fijación y depositación atmosférica de N.**

Para las cargas por fijación y depositación atmosférica de N tanto para zonas agrícolas como áreas naturales, se tomaron los valores de la cuenca Grande de Santiago publicadas por Bouwman et al. (2009). Los valores son:

- Fijación de N sobre áreas agrícolas igual a 445.30 kg km<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>
- Fijación de N sobre áreas naturales igual a 664.00 kg km<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>
- Depositación atmosférica de N sobre áreas agrícolas igual a 490.84 kg km<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>
- Depositación atmosférica de N sobre áreas naturales igual a 188.92 kg km<sup>-2</sup> año<sup>-1</sup>

## **4.6 Implementación del modelo NEWS2**

Con los datos de entrada al modelo, se llenaron las hojas de entrada al mismo y se ejecutó, obteniendo los resultados de estimación de cargas de nutrientes a la desembocadura de la cuenca.

### **4.6.1 Datos de entrada**

Los datos de entrada determinados mediante la metodología explicada en la sección “datos de entrada al modelo” deben de ser introducidos mediante tablas con formato .csv y además deben de ser agrupados de una manera predeterminada para evitar conflictos en el momento de la ejecución del modelo. Las hojas de entrada que se construyeron para la estimación de cargas de nutrientes en el sitio El Purgatorio, considerando las 6 subcuencas, se presentan en el Anexo C.

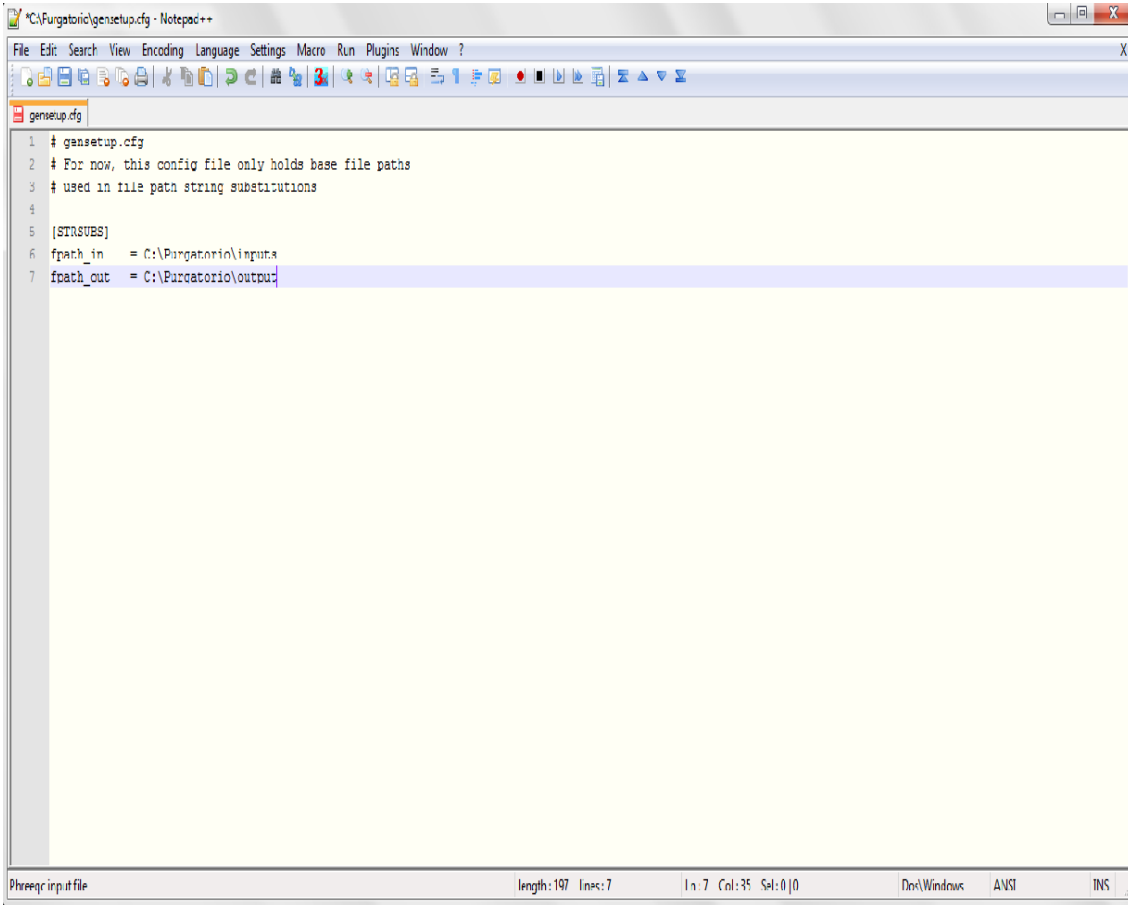
## 4.6.2 Modificación de archivos de configuración (.cfg)

Para la ejecución del modelo es necesario modificar dos archivos de configuración (.cfg), las modificaciones de estos archivos se describen a continuación.

### 4.6.2.1 General setup (gensetup.cfg)

Para realizar una corrida dentro del modelo NEWS2, es necesario incluir todas las hojas de entrada en una sola carpeta, misma que se direcciona desde el archivo gensetup.cfg.

Debido a que este archivo está en una extensión .cfg, para modificarlo es necesario hacerlo desde un editor, para este trabajo se utilizó el editor Notepad++. Para especificar la ruta de los archivos de entrada, se modificó el archivo gensetup.cfg (Figura 30).

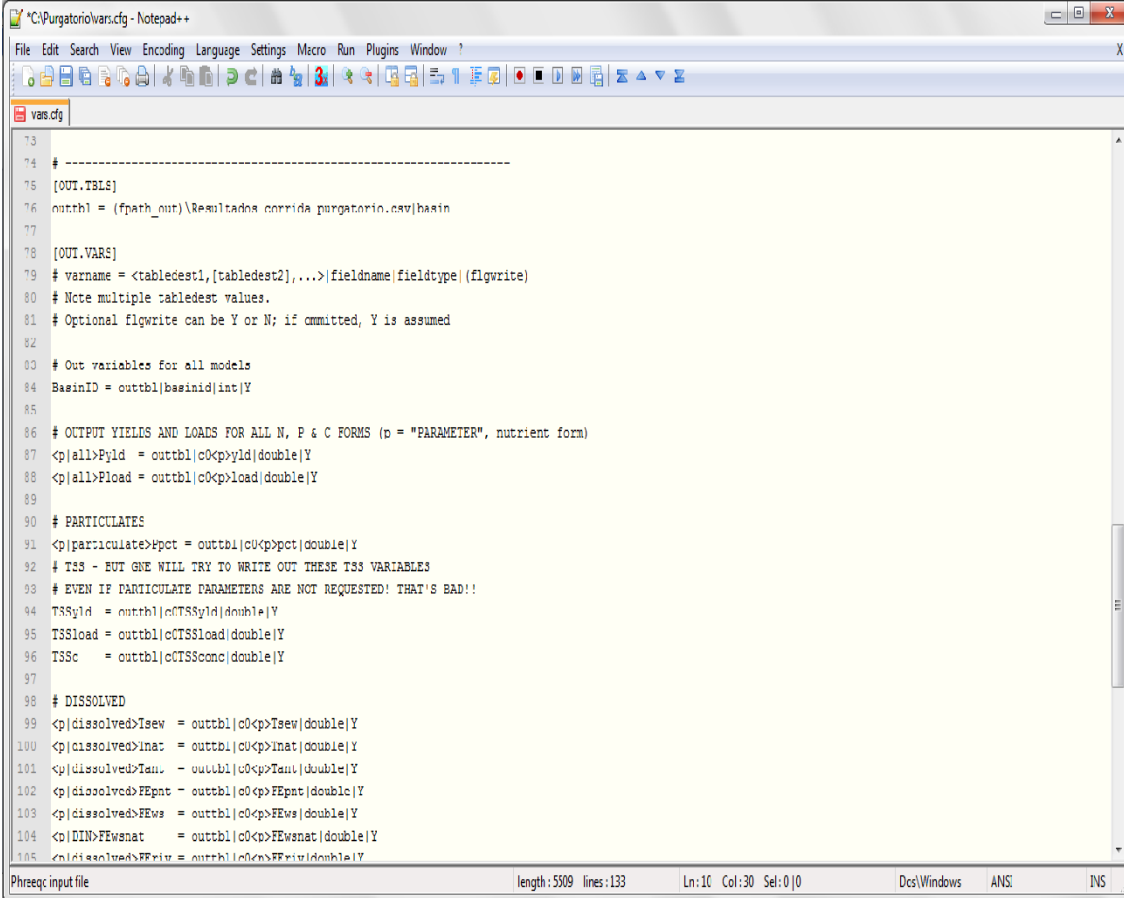


```
gensetup.cfg
1 # gensetup.cfg
2 # For now, this config file only holds base file paths
3 # used in file path string substitutions
4
5 [STASUBS]
6 fpath_in = C:\Purgatorio\input.a
7 fpath_out = C:\Purgatorio\output
```

Figura 30 Modificación archivo gensetup.cfg

#### 4.6.2.2 Variables (vars.cfg)

De manera similar a lo efectuado con el archivo gensetup.cfg, en el archivo vars.cfg se especificó el nombre del archivo que resultara de la corrida del modelo; la ruta no es necesario especificarla ya que está vinculada a el archivo gensetup.cfg (Figura 31).



```
*C:\Purgatorio\vars.cfg - Notepad++
File Edit Search View Encoding Language Settings Macro Run Plugins Window ?
vars.cfg
73
74 # -----
75 [OUT.TBLS]
76 outtbl = (fpath_out)\Resultados corrida purgatorio.csv\basin
77
78 [OUT.VARS]
79 # varname = <tabledest1,[tabledest2],...>[fieldname fieldtype| (flgwrite)
80 # Note multiple tabledest values.
81 # Optional flgwrite can be Y or N; if omitted, Y is assumed
82
83 # Out variables for all models
84 BasinID = outtbl\basinid|int|Y
85
86 # OUTPUT YIELDS AND LOADS FOR ALL N, P & C FORMS (p = "PARAMETER", nutrient form)
87 <p|all>Pyld = outtbl\c0<p>yld|double|Y
88 <p|all>Pload = outtbl\c0<p>load|double|Y
89
90 # PARTICULATES
91 <p|particulate>Ppot = outtbl\c0<p>pot|double|Y
92 # TSS - BUT GNE WILL TRY TO WRITE OUT THESE TSS VARIABLES
93 # EVEN IF PARTICULATE PARAMETERS ARE NOT REQUESTED! THAT'S BAD!!
94 TSSyld = outtbl\c0TSSyld|double|Y
95 TSSload = outtbl\c0TSSload|double|Y
96 TSSc = outtbl\c0TSSconc|double|Y
97
98 # DISSOLVED
99 <p|dissolved>Isew = outtbl\c0<p>Isew|double|Y
100 <p|dissolved>Inat = outtbl\c0<p>Inat|double|Y
101 <p|dissolved>Tan = outtbl\c0<p>Tan|double|Y
102 <p|dissolved>FEpnt = outtbl\c0<p>FEpnt|double|Y
103 <p|dissolved>FEws = outtbl\c0<p>FEws|double|Y
104 <p|DIN>FEwsnat = outtbl\c0<p>FEwsnat|double|Y
105 <p|dissolved>FEFrit = outtbl\c0<p>FEFrit|double|Y
Phreq; input file length: 5509 lines: 133 Ln: 10 Col: 30 Sel: 0 | 0 Dcs\Windows ANSI INS
```

Figura 31 Modificación archivo vars.cfg

#### 4.6.3 Corrida de modelo NEWS2

Para efectuar la corrida del modelo NEWS2, se ejecutó la pantalla símbolo del sistema que se encuentra dentro en la siguiente ruta: explorador de Windows>Todos los programas>accesorios>Símbolo del sistema. Dentro de la pantalla símbolo del sistema, se direcciono el puntero hacia la ruta donde se encuentren los archivos del modelo NEWS2. Ya que se estuvo dentro de la ruta adecuada y cuidando que la carpeta contenía todos los archivos que componen la corrida del modelo, se procedió a ejecutar el comando de ejecución: pythonglobalnews.py (Figura 32).

En la pantalla de ejecución se pudo verificar que todos los submodelos se ejecutaron adecuadamente, por lo que se extrajo la información resultante de la carpeta “output”.



```
ca. Administrador: Símbolo del sistema
Microsoft Windows [Versión 6.1.7600]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

C:\Users\Lap>cd..
C:\Users>cd..
C:\>cd purgatorio
C:\Purgatorio>python globalnews.py

***** Global NEWS modeling Environment (GNE) *****
          $Revision: 2008-1-28$
          Sun, 24 Nov 2013 15:23:36
          =====
*** Running Global NEWS Model

*** Done reading general model run configurations (cfg_simple_sections()) ***
          Time: 15:23:36
*** Done reading variable configurations (PopulateCfgVars()) ***
          Time: 15:23:36
*** Done loading input data into memory (load_var_arrays()) ***
          Time: 15:23:36

*** Ready to run models ... ***
          Nutrient forms (parameters) requested:
          DIN,DIP,DON,DOP,DOC PN,PP,POC
*** Done with dissolved model ***
          Time: 15:23:36
*** Done with particulate model ***
          Time: 15:23:36
*** Done writing output to files (write_var_arrays()) ***
          =====
***** GNE Run completed *****
          Sun, 24 Nov 2013 15:23:36

C:\Purgatorio>
```

Figura 32 Ejecución de modelo NEWS2

#### 4.6.4 Datos de salida

De acuerdo a lo especificado como ruta y nombre de archivo de salida, se generó un archivo donde están todos los resultados estimados por el modelo, estos resultados fueron obtenidos por subcuenca y divididos por las diferentes formas del nutriente. Debido a que el objetivo de esta tesis es evaluar las cargas anuales de N y P en la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde, los valores se integraron para obtener la carga total en este punto, estos resultados se pueden observar en la Tabla 38.

**Tabla 38 Resultado de corrida para el sitio El Purgatorio (Mg año<sup>-1</sup>)**

Cuenca	N inorgánico	N orgánico	N particulado	P inorgánico	P orgánico	P particulado
1	564.40	444.42	4.74	167.72	7.40	2.83
2	51.40	25.85	2.79	6.21	0.97	1.65
3	103.96	30.14	3.48	5.88	1.78	1.61
4	413.18	124.01	9.04	32.46	6.53	4.81
5	1171.51	298.99	39.20	49.66	22.59	18.13
6	543.78	110.65	8.44	25.81	8.18	3.60
<b>TOTAL</b>	<b>2 848.24</b>	<b>1 034.07</b>	<b>67.70</b>	<b>287.74</b>	<b>47.46</b>	<b>32.64</b>
	<b>3 950.01</b>			<b>367.83</b>		
	<b>N</b>			<b>P</b>		

#### 4.7 Complementación del inventario de emisión de nutrientes

Con el fin de unificar criterios y poder hacer comparables las emisiones del inventario de generación de nutrientes y los datos obtenidos por la modelación, se realizó una complementación del inventario existente con las nuevas consideraciones hechas en este trabajo (Tabla 39).

Las nuevas consideraciones con respecto al inventario existente consistieron en:

- Modificación de la estimación de emisiones de N y P por aguas residuales municipales
- Modificación de la estimación de emisiones de N y P por actividades pecuarias
- Consideración de emisiones de N producidas por la fijación y la depositación atmosférica

Con respecto a la estimación de emisiones de nutrientes por aguas residuales municipales se consideró toda la población que se encuentra dentro de la cuenca, actualizada con el último censo de población y vivienda efectuado (INEGI, 2010); en la modificación de la estimación de emisiones de nutrientes por excreta animal, se detalló el cálculo para la obtención del peso representativo por animal, así como las concentraciones consideradas como representativas para esta actividad, además, se estimó la parte del inventario ganadero que se consideró más probable se encuentre dentro de la cuenca hidrológica del río Verde. Las emisiones por fijación y depositación atmosférica de N, no estaban consideradas en el inventario existente con anterioridad.

**Tabla 39 Complementación de inventario de emisiones de nutrientes en la cuenca hidrológica del río Verde (Mg año<sup>-1</sup>)**

	<b>N</b>	<b>P</b>
Aguas residuales municipales	5,060	1,075
Industrias	34*	---*
Escurrimiento urbano	11*	2*
Escurrimiento agrícola	447*	103*
Escurrimiento bosque	67*	5*
Escurrimiento matorral	17*	<1*
Escurrimiento pastizal	382*	30*
Uso pecuario	74,335	34,750
Fijación	11,917	---
Depositación atmosférica	6,359	---
<i>Total</i>	<i>98,629</i>	<i>35,966</i>

\*(Corzo-Juárez, 2009)

#### 4.8 Cálculo de carga máxima admisible de nutrientes

El objetivo que persigue este trabajo es determinar las cargas que permitirían que la presa El Purgatorio se mantenga en un estado mesotrófico. Los límites de estado trófico que se utilizaron para calcular las cargas máximas admisibles de nutrientes para mantener el estado mesotrófico del cuerpo de agua (CMAN) fueron: para N los establecidos por OECD (1982) en su sistema abierto de clasificación trófica para lagos en climas templados mientras que para P los establecidos por CEPIS (2001) para lagos en climas tropicales. La utilización de dos criterios se debe a que aunque CEPIS (2001) se adecua mejor a las condiciones presentadas en la zona de estudio (clima y región), solo establece límites para P más no para N. La CMAN que soporta el cuerpo de agua para mantener el estado mesotrófico se calcula con la siguiente ecuación.

$$CMAN = \frac{Conc_{nut} \cdot Gasto}{1,000,000}$$

Donde:

CMAN = carga máxima admisible de nutriente para mantener el cuerpo de agua en estado mesotrófico (Mg año<sup>-1</sup>)

Conc<sub>nut</sub> = concentración límite de nutriente para mantener el estado mesotrófico (mg L<sup>-1</sup>)

Gasto = gasto de escorrimento estimado en la desembocadura de la cuenca (m<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>)

1,000,000 = factor de conversión

Los límites de concentraciones establecidos para clasificar el estado trófico de un cuerpo de agua, no son un solo valor sino un rango de valores. Se tomaron los valores medios del rango límite para mantener el estado mesotrófico y no el límite máximo o mínimo debido a que los gastos y concentraciones con los cuales se estimaron las cargas son promedios anuales y estacionales, en los cuales encontramos tanto variaciones mensuales como diarias. De esta manera se permitiría que el cuerpo de agua tenga capacidad para amortiguar (hasta cierto límite) las variaciones en concentraciones y gasto durante el periodo anual y que no salga del estado mesotrófico. Los valores de concentración para mantener el estado mesotrófico considerados en la presa El Purgatorio serán:

- 753  $\mu\text{g L}^{-1}$  para N (Tabla 2) y
- 39.6  $\mu\text{g L}^{-1}$  para P (Tabla 3)

El gasto anual estimado a partir del análisis de gastos mensuales de escurrimiento en la estación El Purgatorio es de  $5.67 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ . Calculando las CMAN obtenemos:

- 427  $\text{Mg año}^{-1}$  para N y
- 22  $\text{Mg año}^{-1}$  para P

#### 4.9 Formulación de escenarios de reducción de cargas

Para evaluar cuál sería el comportamiento de la carga de nutrientes que llegarían al sitio El Purgatorio bajo diferentes condiciones de emisiones de nutrientes, se hicieron corridas del modelo modificando las hojas de entrada y por lo tanto las condiciones de generación de nutrientes en la cuenca bajo las siguientes consideraciones:

Para evaluar reducciones por diferentes fuentes emisoras

- Reducción de 25, 50, 75 y 90 % de las emisiones por aguas residuales municipales en toda la cuenca hidrológica del río Verde
- Reducción de 25, 50, 75 y 90 % de las emisiones por uso agrícola en toda la cuenca hidrológica del río Verde
- Reducción de 25, 50, 75 y 90 % de las emisiones por actividades pecuarias en toda la cuenca hidrológica del río Verde
- Reducción combinada de 90 % de las emisiones por aguas residuales municipales y 25, 50, 75 y 90 % de las emisiones por actividades pecuarias en toda la cuenca hidrológica del río Verde

Para evaluar las reducciones de acuerdo a la localización de las emisiones

- Reducción combinada de 90 % de las emisiones por aguas residuales municipales y 90 % de las emisiones por actividades pecuarias en cada una de las seis subcuencas por separado
- Reducción de 100.99 Mg año<sup>-1</sup> de N y 21.46 Mg año<sup>-1</sup> de P en emisiones por aguas residuales municipales y 2,184.80 Mg año<sup>-1</sup> de N y 1,225.76 Mg año<sup>-1</sup> de P en emisiones por actividades pecuarias (máximas cargas posibles para que la reducción sea factible en todas las subcuencas) en cada una de las seis subcuencas por separado.

Para cada escenario, se modificaron las hojas de entrada al modelo NEWS2 con las consideraciones y la metodología descrita para la estimación de cargas de nutrientes por modelación en la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde. Se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 40.

**Tabla 40 Cargas de nutrientes para los escenarios evaluados en la cuenca hidrológica del río Verde**

No.	Reducción de emisiones	Carga estimada (Mg año <sup>-1</sup> )	
		N	P
1	25% por aguas residuales	3,550	297
2	50% por aguas residuales	3,150	225
3	75% por aguas residuales	2,750	154
4	90% por aguas residuales	2,510	111
5	25% por uso agrícola	3,947	368
6	50% por uso agrícola	3,944	368
7	75% por uso agrícola	3,942	368
8	90% por uso agrícola	3,940	368
9	25% por actividades pecuarias	3,584	359
10	50% por actividades pecuarias	3,218	350
11	75% por actividades pecuarias	2,852	342
12	90% por actividades pecuarias	2,632	337
13	90% por aguas residuales y 25% por actividades pecuarias	2,143	103
14	90% por aguas residuales y 50% por actividades pecuarias	1,777	94
15	90% por aguas residuales y 75% por actividades pecuarias	1,411	85
16	90% por aguas residuales y 90% por actividades pecuarias	1,192	80
17	90% por aguas residuales y 90% por actividades pecuarias en la subcuenca 1 (Niágara)	3,067	211
18	90% por aguas residuales y 90% por actividades pecuarias en la subcuenca 2 (El Cuarenta)	3,905	362
19	90% por aguas residuales y 90% por actividades pecuarias en la subcuenca 3 (Ajojucar)	3,873	362
20	90% por aguas residuales y 90% por actividades pecuarias en la subcuenca 4 (San Gaspar)	3,560	334
21	90% por aguas residuales y 90% por actividades pecuarias en la subcuenca 5 (La Cuña)	3,043	311
22	90% por aguas residuales y 90% por actividades pecuarias en la subcuenca 6 (Verde)	3,493	340
23	Cantidad determinada* de emisiones en la subcuenca 1 (Niágara)	3,914	362
24	Cantidad determinada* de emisiones en la subcuenca 2 (El Cuarenta)	3,907	362
25	Cantidad determinada* de emisiones en la subcuenca 3 (Ajojucar)	3,864	361
26	Cantidad determinada* de emisiones en la subcuenca 4 (San Gaspar)	3,888	361
27	Cantidad determinada* de emisiones en la subcuenca 5 (La Cuña)	3,870	361
28	Cantidad determinada* de emisiones en la subcuenca 6 (Verde)	3,832	360

\* Cantidad determinada igual a 100.99 Mg año<sup>-1</sup> de N y 21.46 Mg año<sup>-1</sup> de P en emisiones por aguas residuales municipales y 2,184.80 Mg año<sup>-1</sup> de N y 1,225.76 Mg año<sup>-1</sup> de P en emisiones por actividades pecuarias



#### 4.10 Determinación de la atenuación natural

Con la modelación de las cargas de nutrientes a la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde y la evaluación de los diferentes escenarios, es posible determinar la atenuación natural que sucede en la cuenca bajo diferentes condiciones, para este trabajo se determinó cual es la atenuación natural que se presenta en la cuenca hidrológica de manera general, así como la atenuación natural que se presenta para los nutrientes emitidos por las diferentes fuentes generadoras en particular. Para la determinación de la atenuación natural en toda la cuenca se emplea la siguiente ecuación.

$$AN_{TC} = \left(1 - \frac{Carga_{des}}{Emisión}\right) \cdot 100$$

Donde:

$AN_{TC}$  = atenuación natural de nutrientes que se presenta en toda la cuenca considerando todas las fuentes emisoras (%)

$Carga_{des}$  = carga de nutriente estimada por modelación en la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde considerando todas las fuentes emisoras ( $Mg \text{ año}^{-1}$ )

$Emisión$  = emisiones de nutriente en la cuenca hidrológica del río Verde considerando todas las fuentes emisoras ( $Mg \text{ año}^{-1}$ )

100 = factor de conversión

Para la determinación de la atenuación natural por tipo de actividad que emite nutrientes, se utilizaron los resultados de la evaluación de reducciones de nutrientes para los escenarios establecidos por tipo de fuente, con la siguiente ecuación.

$$AN_{Fuente} = \left(1 - \frac{Red_{carga_{des}}}{Red_{emisión}}\right) \cdot 100$$

$AN_{Fuente}$  = atenuación natural de nutrientes que se presenta para las emisiones generadas por un tipo de fuente específica, en toda la cuenca (%)

$Red_{carga_{des}}$  = reducción en la carga de nutrientes estimada por modelación en la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde, considerando un escenario de reducción de nutrientes para un tipo de fuente determinado, en toda la cuenca hidrológica ( $Mg \text{ año}^{-1}$ )

$Red_{emisión}$  = reducción en la emisión de nutrientes en la cuenca hidrológica del río Verde considerando un escenario de reducción de nutrientes para un tipo de fuente determinado, en toda la cuenca hidrológica ( $Mg \text{ año}^{-1}$ )

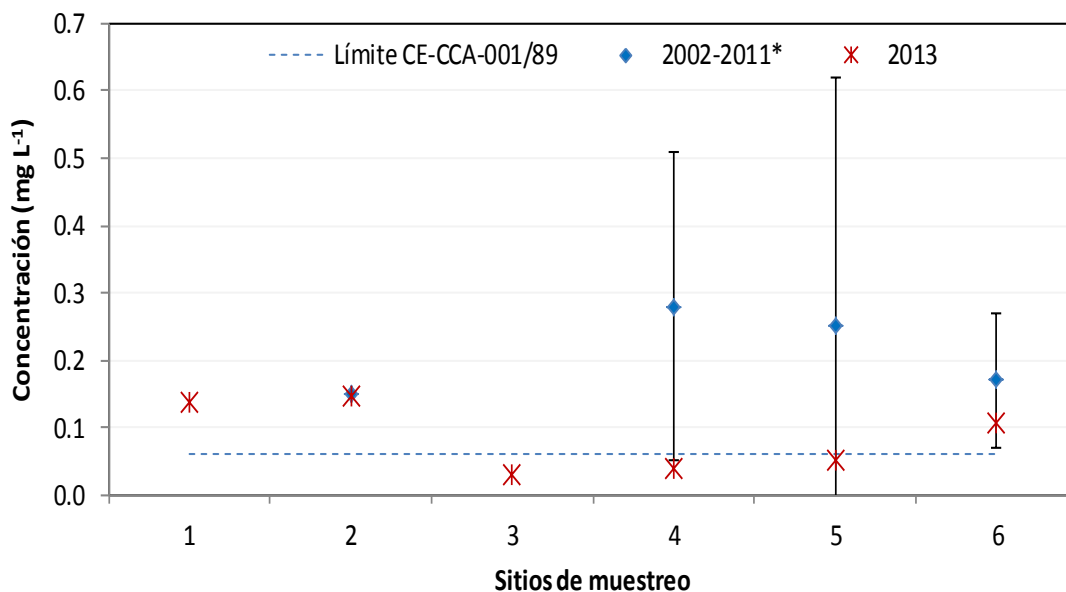
## 5 Resultados y discusión

Con el fin de alcanzar los objetivos y las metas de esta tesis, a continuación se presentan y se discuten los resultados referentes a la determinación y validación de cargas de nutrientes en dos sitios sobre el río Verde, su relación con las CMAN, la evaluación de diferentes escenarios para la reducción de cargas de nutrientes y la determinación de la atenuación natural en la cuenca hidrológica del río Verde.

### 5.1 Concentraciones de nutrientes

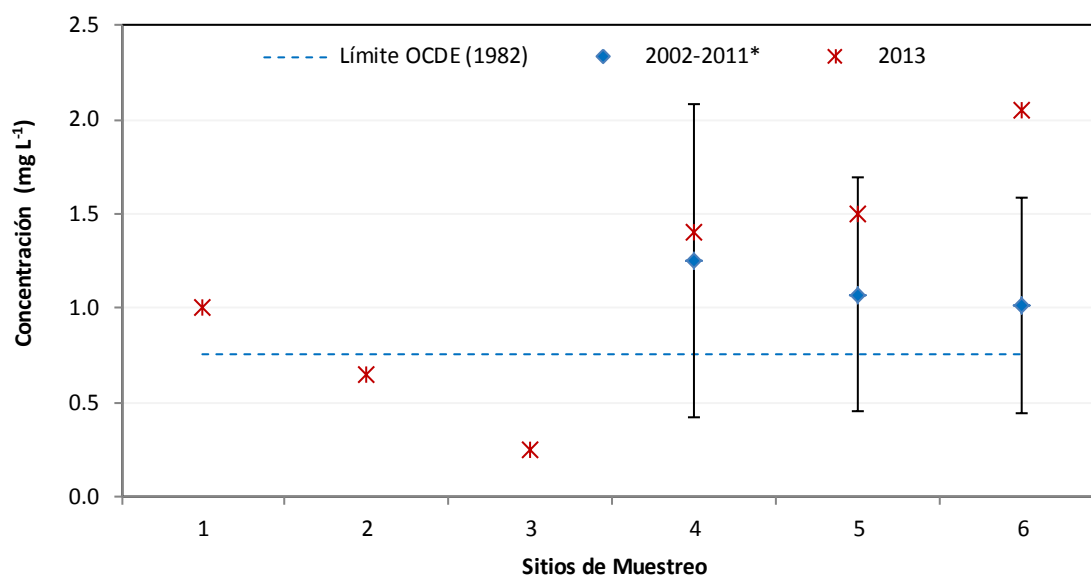
Para evaluar los resultados de los monitoreos de N y P realizados con anterioridad y poder utilizar estos datos en la validación de modelación de esta tesis, se comparan los resultados obtenidos durante épocas de estiaje con los resultados obtenidos en el muestreo realizado entre el 8 y 10 de mayo del 2013 en diferentes sitios sobre el río Verde. En las Figuras 33, 34, 35 y 36 se presentan estas comparaciones.

Aunque se observan altas variaciones en las concentraciones medidas en el río para un mismo sitio, las concentraciones medidas en el muestreo de mayo del 2013 se encuentran dentro del rango de concentraciones anteriormente reportadas. Por ello, en este trabajo se utilizaron los datos reportados en los estudios anteriores.



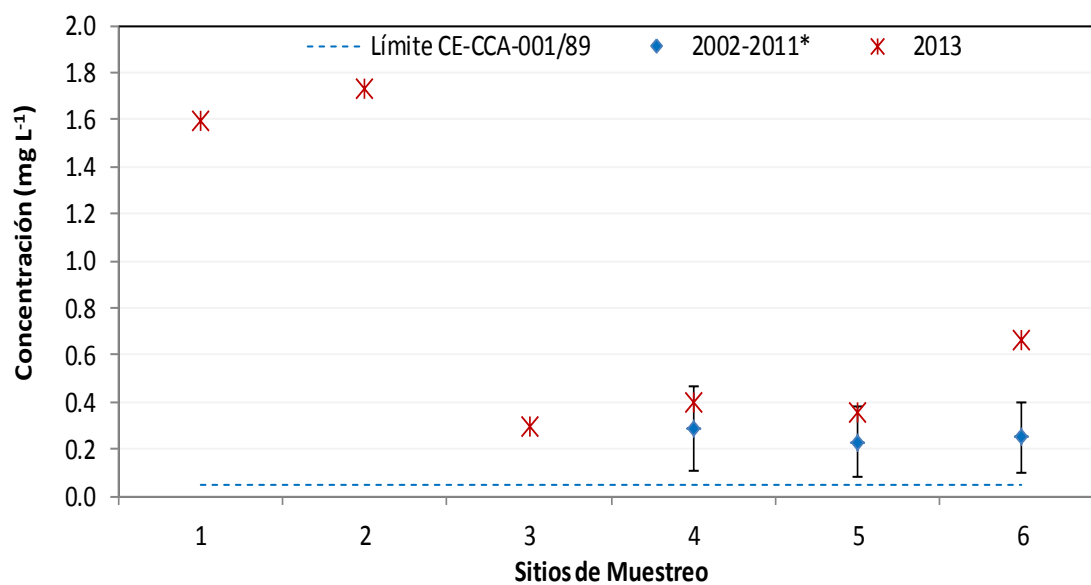
Sitios de muestreo: 1.- El Zapotillo (aguas arriba) 2.- El Zapotillo (sitio de construcción) 3.- El Zapotillo (agua subterránea) 4.- La Cuña 5.- Las Huertas 6.- El Purgatorio. \*calculados con datos de AyMA Ingeniería y Consultoría (2003 y 2007) y Aqua Innova Consultoría e Ingeniería (2011)

Figura 33 Concentraciones de N-NH<sub>4</sub> medidas en el río Verde. Época de estiaje.



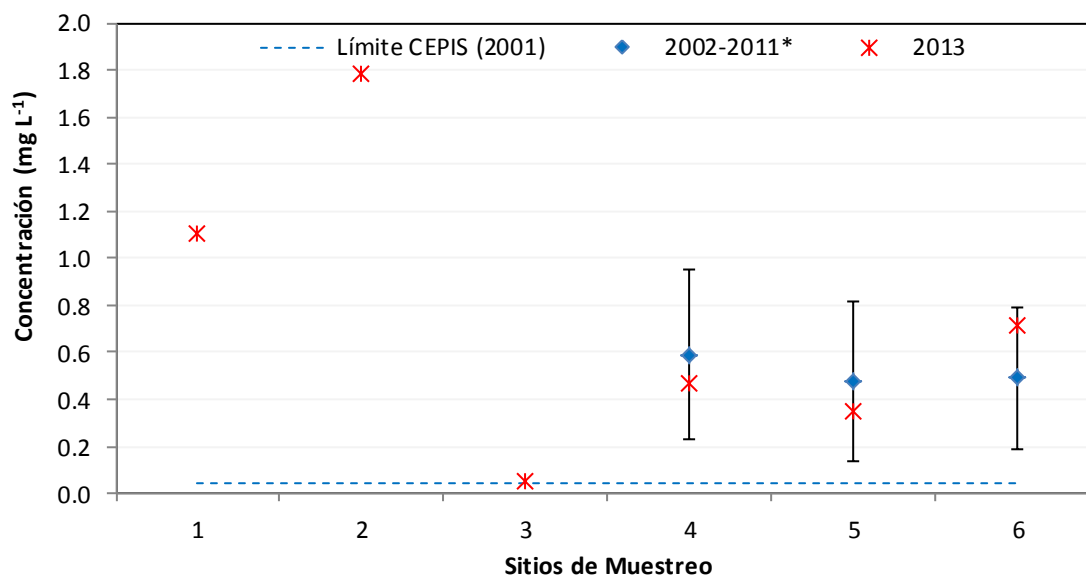
Sitios de muestreo: 1.- El Zapotillo (aguas arriba) 2.- El Zapotillo (sitio de construcción) 3.- El Zapotillo (agua subterránea) 4.- La Cuña 5.- Las Huertas 6.- El Purgatorio. \*calculados con datos de AyMA Ingeniería y Consultoría ( 2003 y 2007) y Aqua Innova Consultoría e Ingeniería ( 2011)

Figura 34 Concentraciones de N medidas en el río Verde. Época de estiaje.



Sitios de muestreo: 1.- El Zapotillo (aguas arriba) 2.- El Zapotillo (sitio de construcción) 3.- El Zapotillo (agua subterránea) 4.- La Cuña 5.- Las Huertas 6.- El Purgatorio. \*calculados con datos de AyMA Ingeniería y Consultoría ( 2003 y 2007) y Aqua Innova Consultoría e Ingeniería ( 2011)

Figura 35 Concentraciones de P-PO<sub>4</sub> medidas en el río Verde. Época de estiaje.



Sitios de muestreo: 1.- El Zapotillo (aguas arriba) 2.- El Zapotillo (sitio de construcción) 3.- El Zapotillo (agua subterránea) 4.- La Cuña 5.- Las Huertas 6.- El Purgatorio. \*calculados con datos de AyMA Ingeniería y Consultoría ( 2003 y 2007) y Aqua Innova Consultoría e Ingeniería ( 2011)

**Figura 36 Concentraciones de P medidas en el río Verde. Época de estiaje.**

Se encontró que la concentración de N tiene una tendencia a aumentar de aguas arriba hacia aguas abajo sobre el cauce del río, lo que sugiere una acumulación del nutriente. Lo contrario del N sucede con el P, lo que puede atribuirse a la retención del nutriente durante su movilización en el río.

En el caso de ambos nutrientes y exceptuando las condiciones presentadas en el agua subterránea, tanto N como P se encuentran por arriba de los límites de eutroficación establecidos (OECD, 1982; CEPIS, 2001). La situación más crítica se presenta para P, que rebasa hasta 50 veces este límite. En el caso del sitio El Purgatorio, la concentración se encuentra 18 veces por arriba de su límite, mientras que N está 2.7 veces por arriba de su límite.

El N-NH<sub>4</sub> y el P-PO<sub>4</sub> se encuentran por arriba de los límites establecidos en los criterios ecológicos de calidad del agua para protección de la vida acuática (SEDUE, 1989) en todos los sitios, exceptuando el N amoniacal en el agua subterránea en el sitio el Zapotillo.

## 5.2 Fuentes generadoras de nutrientes

En la Tabla 41 se presenta la emisión de nutrientes por diferentes fuentes en la cuenca hidrológica del río Verde.

**Tabla 41 Emisión de nutrientes por fuentes generadoras, en la cuenca hidrológica del río Verde**

Tipo de fuente	Fuente	N		P	
		(Mg año <sup>-1</sup> )	%	(Mg año <sup>-1</sup> )	%
Puntuales	Aguas residuales municipales	5,060	5.13	1,075	2.99
	Industrias	34*	0.03	---	---
	<i>Subtotal</i>	<i>5,094</i>	<i>5.16</i>	<i>1,075</i>	<i>2.99</i>
Difusas	Escurrimiento urbano	11*	0.01	2*	0.01
	Escurrimiento agrícola	447*	0.45	103*	0.29
	Escurrimiento bosque	67*	0.07	5*	0.01
	Escurrimiento matorral	17*	0.02	<1*	<0.01
	Escurrimiento pastizal	382*	0.39	30*	0.08
	Uso pecuario	74,335	75.37	34,750	96.62
	Fijación	11,917	12.08	---	---
	Depositación atmosférica	6,359	6.45	---	---
	<i>Subtotal</i>	<i>93,535</i>	<i>94.84</i>	<i>34,891</i>	<i>97.01</i>
<i>Total</i>	<i>98,629</i>	<i>100.00</i>	<i>35,966</i>	<i>100.00</i>	

\* (Corzo-Juárez, 2009)

Se encontró que la principal aportación en la emisión de nutrientes en la cuenca hidrológica del río Verde proviene de las actividades de uso pecuario, con 75.37% para N y 96.62% para P, seguida por las aportaciones por fijación, depositación atmosférica y de aguas residuales municipales para N y, aguas residuales municipales y escurrimiento agrícola para P.

Las emisiones por uso pecuario que son las predominantes para ambos nutrientes, se componen de dos grandes grupos, emisiones por actividades pecuarias bovinas y por actividades pecuarias porcinas. Las aportaciones de estas fuentes se presentan en la Tabla 42.

**Tabla 42 Emisión de nutrientes por actividad pecuaria en la cuenca hidrológica del río Verde**

Fuente	N		P <sub>T</sub>	
	(Mg año <sup>-1</sup> )	%	(Mg año <sup>-1</sup> )	%
Actividad pecuaria bovina	56,817	76	30,195	87
Actividad pecuaria porcina	17,518	24	4,555	13
Total	74,335	100	34,750	100

Se puede observar que dentro de las emisiones de nutrientes generadas por actividades pecuarias, las bovinas predominan sobre las porcinas. Sin embargo, la emisión de nutrientes no es el único factor que impacta en las cargas de nutrientes a un cuerpo de agua; otro factor que se debe considerar son los efectos de la atenuación natural en la cuenca hidrológica.

### 5.3 Cargas de nutrientes

Se estimaron las cargas de nutrientes por análisis de los datos de monitoreo y por modelación con el modelo NEWS2. Para efectos de validación de los resultados obtenidos, se desarrollaron ambos métodos tanto en el sitio El Purgatorio como en el sitio La Cuña, que se encuentra aguas arriba sobre el cauce del río Verde. Los resultados de estas estimaciones se presentan en las Figuras 37 y 38. Para el caso del sitio El Purgatorio se presentan también las emisiones generadas.

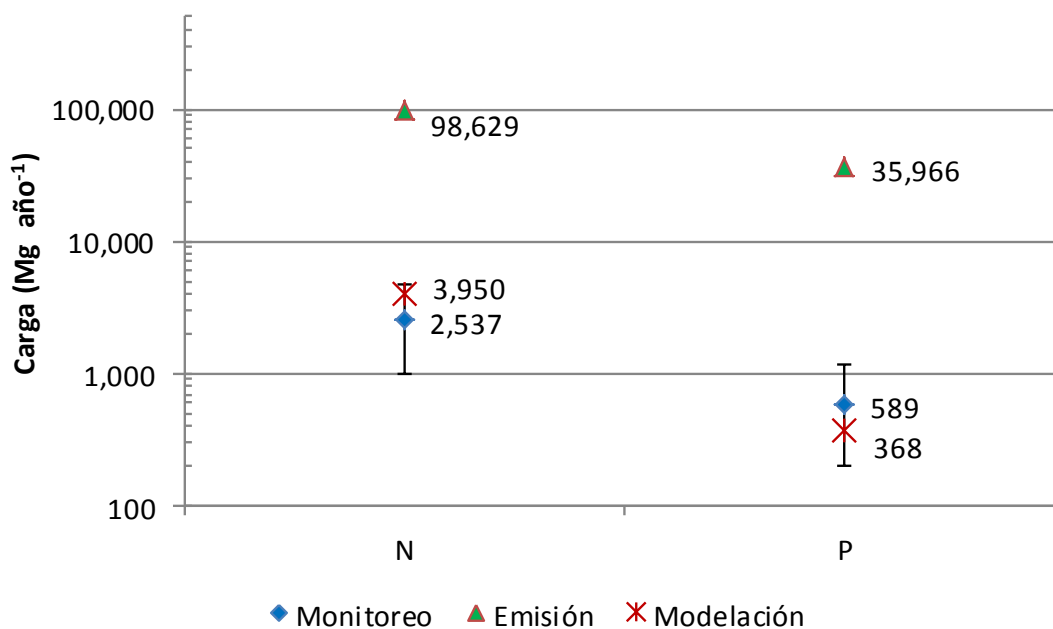
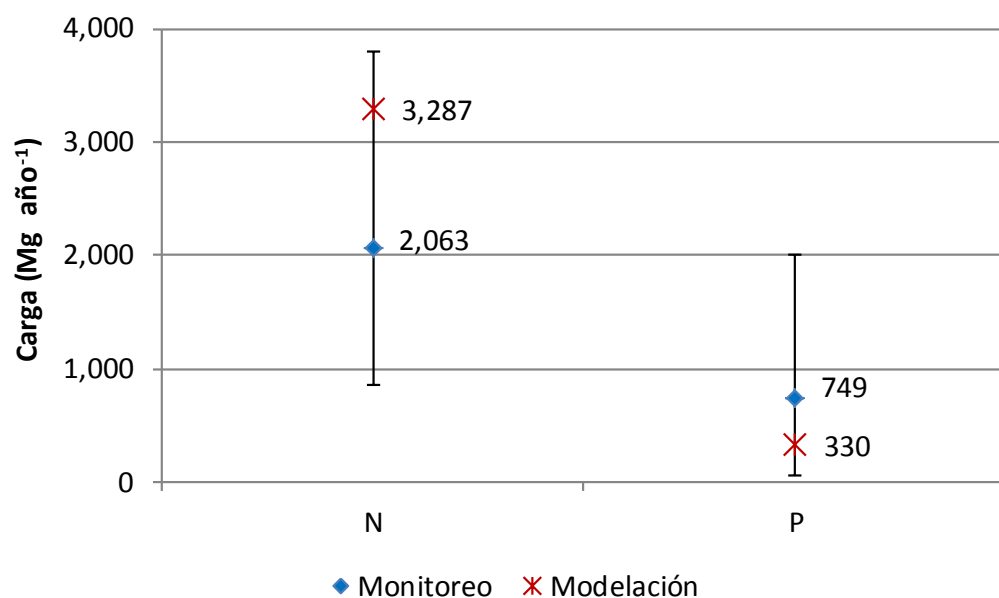


Figura 37 Comparación de cargas de nutrientes en el sitio El Purgatorio



**Figura 38 Comparación de cargas de nutrientes en el sitio La Cuña**

Se observa que los resultados obtenidos por modelación están en ambos sitios y para ambos nutrientes dentro del rango que arroja el análisis de los datos de monitoreo. Por lo anterior, se valida el uso del inventario de fuentes de nutrientes en combinación con la modelación (modelo NEWS2) para evaluar las cargas de nutrientes en la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde y se justifica el uso de esta herramienta para evaluar escenarios de reducción de cargas.

#### 5.4 Cargas máximas admisibles de nutrientes

De acuerdo con los límites permisibles y el escurrimiento anual en el sitio El Purgatorio, las cargas de nutrientes que podría recibir la presa para mantener el estado mesotrófico, son de 427 Mg año<sup>-1</sup> para N y 22 Mg año<sup>-1</sup> para P, mientras que las cargas estimadas por la modelación, son de 3,950 Mg año<sup>-1</sup> para N y 368 Mg año<sup>-1</sup> para P. Con estas cargas de nutrientes y sin considerar procesos que retengan o liberen nutrientes de los sedimentos de la presa, el agua dentro del embalse se encontraría en un estado hipereutrófico para ambos nutrientes.

Las cargas estimadas están 9 veces arriba de lo admisible para N y 16 veces arriba para P si se quiere mantener la presa en estado mesotrófico. Esto sugiere que es urgente implementar acciones de reducción de cargas de nutrientes. Estas acciones deben asegurar reducciones de aproximadamente 89% para N y 94 % para P de las cargas que llegarían a la presa.

## 5.5 Escenarios para reducción de carga de nutrientes

Para mitigar la problemática de cargas de nutrientes en la presa El Purgatorio, se evaluó la reducción en los principales generadores de nutrientes (actividades pecuarias, aguas residuales municipales y uso agrícola del suelo).

Se evaluaron 16 escenarios con diferente reducción de nutrientes en las fuentes y 12 escenarios referentes a la influencia de la localización de las fuentes en la cuenca hidrológica. Los resultados de la evaluación de escenarios se presentan en la Tabla 43 y las Figuras 39 y 40. Se observa que las reducciones en las emisiones de nutrientes por aguas residuales (escenarios 1-4) y reducciones en emisiones pecuarias (escenarios 9-12) son los que presentan mayor eficacia en la reducción de la carga de N en el sitio El Purgatorio, presentando además rangos de reducciones similares para el mismo porcentaje de reducción en las emisiones, mientras que para P, las reducciones de la carga en El Purgatorio son alrededor de 8 veces mayores para la reducción de emisiones por aguas residuales que para las referentes a la actividad pecuaria. Para reducciones de emisiones debido al uso agrícola (escenarios 5-8) las reducciones son poco significativas.

Aunque las emisiones por aguas residuales municipales son mucho menores que las correspondientes a actividades pecuarias, las aguas residuales presentan los mayores efectos en la reducción de cargas de nutrientes en la desembocadura de la cuenca hidrológica debido a que su relación reducción en carga/reducción en emisión, es 16 veces mayor para N y 265 veces mayor para P que las presentadas para actividades pecuarias. Lo anterior sucede debido a que la atenuación natural que se lleva a cabo en la cuenca hidrológica para cada tipo de emisión depende de la forma en la que se encuentra el nutriente y la forma en la que se moviliza y se retiene. Una de las principales características que explican porque la atenuación natural en los nutrientes originados por actividades pecuarias es mayor con respecto a los generados por aguas residuales municipales es la forma en que son descargados en la cuenca, las aguas residuales municipales son descargadas directamente a la red de río o mediante drenaje que lo conducen hacia el por lo que para estas cargas de nutrientes la atenuación solo sucede en el agua, mientras que para actividades pecuarias sucede en agua y suelo.

También se evaluaron las reducciones en cargas de nutrientes con combinaciones en reducción de emisiones por aguas residuales municipales y por actividades pecuarias; estos escenarios son los que resultan más eficientes en la reducción de las cargas de nutrientes. Por ejemplo, para la combinación de reducción 90% de emisión de nutrientes en aguas residuales y 90% en actividades pecuarias, las cargas resultantes en el sitio El Purgatorio son de 1,192 Mg año<sup>-1</sup> para N y 80 Mg año<sup>-1</sup> para P. Estas reducciones no permitirían alcanzar la CMAN.

En la evaluación de la reducción de cargas de nutrientes por subcuenca, se encontró que para los mismos porcentajes de reducción en las emisiones de cada subcuenca, se obtienen reducciones en los siguientes órdenes:





Para N: subcuenca La Cuña > El Niágara > Verde > San Gaspar > Ajojuar > El Cuarenta

Para P: subcuenca El Niágara > La Cuña > San Gaspar > Verde > Ajojuar > El Cuarenta

Con el análisis de estos resultados se encontró que la principal variable que influye en la reducción de cargas para estos escenarios (escenarios 17-22) en el sitio de El Purgatorio, es el tamaño de la subcuenca.

Para evaluar la variación en atenuación natural de los nutrientes, que se presenta debido a la localización de las subcuencas, se eliminó el efecto del tamaño de la cuenca (y la cantidad de nutrientes emitidos en la misma), mediante la evaluación de escenarios donde para cada subcuenca se supuso una igual cantidad de reducción de nutrientes emitidos, independientemente de lo generado en cada una. Se encontró que las relaciones carga reducida/emisión reducida (%), varía entre 1.56 - 5.16% para N y 0.66 - 0.46 % para P, presentándose los valores más altos para las subcuencas más cercanas a la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde, mientras que los valores más bajos se presentaron para las subcuencas más alejadas. Lo anterior se explica debido a la mayor atenuación natural que ocurre cuando los nutrientes se transportan por mayores distancias.

Los escenarios evaluados no permiten alcanzar las CMAN en la desembocadura de la cuenca hidrológica del río Verde. Sin embargo, si se considera una retención de nutrientes en la presa El Purgatorio semejante a la reportada para otros cuerpos de agua (Márquez-Pacheco et al., 2013; Ramírez-Zierold et al, 2010), la presa podría soportar mayores cargas de nutrientes. Las cargas máximas admisibles de nutrientes considerando retención por sedimentación en la presa El Purgatorio (CMAN-R) serán 628 Mg año<sup>-1</sup> para N y 88 Mg año<sup>-1</sup> para P. Para esta consideración, los escenarios 15 y 16, que combinan reducciones en emisión de nutrientes por aguas residuales y actividades pecuarias, resultarían efectivos para alcanzar la CMAN-R para P. Estas acciones tienen que ser aplicadas en toda la cuenca ya que la implementación por separado en solo algunas subcuencas no sería suficiente.

Tabla 43 Resultados de la estimación de cargas y reducciones de nutrientes para los escenarios evaluados (Tabla 40)

Escenario	Carga (Mg año <sup>-1</sup> )		Reducción de carga (Mg año <sup>-1</sup> )		Reducción en emisión (Mg año <sup>-1</sup> )		Relación reducción carga/ reducción emisión (%)	
	N	P	N	P	N	P	N	P
1	3,549.88	296.59	400.13	71.24	1,265.11	268.84	31.63	26.50
2	3,149.74	225.35	800.26	142.48	2,530.23	537.67	31.63	26.50
3	2,749.61	154.11	1,200.40	213.73	3,795.34	806.51	31.63	26.50
4	2,509.53	111.36	1,440.47	256.47	4,554.41	967.81	31.63	26.50
5	3,947.23	367.80	2.78	0.03	111.64	25.75	2.49	0.13
6	3,944.45	367.77	5.55	0.07	223.28	51.51	2.49	0.13
7	3,941.68	367.73	8.33	0.10	334.91	77.26	2.49	0.13
8	3,940.01	367.71	9.99	0.12	401.90	92.72	2.49	0.13
9	3,583.97	359.16	366.04	8.67	18,583.63	8,687.55	1.97	0.10
10	3,217.93	350.48	732.08	17.35	37,167.25	17,375.11	1.97	0.10
11	2,851.89	341.81	1,098.11	26.02	55,750.88	26,062.66	1.97	0.10
12	2,632.27	336.61	1,317.74	31.23	66,901.06	31,275.19	1.97	0.10
13	2,143.49	102.69	1,806.51	265.14	23,138.03	9,655.37	7.81	2.75
14	1,777.45	94.01	2,172.56	273.82	41,721.66	18,342.92	5.21	1.49
15	1,411.41	85.34	2,538.59	282.49	60,305.29	27,030.47	4.21	1.05
16	1,191.79	80.14	2,758.22	287.70	71,455.46	32,243.01	3.86	0.89
17	3,067.46	210.74	882.55	157.10	8,962.66	3,889.12	9.85	4.04
18	3,905.01	361.83	45.00	6.01	2,619.25	1,402.84	1.72	0.43
19	3,872.53	361.67	77.47	6.17	2,057.21	1,122.50	3.77	0.55
20	3,560.13	334.48	389.88	33.36	16,967.71	7,291.01	2.30	0.46
21	3,043.23	311.04	906.78	56.80	31,720.82	14,384.42	2.86	0.39
22	3,493.46	339.56	456.54	28.27	9,127.82	4,153.11	5.00	0.68
23	3,914.36	362.06	35.65	5.78	2,285.79	1,247.22	1.56	0.46
24	3,907.05	361.95	42.95	5.88	2,285.79	1,247.22	1.88	0.47
25	3,863.92	360.98	86.08	6.85	2,285.79	1,247.22	3.77	0.55
26	3,887.88	361.46	62.13	6.37	2,285.79	1,247.22	2.72	0.51
27	3,870.31	360.65	79.69	7.19	2,285.79	1,247.22	3.49	0.58
28	3,832.06	359.66	117.94	8.17	2,285.79	1,247.22	5.16	0.66

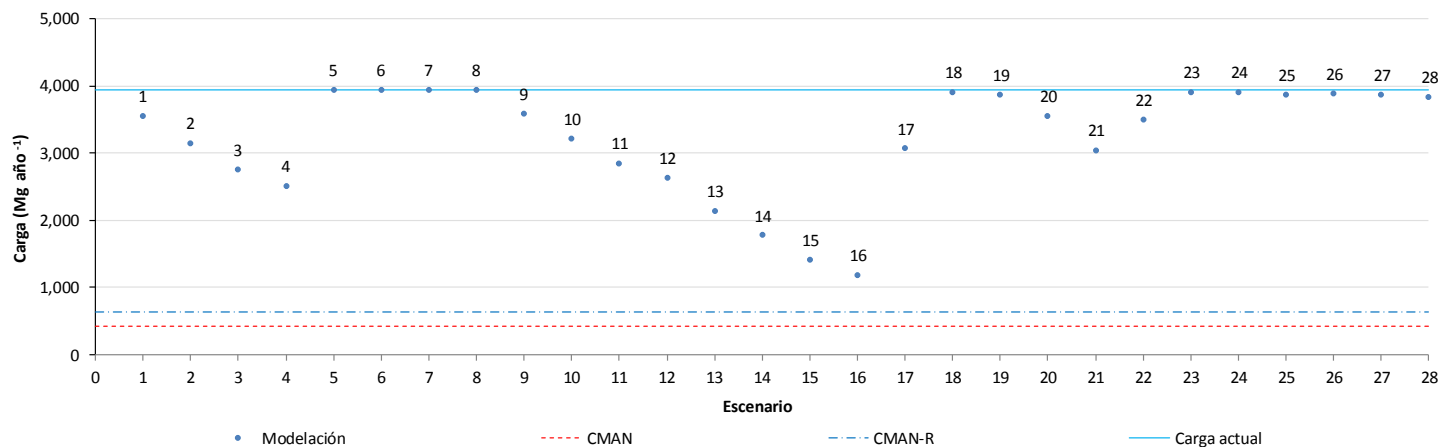


Figura 39 Cargas de N estimadas en el sitio El Purgatorio para los escenarios evaluados y comparación con la CMAN y la CMAN-R

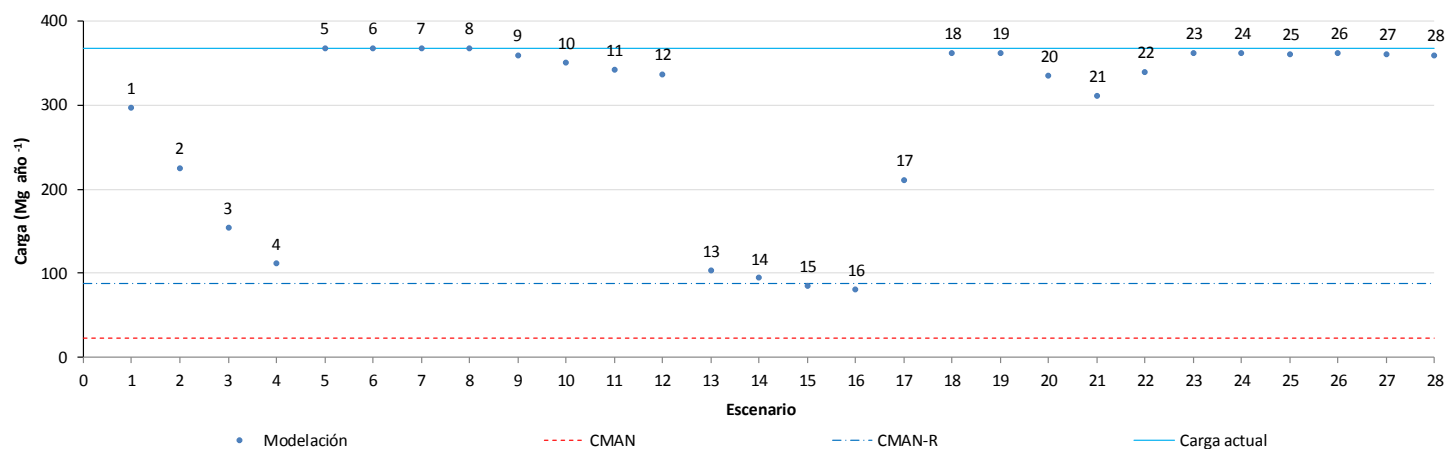


Figura 40 Cargas de P estimadas en el sitio El Purgatorio para los escenarios evaluados y comparación con la CMAN y la CMAN-R

CMAN: carga máxima admisible de nutrientes, CMAN-R: carga máxima admisible de nutrientes considerando retención por sedimentación en la presa El Purgatorio



## 5.6 Atenuación natural de nutrientes

Con la metodología descrita en este trabajo se determinó la atenuación natural que se presenta en toda la cuenca hidrológica para todas las fuentes emisoras de nutrientes y también las que se presentan de manera particular para los nutrientes emitidos por actividades pecuarias, uso agrícola y aguas residuales municipales. Los resultados obtenidos son los siguientes

En toda la cuenca y para todas fuentes de nutrientes

- 96.00 % de atenuación natural para N
- 98.98 % de atenuación natural para P

En toda la cuenca para nutrientes emitidos por aguas residuales municipales

- 68.37 % de atenuación natural para N
- 73.50 % de atenuación natural para P

En toda la cuenca para nutrientes emitidos por uso agrícola

- 97.51 % de atenuación natural para N
- 99.87 % de atenuación natural para P

En toda la cuenca para nutrientes emitidos por actividades pecuarias

- 98.03 % de atenuación natural para N
- 99.90 % de atenuación natural para P

## 6 Conclusiones y recomendaciones

Es posible evaluar las cargas de nutrientes que llegaran a la presa El Purgatorio, utilizando el modelo NEWS2 y basándose en un inventario de fuentes de nutrientes. Los resultados se validaron con datos de monitoreo. La considerable disminución observada entre las cargas emitidas en la cuenca y las cargas resultantes en la desembocadura de la misma, se explica por las retenciones que se presentan en la cuenca hidrológica propias de la atenuación natural.

La carga final de nutrientes en la desembocadura de la cuenca, depende de la magnitud de las emisiones, pero también de la atenuación natural que se presenta durante su movilización, por lo tanto para poder evaluar escenarios de reducción de cargas de nutrientes, es necesario aplicar métodos de modelación.

Las mayores reducciones de nutrientes en la cuenca hidrológica del río Verde se presentan cuando se disminuyen las emisiones por aguas residuales municipales y actividades pecuarias. Asimismo, a mayor cercanía de la emisión a la desembocadura de la cuenca, mayor será su contribución en la carga final.

Aunque las emisiones de nutrientes por aguas residuales municipales son inferiores que las emitidas por actividades pecuarias en la cuenca hidrológica del río Verde, los resultados de reducción en carga de nutrientes son similares para N y mayores para P cuando la reducción en emisiones se realiza en las aguas residuales municipales en comparación con las realizadas en las actividades pecuarias. Lo anterior se debe a que la atenuación que se presenta para los nutrientes generados por aguas residuales es menor que para los que se generan por otras actividades.

Con los escenarios planteados no es posible mantener el estado mesotrófico de la presa El Purgatorio si solo se consideran las cargas de nutrientes. Sin embargo es posible alcanzar el estado mesotrófico si se considera que existirá una retención de nutrientes por sedimentación en la presa El Purgatorio. Los escenarios evaluados que cumplen con esta condición consideran, además de la retención en la presa El Purgatorio, la reducción de 90% de las emisiones de nutrientes por aguas residuales y al menos de 75% de reducción en emisiones por actividades pecuarias.

El modelo NEWS2 proporcionó buenos resultados para los fines de esta tesis y es consistente aun pasando de la escala macro (para el que fue creado inicialmente) a la escala regional. En futuros trabajos, se recomienda considerar la retención de nutrientes que habrá una vez que entre en operación la presa El Zapotillo. Aun cuando se lleven a cabo modelaciones, los datos de monitoreo siempre serán útiles y necesarios para la validación de los resultados modelados. En países como México donde los recursos son limitados, la modelación es una herramienta útil para evaluar el problema originado por las cargas de nutrientes.

## 7 Referencias

- Artebjerg, G. et al., 2001. Eutrophication in Europe's coastal waters. Copenhagen, Dinamarca: European Environment Agency.
- Alexander, R. B., Johnes, P. J., Boyer, E. W. & Smith, R. A., 2002. A comparison of models for estimating the riverine export of nitrogen from large watersheds. *Biogeochemistry*, 57/58(1), pp. 295-339.
- Amiotte-Suchet, P., Probst, J. L. & Ludwig, W., 2003. Worldwide distribution of continental rock lithology: Implications for the atmospheric/soil CO<sub>2</sub> uptake by continental weathering and alkalinity river transport to the oceans. *Global Biogeochemical Cycles*, 17(2), p. 1038. doi:10.1029/2002GB001891.
- Aparicio-Mijares, F. J., 2001. *Fundamentos de hidrología superficial*. Primera ed. Distrito Federal, México: Limusa.
- Aqua Innova Consultoría e Ingeniería S.A. de C.V., 2004. *Identificación, muestreo y análisis de descargas contaminantes en los ríos Santiago y Verde, en el estado de Jalisco*, Guadalajara, Jalisco: CEA.
- Aqua Innova Consultoría e Ingeniería S.A. de C.V., 2011. *Estudio para la actualización y complementación de la calidad del agua del río Verde y sus afluentes, para el abastecimiento de agua potable a Los Altos de Jalisco-León, Guanajuato; de La presa El Zapotillo, estado de Jalisco*, Guadalajara, Jalisco: CEA.
- Arabi, M., 2011. *Nutrient Modeling Overview*. Colorado, USA, Colorado State University.
- AyMA Ingeniería y Consultoría S.A. de C.V., 2003. *Estudio de Monitoreo y modelación de la calidad del agua de los ríos Santiago y Verde en el estado de Jalisco*, Guadalajara, Jalisco: CEA.
- AyMA Ingeniería y Consultoría S.A. de C.V., 2006 a. *Actualización y caracterización de fuentes de contaminación de la cuenca del río Verde en el estado de Jalisco*, Guadalajara, Jalisco: CEA.
- AyMA Ingeniería y Consultoría S.A. de C.V., 2006 b. *Identificación y caracterización de fuentes de contaminación de las cuencas directa del río Santiago entre los municipios de Ocotlán y Tonalá, y directa del río Zula.*, Guadalajara, Jalisco: CEA.
- AyMA Ingeniería y Consultoría S.A. de C.V., 2007. *Actualización y caracterización de fuentes de contaminación de la cuenca del río Verde en el estado de Jalisco*, Guadalajara, Jalisco: CEA.
- AyMA Ingeniería y Consultoría S.A. de C.V., 2011. *Monitoreo de floraciones algales en el río Verde y el área de proyecto de abastecimiento "Purgatorio" en el estado de Jalisco*, Guadalajara, Jalisco: CEA.
- Benaman, J., Armstrong, N. E. & Maidment, D. R., 1996. *Modeling of dissolved oxygen in the Houston Ship Channel using WASP5 and Geographic Information Systems*. Austin, TX, USA: Center for Research in Water Resources.
- Beusen, A. H. W. et al., 2005. Estimation of global river transport of sediments and associated particulate C, N, and P. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4), p. GB4S05.
- Bianchi, T. S., 2007. *Biochemistry of estuaries*. Nueva York, USA: Oxford University Press.

- Bouwman , A. F., Van Drecht, G. & Van der Hoek, K. W., 2005. Surface N balances and reactive N loss to the environment from global intensive agricultural production systems for the period 1970–2030. *Science in China Series C: Life Sciences*, 48(2), pp. 767-779.
- Bouwman, A. F., Beusen, A. H. W. & Billen, G., 2009. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970–2050. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(4), p. GB0A04.
- Boyer, E. W. et al., 2006. Riverine nitrogen exports from the continents to the coasts. *Global biogeochemical cycles*, 20(1), p. GB1S91.
- Bricker, S. B. et al., 1999. *National Estuarine Eutrophication Assessment. Effects of nutrient enrichment in the nation's estuaries*. Silver Spring, USA: National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Caraco , N. F. & Cole , J. J., 1999. Human impact on nitrate export: an analysis using major world rivers. *Ambio*, 28(2), pp. 167-170.
- Carpenter, S. R. et al., 1998. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecological applications*, 8(3), pp. 559-568.
- CEA (Comisión Estatal del Agua Jalisco), 2008. *Sistema integral de información de coberturas del estado de Jalisco (SIICAEJ)*. Disponible en: [http://www.ceajalisco.gob.mx/siicaej.php#Escena\\_1](http://www.ceajalisco.gob.mx/siicaej.php#Escena_1).
- CEPIS (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambientales), 2001. *Metodologías simplificadas para la evaluación de eutroficación en lagos cálidos tropicales*, Lima, Peru: Organización Panamericana de la Salud (OPS).
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 1994. *Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario*. Distrito Federal, México: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2008. *Inventario nacional de plantas municipales de potabilización y tratamiento de aguas residuales en operación*, Distrito Federal, México: SEMARNAT.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2009. *Presentación: Proyecto "El Zapotillo" para el abastecimiento de agua potable a Los Altos de Jalisco y León, Guanajuato*. Guadalajara, Jalisco: Comisión Nacional del Agua.
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), 2011. *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. Disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/Portada%20BANDAS.htm>
- Corzo-Juárez, C. E., 2009. *Tesis: Contaminación de la cuenca de Arcediano y propuesta de saneamiento*. Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dumont , E. et al., 2005. Global distribution and sources of dissolved inorganic nitrogen export to the coastal zone: Results from a spatially explicit, global model. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4), p. GB4S02.



- Dunnivant, F. M. & Anders, E., 2006. *A basic introduction to pollutant fate and transport: an integrated approach with chemistry, modeling, risk assessment, and environmental legislation*. Nueva Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), 1992. *Wastewater treatment and use in agriculture*. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/T0551E/t0551e03.htm>
- FMVZ (Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia) UNAM, 2009. *Enciclopedia bovina*. Disponible en: [http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/e\\_bovina/03CriadeBecerras.pdf](http://www.fmvz.unam.mx/fmvz/e_bovina/03CriadeBecerras.pdf)
- Hansen , A. M., Gonzalez-Marquez, L. C., Torres-Bejarano, F. & Hernandez-Cruz, N., 2006. *Evaluación de los estudios ambientales y de saneamiento en el proyecto Arcediano, asesoria y seguimiento para la creación del distrito de control ambiental*, Jiutepec, México: IMTA.
- Hansen, A. M., León-Zavala, A. & Bravo-Inclan, L., 1995. Fuentes de contaminación y enriquecimiento de metales en sedimentos de la cuenca Lerma - Chapala. *Ingeniería Hidráulica en México*, 10(3), pp. 55-69.
- Harrison , J. A., Caraco, N. F. & Seitzinger , S. P., 2005 a. Global patterns and sources of dissolved organic matter export to the coastal zone: results from a spatially explicit, global model. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4), p. GB4S04.
- Harrison , J. A. et al., 2005 b. Dissolved inorganic phosphorus export to the coastal zone: Results from a spatially explicit, global model. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4), p. GB4S03.
- Howarth, R. W. et al., 1996. Regional nitrogen budgets and riverine N & P fluxes for the drainages to the North Atlantic Ocean: Natural and human influences. En: *Nitrogen cycling in the North Atlantic Ocean and its watersheds*. Holanda: Springer, pp. 75-139.
- Howarth, R. W. et al., 2006. The influence of climate on average nitrogen export from large watersheds in the Northeastern United States. *Biogeochemistry*, 79(1-2), pp. 163-186.
- IMTA (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua), 2005. *Eric III Versión 3.2 - extractor rápido de información climatológica*. Disponible en: <http://www.imta.gob.mx/index.php/productos/software/eric-iii-version-3-2-extractor-rapido-de-informacion-climatolo-detail>
- INAFED (Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal), 2006. *Sistema Nacional de información municipal (SNIM)*. Disponible en: <http://www.e-local.gob.mx/wb2/ELOCAL/ELOC> Descarga del SNIM
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2008 a. *Anuario Estadístico del Estado de Aguascalientes. Edición 2007*. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/ags/index.htm>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2008 b. *Anuario Estadístico del Estado de Guanajuato. Edición 2007*. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/gto/index.htm>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2008 c. *Anuario Estadístico del Estado de Jalisco. Edición 2007*. Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/jal/index.htm>



- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2008 d. *Anuario Estadístico del Estado de San Luis Potosí. Edición 2007.* Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/slp/index.htm>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2008 e. *Anuario Estadístico del Estado de Zacatecas. Edición 2007.* Disponible en: <http://www.inegi.gob.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/Aee07/estatal/zac/index.htm>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2010. *Censos y conteos de población y vivienda.* Disponible en: [www.censo2010.org.mx](http://www.censo2010.org.mx)
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2013 a. *Productos.* Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2013 b. *Población.* Disponible en: [http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur\\_urb.aspx?tema=P](http://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/rur_urb.aspx?tema=P)
- Instituto de Geología UNAM, 2000. *Carta geológica de la República Mexicana 5a edición (1992).* Disponible en: <http://www.geologia.unam.mx/igl/images/igl/cgm/cgrmmedium.jpg>
- IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), 2007. *Global NEWS Mission.* Disponible en: <http://marine.rutgers.edu/globalnews/mission.htm>
- IOC (Intergovernmental Oceanographic Commission), 2008. *Coastal eutrophication: linking nutrient sources to coastal ecosystem effects and management - the intersection of several UNESCO - IOC programmes related to nutrients,* Paris, Francia: UNESCO.
- Ittekkot, V. & Zhang, S., 1989. Pattern of particulate nitrogen transport in world rivers. *Global Biogeochemical Cycles*, 3(4), pp. 383-391.
- Jenkins, D., 2000. *Química Ambiental.* Nueva York, USA: John Wiley & Sons Inc.
- Jones, D. D. & Sutton, A. L., 2003. *Agricultural and biological Engineering, Purdue University.* Disponible en: <http://www.ces.purdue.edu/extmedia/ID/ID-120.html>
- Jones, P. J., 1996. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modelling approach. *Journal of Hydrology*, 183(3), pp. 323-349.
- Kelly, M. & Naguib, M., 1984. *Eutrophication in coastal marine areas and lagoons: a case study of "Lac de Tunis",* Paris, Francia: UNESCO.
- Kottek, M. et al., 2006. World map of the Koppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), pp. 259-263.
- Ludwing, W., Probst, J. L. & Kempe, S., 1996. Predicting the oceanic input of organic carbon by continental erosion. *Global Biogeochemical Cycles*, 10(1), pp. 23-41.
- Manahan, S. E., 2007. *Introducción a la Química Ambiental.* Distrito Federal, México: Reverté.
- Manahan, S. E., 2011. *Water chemistry: green science and technology of nature's most renewable resource.* Londres, Inglaterra: CRC Press.
- Marquez, A. & Cánovas, F., 2004. Absorción y asimilación de amonio. En: A. Marquez & F. Cánovas, edits. *El metabolismo del nitrógeno en las plantas.* Córdoba, España: Almuzara Estudios, pp. 65-93.



- Márquez-Pacheco, H., Hansen, A. M. & Falcón-Rojas, A., 2013. Phosphorous control in a eutrophied reservoir. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(12), pp. 8446-8456.
- Mayorga, E., 2009. *GNE (Global NEWS Modeling Environment) Manual*. Disponible en: [http://marine.rutgers.edu/globalnews/GNE/NEWS2\\_GNEManual.pdf](http://marine.rutgers.edu/globalnews/GNE/NEWS2_GNEManual.pdf)
- Mayorga, E. et al., 2010. Global nutrient export from WaterSheds 2 (NEWS2): model development and implementation. *Environmental Modelling & Software*, 25(7), pp. 837-853.
- Merck, 2013. *Parametros basicos de la A a la Z*. Disponible en: [http://www.merckmillipore.com.mx/chemicals/parameters-from-a-to-z/c\\_nt2b.s1LOLQAAAEWgulfVhTI?back=true&CountryName=Mexico](http://www.merckmillipore.com.mx/chemicals/parameters-from-a-to-z/c_nt2b.s1LOLQAAAEWgulfVhTI?back=true&CountryName=Mexico)
- Meybeck, M., 1982. Carbon, nitrogen, and phosphorus transport by world rivers. *American Journal of Science*, 282(4), pp. 401-450.
- Meybeck, M. & Vorösmarty, C. J., 2005. Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes: from natural Holocene variations to Anthropocene. *Comptes Rendus Geoscience*, 337(1), pp. 107-123.
- Miranda, M. D. P. C., 2005. El agua en el medio ambiente. En: UNED, ed. *Bases químicas del medio ambiente*. Madrid, España: Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), pp. 385-424.
- Nielsen, K. et al., 2001. Nitrogen and phosphorus retention estimated independently by flux measurements and dynamic modelling in the estuary, Randers Fjord, Denmark. *Marine ecology*, 219(1), pp. 25-40.
- Nixon, S. W., 1995. Coastal marine eutrophication: a definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41(1), pp. 199-219.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), 2004. *National estuarine eutrophication assessment update: workshop summary and recommendations for development of a long-term monitoring and assessment program*, Silver Spring, USA: NOAA.
- O'Neill, P., 1998. *Environmental chemistry*. Primera ed. Londres, Inglaterra: CRC Press.
- OECD (Organisation for Economic Co-operation and Development), 1982. *Eutrophication of waters: monitoring, assessment and control*, Paris, Francia: OCDE.
- ORVA Ingeniería S.A. de C.V., 2003. *Proyecto Arcediano. Manifiesto de impacto ambiental. Modalidad regional*, Guadalajara, Jalisco: CEA.
- Pradal - Roa, P., 2013. *Tabla de pesos - edad en ganado porcino en la República Mexicana*. Distrito Federal, México: Comunicación personal.
- Puckett, L. J., 1995. Identifying the major sources of nutrient water pollution. *Environmental Science & Technology*, 29(9), pp. 408A-414A.
- Raiswell, R. W. & Brimblecombe, P., 1983. *Química Ambiental*. Primera ed. Barcelona, España: Omega.
- Ramírez-Zierold, J. A. et al., 2010. Changing water, phosphorus and nitrogen budgets for Valle de Bravo reservoir, water supply for Mexico City Metropolitan Area. *Lake and Reservoir Management*, 26(1), pp. 26-34.

- Ryding, S. O. & Rast, W., 1989. *The control of eutrophication of lakes and reservoirs*. Primera ed. Paris, Francia: The Parthenon Publishing Group.
- SEDUE (Secretaria de Desarrollo Urbano y Ecología), 1989. *Criterios Ecologicos de Calidad del Agua (CE-CCA-001/89)*. Distrito Federal, México: Diario Oficial de la Federación.
- Seitzinger, S. P. et al., 2005. Sources and delivery of carbon, nitrogen, and phosphorus to the coastal zone: An overview of Global Nutrient Export from Watersheds (NEWS) models and their application. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(4), p. GB4S01.
- SEMARNAT (Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales), 2013. *Espacio digital geografico*. Disponible en: <http://onfoteca.semarnat.gob.mx/metadateexplorer/explorer.jsp>
- Smil, V., 1996. *Cycles of life: civilization and the biosphere*. Primera ed. Portland, USA: Scientific American Library.
- Stednick, J. D. & Hall, E. B., 2003. *Applicability of trophic status indicators to Colorado plains reservoirs*, Colorado, USA: Colorado Water Resources Research Institute Completion Report.
- Stumm, W. & Morgan, J. J., 2012. *Aquatic chemistry: chemical equilibria and rates in natural waters*. Primera ed. Nueva Jersey, USA: John Wiley & Sons.
- Taiganides, E. P. P. & Sánchez, R. G., 1996. *Manual para el manejo y control de aguas residuales y excretas porcinas en México*. Primera ed. Distrito Federal, México: Consejo Mexicano de Porcicultura.
- USEPA (US Environmental Protection Agency), 2008. Nonpoint Source Control Branch. En: *Handbook for developing watershed plans to restore and protect our waters*. Washington, D.C.: DIANE Publishing.
- Van Drecht, G., Bouwman, A. F., Harrison, J. & Knoop, J. M., 2009. Global nitrogen and phosphate in urban wastewater for the period 1970 to 2050. *Global Biogeochemical Cycles*, 23(4), p. GB0A03. doi: 10.1029/2009GB003458.
- Van Drecht, G. et al., 2003. Global modeling of the fate of nitrogen from point and nonpoint sources in soils, groundwater, and surface water. *Global Biochemical Cycles*, 17(4), p. 1115.
- Vörösmarty, C. J. et al., 2003. Anthropogenic sediment retention: major global impact from registered river impoundments. *Global and Planetary Change*, 39(1), pp. 169-190.
- Vörösmarty, C. J., Fekete, B. M., Meybeck, M. & Lammers, R. B., 2000. Global system of rivers: Its role in organizing continental land mass and defining land-to-ocean linkages. *Global Biogeochemical Cycles*, 14(2), pp. 599-621.
- Weiner, E. R., 2008. *Application of environmental aquatic chemistry. A practical guide*. Primera ed. Londres, Inglaterra: CRC PRESS.
- Withers, P. J. A. & Jarvie, H. P., 2008. Delivery and cycling of phosphorus in rivers: A review. *Science of the total environment*, 400(1), pp. 379-395.
- Worral, F. & Burt, T. P., 1996. The impact of land-use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models. *Journal of Hydrology*, 221(1), pp. 75-90.

- Zurlini, G., 1996. Multiparametric classification of trophic conditions. The OECD methodology extended: combined probabilities and uncertainties—application to the North Adriatic Sea. *Science of the Total Environment*, 182(1), pp. 169-185.

**Anexo A Comparación de concentraciones de nutrientes medidos durante  
temporada de estiaje**

**Tabla 44 Concentraciones de nutrientes en agua, muestreos realizados en época de estiaje sobre el cauce del río Verde**

Sitio de Muestreo	Unidad	2013 <sup>a</sup>	2002-2011 <sup>b</sup>	
			Promedio	Desviación estándar
<i>N-amoniaca/</i>				
El Zapotillo SW (aguas arriba)	mg L <sup>-1</sup>	0.14	ND	--
El Zapotillo SW	mg L <sup>-1</sup>	0.15	0.15	--
El Zapotillo GW	mg L <sup>-1</sup>	0.03	ND	--
La Cuña	mg L <sup>-1</sup>	0.04	0.28	0.23
Las Huertas	mg L <sup>-1</sup>	0.05	0.25	0.37
El Purgatorio	mg L <sup>-1</sup>	0.11	0.17	0.10
<i>N-total</i>				
El Zapotillo SW (aguas arriba)	mg L <sup>-1</sup>	1.00	ND	ND
El Zapotillo SW	mg L <sup>-1</sup>	0.65	ND	ND
El Zapotillo GW	mg L <sup>-1</sup>	0.25	ND	ND
La Cuña	mg L <sup>-1</sup>	1.40	1.25	0.83
Las Huertas	mg L <sup>-1</sup>	1.50	1.07	0.62
El Purgatorio	mg L <sup>-1</sup>	2.05	1.01	0.57
<i>P-PO<sub>4</sub></i>				
El Zapotillo SW (aguas arriba)	mg L <sup>-1</sup>	1.60	ND	ND
El Zapotillo SW	mg L <sup>-1</sup>	1.74	ND	ND
El Zapotillo GW	mg L <sup>-1</sup>	0.29	ND	ND
La Cuña	mg L <sup>-1</sup>	0.40	0.29	0.18
Las Huertas	mg L <sup>-1</sup>	0.36	0.23	0.15
El Purgatorio	mg L <sup>-1</sup>	0.67	0.25	0.15
P-total				
El Zapotillo SW (aguas arriba)	mg L <sup>-1</sup>	1.11	ND	ND
El Zapotillo SW	mg L <sup>-1</sup>	1.79	ND	ND
El Zapotillo GW	mg L <sup>-1</sup>	0.05	ND	ND
La Cuña	mg L <sup>-1</sup>	0.47	0.59	0.36
Las Huertas	mg L <sup>-1</sup>	0.35	0.48	0.34
El Purgatorio	mg L <sup>-1</sup>	0.72	0.49	0.30

<sup>a</sup> Este trabajo, <sup>b</sup> (AyMA Ingeniería y Consultoría, 2003 y 2007; Aqua Inova Consultoría e Ingeniería, 2011), ND = No determinado

**Anexo B Inventarios ganaderos para los municipios en la cuenca hidrológica del  
río Verde**

Tabla 45 Inventarios ganaderos por municipio en la cuenca hidrológica del río Verde

Municipio	No de cabezas			
	Bovinos			Porcinos
	Leche	Carne	No especificado	
<i>Aguascalientes<sup>a</sup></i>				
Aguascalientes			40,702	16,609
Asientos			3,183	23,879
Calvillo			1,883	1,353
Cosío			14,425	1,644
El Llano			2,740	2,844
Jesús María			16,199	11,122
Pabellón de Arteaga			6,431	31,695
Rincón de Romos			2,575	10,879
San Francisco de los Romo			1,048	4,792
San José de Gracia			10,650	622
Tepezalá			2,408	25,965
<i>Guanajuato<sup>b</sup></i>				
León			86,046	39,654
Ocampo			11,402	1,888
San Felipe			21,841	4,351
<i>Jalisco<sup>c</sup></i>				
Acatic	12,337	36,103		292,608
Cañadas de Obregón	990	5,447		4,909
Cuqueo	1,084	22,542		4,830
Encarnación de Díaz	72,548	13,074		49,346
Ixtlahuacan del río	3,543	22,913		9,585
Jalostotitlán	18,702	17,625		63,567
Lagos de moreno	68,567	81,978		440,013
Mexxicacán	578	6,838		1,977
Ojuelos de Jalisco	6,393	39,280		4,925
San Diego de Alejandría	3,339	14,655		9,083
San Juan de los Lagos	67,971	51,420		699,132
San Julián	14,135	6,673		88,457
San Miguel el Alto	49,941	20,565		21,441
Teocaltiche	47,806	21,763		25,362
Tepatitlán	67,288	77,610		479,945
Unión de San Antonio	781	17,175		8,966
Valle de Guadalupe	7,238	5,519		41,773
Villa Hidalgo	1,133	25,931		54,588
Yahualica de González	4,103	17,153		41,045
<i>San Luis Potosí<sup>d</sup></i>				
Villa de Arriaga			17,970	9,915
<i>Zacatecas<sup>e</sup></i>				
Apulco			5,840	826
Cuauhtémoc			4,993	505
Genaro Codina			3,277	656
Guadalupe			14,017	1,814
Loreto			6,240	2,372
Luis Moya			7,527	901





Tabla 45 Inventarios ganaderos por municipio en la cuenca hidrológica del río Verde

Municipio	No de cabezas			
	Bovinos			Porcinos
	Leche	Carne	No especificado	
<i>Zacatecas<sup>e</sup> (continua)</i>				
Nochistlán de Mejía			22,576	3,170
Noria de Ángeles			3,784	750
Ojo Caliente			13,872	2,007
Pinos			32,354	10,084
Trancoso			4,354	372
Villa García			3,122	1,460
Villanueva			63,383	4,722

Con base en: <sup>a</sup>(INEGI 2008 a), <sup>b</sup>(INEGI 2008 b), <sup>c</sup>(INEGI 2008 c), <sup>d</sup>(INEGI 2008 d), <sup>e</sup>(INEGI 2008 e)

## Anexo C Hojas de entrada para modelo NEWS2

**Tabla 46 Propiedades físicas de la cuenca (stn30v6ngnews). Ver Tabla 7**

BASINI D	basinnam e	area	arealan d	arealan dfr	basin order	Basin cellcnt	mouth_lo n	mouth_ lat	latband	basctr_ lat	continent	ocean	sea	Sea basin	Koppe nGrpA - prc
1	El Niágara	5461.89	5406.26	0.9898	4	2	-102.375	21.779	10-23.5N	22.207	North America	Land	Land	Land	0
2	El Cuarenta	2326.99	2303.29	0.9898	4	1	-101.752	21.488	10-23.5N	21.600	North America	Land	Land	Land	0
3	Ajojucar	816.24	807.92	0.9898	4	1	-102.439	21.563	10-23.5N	21.714	North America	Land	Land	Land	0
4	San Gaspar	2939.13	2909.20	0.9898	4	2	-102.497	21.284	10-23.5N	21.290	North America	Land	Land	Land	0
5	La Cuña	7618.01	7540.43	0.9898	4	3	-102.821	21.005	10-23.5N	21.375	North America	Land	Land	Land	0
6	Verde	1470.04	1455.07	0.9898	4	1	-103.280	20.741	10-23.5N	20.856	North America	Land	Land	Land	0

**Tabla 47 Áreas de la cuenca (basarea\_cell\_ng). Ver Tabla 7**

BASINID	area
1	5461.8926
2	2326.9982
3	816.2414
4	2939.1348
5	7618.0145
6	1470.0456

**Tabla 48** Proporciones de áreas de la cuenca (stn30v601\_gnews\_ng). Ver Tabla 7

BASINID	area	arealand	arealandfr	basinname	continent	ocean	seabasin
1	5461.8926	5406.2681	0.9898	Verde	North America	Land	Land
2	2326.9982	2303.2998	0.9898	Verde	North America	Land	Land
3	816.2414	807.9287	0.9898	Verde	North America	Land	Land
4	2939.1348	2909.2023	0.9898	Verde	North America	Land	Land
5	7618.0145	7540.4318	0.9898	Verde	North America	Land	Land
6	1470.0456	1455.0745	0.9898	Verde	North America	Land	Land

**Tabla 49** Litología y pendiente (lithologySlope\_ng). Ver Tabla 7

basinid	LithClass	FournierSlope
1	6	23.5259
2	6	23.5259
3	6	23.5259
4	6	23.5259
5	6	23.5259
6	6	23.5259

**Tabla 50** Hidrología y coeficientes de retención (c00\_disch\_fqrem\_reservret\_ng). Ver Tabla 7

basinid	c0QGEMSflg	c0Qact	c0Qnat	c0FQrem	c0FQremScI GEMS	c0Ddin	c0Ddip	c0Dsed	c0Ddin0to1	c0Ddip0to1	c0Dsed0to1
1	0	0.02926	0.02926	0	0	0.32	0.745	0.84913	0.32	0.745	0.84913
2	0	0.02704	0.02704	0	0	0.32	0.745	0.84913	0.32	0.745	0.84913
3	0	0.04510	0.04510	0	0	0.32	0.745	0.84913	0.32	0.745	0.84913
4	0	0.10640	0.10640	0	0	0.32	0.745	0.84913	0.32	0.745	0.84913
5	0	0.51000	0.51000	0	0	0.32	0.745	0.84913	0.32	0.745	0.84913
6	0	0.14199	0.14199	0	0	0.32	0.745	0.84913	0.32	0.745	0.84913

Tabla 51 Fuentes puntuales (c00\_hydro\_pntsrc\_other\_ng). Ver Tabla 7

id	c0R	Wpct	c0frnrprec	c0annprec	c0GDPmer	c0GDPppp	c0PopDen	c0P Urb Den	c0P Con Den	c0EN sew hum	c0 TN fre m	c0TN sew hum	c0EP sew hum	c0 EP sew det	c0 TP fre m	c0TP sew hum	c0T P sew det	c0 TN dpna
1	5.36	0	2.931	478	3802.69	8182.30	194.54	159.11	140.01	566.65	0	566.65	120.41	0	0	120.41	0	188.91
2	11.62	0	2.851	465	3802.69	8182.30	16.84	5.41	4.76	49.06	0	49.06	10.42	0	0	10.42	0	188.91
3	55.25	0	3.262	532	3802.69	8182.30	42.47	16.88	14.85	123.72	0	123.72	26.29	0	0	26.29	0	188.91
4	36.20	0	3.863	630	3802.69	8182.30	67.59	52.22	45.95	196.87	0	196.87	41.83	0	0	41.83	0	188.91
5	67.00	0	3.906	637	3802.69	8182.30	35.01	19.65	17.29	101.99	0	101.99	21.67	0	0	21.67	0	188.91
6	96.59	0	4.831	788	3802.69	8182.30	92.17	72.02	63.38	268.48	0	268.48	57.05	0	0	57.05	0	188.91

Tabla 52 Fuentes difusas (c00\_diffsrc\_landuse\_ng). Ver Tabla 7

basinid	c0agrpt	c0wrpt	c0mrgrpt	c0TNfe	c0TNma	c0TNex	c0TPfe	c0TPma	c0TPex	c0TNfxag	c0TNfxna	c0TNdpag
1	41.91	0.06	31.34	3.6	1256.62	0	0.83	670.75	0	445.29	663.99	490.83
2	36.63	0.06	41.97	0.31	1201.59	0	0.07	659.41	0	445.29	663.99	490.83
3	36.99	0.06	43.59	25.79	2676.66	0	5.95	1501.71	0	445.29	663.99	490.83
4	30.08	0.06	51.08	13.98	6217.6	0	3.23	2714.46	0	445.29	663.99	490.83
5	38.82	0.06	42.36	32.17	4524.59	0	7.42	2076.34	0	445.29	663.99	490.83
6	59.02	0.06	10.24	80.92	6630.63	0	18.67	3082.01	0	445.29	663.99	490.83