

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



Estudio geoquímico de metales pesados
en los sólidos suspendidos de la cuenca del Río Tuy

**Proyecto Geoquímico II
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela por el Br. Jesús
Alberto Navarro Blanco.**

Caracas, octubre de 2011

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE GEOQUÍMICA



Estudio geoquímico de metales pesados
en los sólidos suspendidos de la cuenca del Río Tuy

Tutor:
Williams Meléndez

**Proyecto Geoquímico II
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela por el Br. Jesús
Alberto Navarro Blanco.**

Caracas, octubre de 2011

ACTA

Aprobado en nombre de la Universidad Central de Venezuela por los Miembros del Jurador Examinador.

Prof. Williams Meléndez

Tutor

Prof. Armando Ramírez

Profesor-Jurado

Prof. Carlos Yanes

Profesor-Jurado

Dedicado a Dios que es supremamente especial

AGRADECIMIENTOS

Primeramente a Dios, porque sin Él no hubiese logrado culminar exitosamente esta investigación.

Sin Él mi vida no tiene sentido. Te amo

A la gran Universidad Central de Venezuela y al Instituto de Ciencias de La Tierra, por permitirme obtener los conocimientos necesarios para ser un Licenciado en Geoquímica de este hermoso país.

Al financiamiento del Proyecto CDCH N° PG-03-7843-2009/1 Titulado “Estudio de la evolución del grado de contaminación de la cuenca del río Tuy durante últimos veinte años”.

A mis padres Marlene y Jesús, y mi hermano Jorge porque su amor y apoyo es fundamental para mi andar cada día.

A mi preciosa novia Jessy que alegra mi corazón y me da fuerzas para lograr grandes cosas.

A mi familia, desde el más viejito hasta el más joven, por ser parte del estímulo que me impulsó a lograr esta meta, además de las inmensas alegrías compartidas. Especialmente mi tía Gisela y mis primos Mariale, Mafer, Rolando y Adrián por brindarme hospitalidad y ayuda incondicional.

Al profesor Williams, por ser un tutor que dio consejos oportunos, una adecuada ayuda y correcciones acertadas, además de un claro apoyo.

Al profesor Armando, por siempre dar, con precisos conocimientos, una guía hacia el camino de la excelencia y humildad.

A todo el personal del laboratorio de absorción, suelos, ambiental, por todo el apoyo sincero y ayuda brindada durante la elaboración de mi proyecto.

Al Laboratorio Nacional de Hidráulica, por la importante ayuda prestada y por la experiencia vivida.

A mis amigos que hicieron mi caminar por la universidad más sencillo: Wilbert, MariaK, Henry, María Emilia, Jeffrey, Luisa, Omnain, Nadeztha, Richard.

Gracias a ustedes y demás personas que influyeron de una manera u otra en mi vida.

RESUMEN

En el presente trabajo fue llevado a cabo un estudio de los metales pesados asociados a los sólidos suspendidos del Río Tuy. Las muestras fueron recolectadas entre julio y octubre del 2010 y posteriormente fue determinada la concentración de sólidos suspendidos a lo largo del Río Tuy. Luego del tratamiento físico correspondiente, fueron determinados los elementos (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Fe, Ni, Mn, Pb y Zn) previa extracción ácida con HCl 1 M y HNO₃ concentrado, a través de la técnica de espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplada (EEA-ICP); a excepción del Hg, el cual fue determinado por el equipo DMA-80, en muestra total. Los resultados indican que las concentraciones determinadas (42 - 4039 mg/l) fueron superiores al valor promedio de referencia para ríos no intervenidos (23 mg/l). Sin embargo, dichas concentraciones fueron, en general, menores que las obtenidos por Lugo, (1982) (200 – 3880 mg/l). Por otro lado, se obtuvo que los elementos Co, Cu, Mn, Pb y Zn son extraídos preferencialmente por HCl 1 M, estando esta fracción asociada a las fases geoquímicas de carbonatos, oxi-hidróxidos amorfos y especies sorbidas superficialmente (e intercambiables). Por su lado el Al, Cd, Cr, Fe, Ni, Zn tienen tendencia a ser extraído por el HNO₃ concentrado, esta fracción está asociada con la materia orgánica, oxihidróxidos cristalinos, especies fuertemente absorbidas, las arcillas y sulfuros. Por otra parte, la distribución geoquímica de los elementos Al, Co, Cr, Fe, Mn y Ni son atribuidos principalmente a factores litológicos, mientras que la concentración de los elementos Cd, Cu, Hg, Pb y Zn están asociados principalmente a las actividades domésticas, agropecuarias e industriales. Las zonas que presentaron mayor alteración ambiental en el Río Tuy están comprendidas entre Tácata y Boca de Paparo; resaltando sitios como Ocumare, Lagartijo, Araguaita y Panaquire. Además los afluentes como Quebrada Cúa, Quebrada Ocumarito, Quebrada Charallave, Río Súcuta, Río Guaire y Río Caucagua introducen una importante carga de metales pesados (de origen antrópico) al río principal. En general, se observó que la carga de metales pesados en el Río Tuy ha aumentado en las dos últimas décadas por el crecimiento de las actividades agropecuarias, domésticas e industriales.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
INTRODUCCIÓN	1
Objetivos	4
Objetivo General	4
Objetivos Específicos	4
MARCO TEÓRICO	5
Bases Teóricas	5
Factores que controlan la abundancia, distribución y composición de los sólidos suspendidos.	6
Factores que influyen en la distribución y movilidad de los metales pesados en los sedimentos del agua del río	10
Mecanismos fisicoquímicos que influyen en la movilidad de los metales pesados	14
Índices de contaminación	18
Antecedentes	21
Antecedentes Internacionales	21
Antecedentes Nacionales	23
Zona de Estudio	27
Ubicación	27
Geología de la Cuenca del Río Tuy	28
Clima del la cuenca del Río Tuy	30
METODOLOGÍA EXPERIMENTAL	31
Etapas Pre-campo, Campo, Post-campo	31
Tratamiento de Datos	35
PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	36
Parámetros fisicoquímicos	36
Concentración de sólidos suspendidos	40
Concentración de metales pesados en los sólidos suspendidos	49
CONCLUSIONES	83

RECOMENDACIONES	85
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
APÉNDICES	105
Apéndice 1. Curvas de calibración para los metales pesados Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe	105
Apéndice 2. Curvas de calibración para los metales pesados Mn, Ni, Pb, Zn	106
Apéndice 3. Correlaciones entre la masa de la muestra versus la masa del residuo	107
Apéndice 4. Porcentajes de residuos de las muestras luego del Tratamiento químico	109
Apéndice 5. Concentración de Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe en función de la masa de la muestra en el punto Santa Teresa del Tuy	110
Apéndice 6. Concentración de Mn, Ni, Pb, Zn en función de la masa de la muestra en el punto Santa Teresa del Tuy	111
Apéndice 7. Resultado del cálculo de parámetros estadísticos	112
Apéndice 8. Concentración de sólidos suspendidos en el Río Tuy	113
Apéndice 9. Caudal en algunos puntos de muestreo en el Río Tuy y afluentes	114
Apéndice 10. Coeficientes de correlación entre las concentraciones de los metales pesados medidos en el Río Tuy (HCl 1 M)	115
Apéndice 11. Coeficientes de correlación entre las concentraciones de los metales pesados medidos en el Río Tuy (HNO₃ (c))	115
Apéndice 12. Concentraciones elementales para las muestras extraídas con HCl 1 M	116
Apéndice 13. Concentraciones elementales para las muestras extraídas con HNO₃ (c)	118
Apéndice 14. Distribución de Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe en HCl 1 M y HNO₃ concentrado	122
Apéndice 15. Distribución de Mn, Ni, Pb, Zn en HCl 1 M	

y HNO₃ concentrado	123
Apéndice 16. Concentraciones de metales pesados en algunos puntos de muestreo en el Río Tuy	124
Apéndice 17. Concentraciones de metales pesados en aguas en puntos de muestreo en el Río Tuy	124

ÍNDICE DE TABLAS

Contenido	Página
Tabla N° 1. Principales fuentes antrópicas de metales pesados	9
Tabla N° 2. Categorías en base al Factor de Enriquecimiento	19
Tabla N° 3. Índices de geoacumulación y grado de contaminación asociado	20
Tabla N° 4. Puntos de muestreo en el Río Tuy	32
Tabla N° 5. Puntos de muestreo de los tributarios más importantes del Río Tuy	32
Tabla N° 6. Medidas de distancia y parámetros fisicoquímicos en el Río Tuy	37
Tabla N° 7. Medidas adicionales de campo en el Río Tuy	38
Tabla N° 8. Medidas de Eh en algunos puntos del río Tuy	38
Tabla N° 9. Metodologías de toma de muestra de sólidos suspendidos en el Río Tuy	38
Tabla N° 10. Métodos para la determinación de la concentración de sólidos Suspendidos	40
Tabla N° 11. Determinaciones realizadas a las muestras de sólidos suspendidos del Río Tuy	41
Tabla N° 12. Concentración de sólidos suspendidos en el Río Tuy en Lugo, (1982) y en la presente investigación	47
Tabla N° 13. Concentración de sólidos suspendidos en los principales ríos de Venezuela y en la presente investigación	48
Tabla N° 14. Lista de muestras utilizadas para el análisis de metales pesados	49
Tabla N° 15. Factor de enriquecimiento de los metales pesados en el Río Tuy	81
Tabla N° 16. Coeficientes de reparto de metales pesados determinados en el Río Tuy	81

ÍNDICE DE FIGURAS

Contenido	Página
Figura 1. Cuenca del Río Tuy	27
Figura 2. Tratamiento químico de los sólidos suspendidos	35
Figura 3. Distribución de la concentración de los sólidos suspendidos a lo largo de la cuenca del Río Tuy	42
Figura 4. Distribución de la concentración de Al en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	52
Figura 5. Distribución de la concentración de Fe en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	54
Figura 6. Correlación de Al con Fe en HNO ₃ (c)	56
Figura 7. Distribución de la concentración de Mn en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	57
Figura 8. Correlación de Mn con Fe en HNO ₃ (c)	59
Figura 9. Distribución de la concentración de Zn en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	60
Figura 10. Correlación de Zn con Fe en HNO ₃ (c)	62
Figura 11. Distribución de la concentración de Cu en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	63
Figura 12. Correlación de Cu con Zn en HNO ₃ (c)	65
Figura 13. Correlación de Cu con Fe en HNO ₃ (c)	65
Figura 14. Distribución de la concentración de Cd en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	66
Figura 15. Correlación de Cd con Fe en HCl 1 M	68
Figura 16. Correlación de Zn con Cd en HNO ₃ (c)	68
Figura 17. Distribución de la concentración de Co en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	70
Figura 18. Correlación de Cr con Co en HCl 1 M	71
Figura 19. Correlación de Mn con Co en HNO ₃ (c)	71
Figura 20. Distribución de la concentración de Cr en los sólidos suspendidos	

del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	73
Figura 21. Distribución de la concentración de Ni en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	74
Figura 22. Correlación de Cr con Ni en HNO ₃ (c)	76
Figura 23. Distribución de la concentración de Pb en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	77
Figura 24. Distribución de la concentración de Pb en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO ₃ (c)	78

INTRODUCCIÓN

Los ríos son sistemas acuáticos naturales de suma importancia, dado que albergan una gran cantidad de ecosistemas, debido a las condiciones fisicoquímicas y biológicas que presentan (Hynes, 1970, 1974). Adicionalmente, en el campo de la geología, se define una función relevante de los ríos, la cual consiste en transportar el material erosionado desde los continentes a los océanos (Bloom, 1998). Estos sólidos transportados son clasificados en: sólidos disueltos ($<0,45 \mu\text{m}$), sólidos suspendidos ($>0,45 \mu\text{m}$) y sedimentos de fondo (Gibbs, 1967; Kennedy y Zellweger, 1974, WMO, 1981). La composición de estas partículas en las aguas naturales están caracterizadas por minerales de arcilla, oxi-hidróxidos de Fe, Mn y Al, y partículas orgánicas, incluyendo organismos, escombros biológicos y humus (Stumm y Morgan, 1996). Es importante mencionar que los sólidos suspendidos representan el 80 % de la carga que transportan estos cuerpos de agua (Rodríguez y Marín, 1999).

Los ríos poseen una composición química natural que viene dada por los siguientes factores: a) interacción agua-roca; b) el tipo de sólido suspendido; c) la mineralogía y propiedades geoquímica de los sedimentos de fondo; d) precipitación atmosférica; e) escorrentía; f) infiltración; g) clima; h) erosión y meteorización de las rocas. (Gaillardet, y col, 1999; Gibbs, 1970). Lo anteriormente expuesto conforma el sistema fluvial, en el cual ocurren diversos procesos, como lo son los de mezcla, precipitación, floculación, sedimentación, entre otros; y la interacción entre todo ello presenta un estado de equilibrio.

Es por esto que los ríos ofrecen excelentes bondades que son aprovechables por el hombre; cumpliendo un rol importante en el desarrollo de la comunidad humana; supliendo agua para su consumo directo, así como para la agricultura, la ganadería y la industria. Estas actividades, realizadas de formas adecuadas y controladas, no interfieren significativamente con las condiciones naturales del río; dado que permite su proceso de autopurificación como ciclo natural. Ello ocurre principalmente debido a la interacción entre las partículas sólidas y los cationes en el agua, lo cual desempeña un papel primordial en la regulación y el comportamiento de la mayoría de los elementos, principalmente los traza. Sin embargo esta misma facilidad de recuperación del agua, puede ser limitada (Rodríguez y Marín, 1999).

Las distintas actividades humanas producen altas cantidades de desechos, las cuales descargan sistemáticamente componentes disueltos y materiales suspendidos a los ríos; que le resulta

imposible al río de remediar naturalmente. De esta manera se produce la desmejora significativa en la calidad del agua. Esto trae como consecuencias efectos adversos en la salud del hombre y limitaciones a sus actividades regulares. Dicha problemática, lamentablemente, es de carácter mundial (Carpenter y col, 1998; Wang y col, 2007; Muller y col., 2008; Li y col, 2009; Pizarro y col, 2010; Dokmeci y col, 2009).

Este conjunto de actividades han introducido al sistema fluvial especies químicas, como nutrientes y contaminantes, que alteran el equilibrio geoquímico natural de los metales traza en el ambiente acuático, causando impactos sustanciales en sus condiciones naturales. Uno de los factores que influye en dicha alteración, incluyendo la afectación de la sobrevivencia y bienestar de recursos vivos, es el incremento de la concentración de metales pesados en estos sistemas (Alagarsamy, 2006).

Algunos de estos metales son esenciales para los procesos biológicos de los seres vivos, mientras que otros son siempre perjudiciales (inclusive a bajas concentraciones), pero generalmente todos éstos producen efectos tóxicos a altas concentraciones, incluyendo aquellos que actúan como micronutrientes (Ouyang et al., 2001). Es importante destacar que los metales pesados determinan las condiciones en el medio acuático, en función de su concentración, especiación y movilidad. (Rainbow, 1985)

Los metales pesados son incorporados a los cuerpos de aguas naturales como sólidos disueltos, sólidos suspendidos y sedimentos de fondo; luego pueden cambiar de fase en el río de acuerdo a su naturaleza química y las condiciones del sistema fluvial. Dicho comportamiento está dominado por varias interacciones fisicoquímicas, tales como: la complejación, procesos biológicos y la adsorción sobre sólidos en suspensión. (Rodríguez y Marín, 1999). Pero, principalmente, el transporte de estos metales en las aguas superficiales, ocurre en la forma sólida (adsorción), sorbidos sobre arcillas, partículas de materia orgánica y coprecipitados con oxihidróxidos de hierro y manganeso (Perhac y Whelan, 1972 y Guillén, 1982).

Por otra parte, el coeficiente de partición (que define la afinidad de un elemento por estar en la fase acuoso o la sólida) de cada metal pesado, permitirá estimar en cual fase de la carga que es transportada por el río se encontrará preferencialmente. A partir de ello, junto con sus propiedades químicas particulares, regirá del elemento, su movilidad y su disponibilidad con respecto a la biota (Audry y col., 2006).

Aunado a la concentración de sólidos suspendidos, el pH, el potencial redox, el contenido de la materia orgánica y la fuerza iónica; determinan la movilidad y la biodisponibilidad de los metales pesados (Beeftink y col., 1982; Rozema y col., 1990). Por lo tanto, las fluctuaciones ambientales pueden variar ampliamente la disponibilidad de estos metales. Asimismo, la toxicidad proveniente de los metales pesados puede afectar a los niveles superiores de la cadena alimenticia, tanto por ingesta directa como por la potencial transmisión a través de la red trófica (Adam, 1990).

En particular, numerosos investigadores coinciden que más del 90 % de la carga de los metales pesados de una corriente fluvial se halla en las partículas en suspensión del agua y en los sedimentos. Por lo tanto, los sólidos suspendidos son una importante fuente y reservorio de metales pesados, por lo que resultan buenos indicadores ambientales; debido a que describen las condiciones del sistema fluvial, en conjunto con los otros compartimientos del sistema: los sólidos disueltos y sedimentos de fondo (Meybeck, 1977; Calmano y col., 1993; Dekov y col., 1998; Smolyakov y col., 2010).

Es conocido que la contaminación de aguas es un problema del cual Venezuela no escapa. En este país se encuentran importantes recursos hídricos, que tienen diferentes grados de alteración. De los cuales se pueden nombrar los ríos: Orinoco, Caroní, Caura, Apure, Mitare, Tocuyo, Turbio, Yaracuy, Unare, Neverí, Manzanares y Tuy (Zinck, 1982; Ramírez y Andara, 1993, FUNDAMBIENTE, 2006).

Este último cuerpo de agua reviste una especial atención por constituirse como la cuenca hidrográfica con mayor superficie dentro del estado Miranda y por ende es una de las fuentes más importantes de abastecimiento de agua para la región capital; la cual posee la mayor densidad poblacional, un importante desarrollo industrial y una buena cantidad de tierras para las actividades agrícolas. En sentido general, la cuenca del Río Tuy presenta una serie de beneficios que le proporcionan un gran valor potencial de recursos naturales, excelentes para la práctica de actividades diversas; tales como la agropecuaria, transporte fluvial, industrial, entre otras.

No obstante, el Río Tuy está siendo subaprovechado por su nivel de contaminación. Por ello este río ha sido designado como un Área Bajo Régimen de Administración Especial (ABRAES); siendo su alto grado de alteración corroborado por Yánes (1980), Guillén (1982), Lugo (1982), Raíces (1982) y Rivera (1982), quienes exponen que existe una gran alteración en la composición fisicoquímica y biológica de los sólidos disueltos, sólidos suspendidos y sedimentos de fondo.

Por ello, el estudiar los sólidos suspendidos en el Río Tuy permitirá estimar la degradación de la calidad del agua y los efectos negativos en la ecología acuática; y de esta manera conocer los cambios ocurridos en su medio ambiente, desde los estudios previos realizados en la zona.

Por todo lo anteriormente expuesto, el proyecto plantea determinar el grado de contaminación por metales pesados en la cuenca del Río Tuy. En este sentido, se realizará un estudio de la concentración de los sólidos suspendidos y de los metales pesados asociado a ellos. De esta manera se conocerá la situación actual de la cuenca del Río Tuy; referencia que podría contribuir a desarrollar estrategias y administración de control de contaminación en este medio ambiente.

OBJETIVO GENERAL

Determinar la concentración y distribución de metales pesados en los sólidos suspendidos de la Cuenca del Río Tuy.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la concentración de los sólidos suspendidos en el Río Tuy.
- Determinar la concentración de los metales pesados (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Mn, Pb, Al, Zn, Hg) en los sólidos suspendidos del Río Tuy.
- Realizar una correlación del nivel de contaminación actual de la cuenca del Río Tuy con trabajos previos en la zona.

MARCO TEÓRICO

En esta sección se presentan algunos fundamentos teóricos que apoyarán los aspectos relevantes que abarca esta investigación.

El material transportado por los ríos proviene principalmente de la disolución de minerales de las rocas expuestas de la corteza terrestre, que involucran los procesos de meteorización, erosión y transporte, siendo esenciales el agua y el viento para dichos procesos (llamados por ello agentes de meteorización). Este material transportado, se encuentra en forma disuelta y sólida (sólidos suspendidos y sedimentos de fondo). (Audry y col., 2006; Kennedy y Zellweger, 1974).

Los sólidos suspendidos, que representan una parte de la fase sólida transportada por los ríos, es un término que se refiere a la masa (mg) o la concentración (mg/l) de material inorgánico y orgánico, la cual se mantiene en la columna del agua por turbulencia. Estos sólidos suspendidos son partículas que presentan un tamaño superior a 0,45 μm (Audry y col. 2006; Kennedy y Zellweger, 1974). Estudios en los ríos a nivel mundial indican que los sólidos suspendidos están principalmente compuestos por partículas de tamaño de grano entre 0,45 y 62 μm (Billota y Brazier, 2008; Waters, 1995). Teniendo, generalmente, las partículas en medio acuoso un rango de tamaño que va desde óxidos coloidales a zooplancton grande o agregados fecales (10^{-3} mm - 10 mm) (Rodríguez y Marín, 1999).

Los sólidos suspendidos en aguas naturales están caracterizados por una gran diversidad composicional. Los sólidos inorgánicos consisten principalmente en aluminosilicatos procedentes de la erosión física y meteorización de las rocas continentales, representado por arcillas y oxihidróxidos de Fe y Mn. Estas partículas inorgánicas constituyen la mayor parte de la materia suspendida transportada por los ríos. Por otro lado, están presentes partículas orgánicas, de restos biológicos y partículas inorgánicas que están cubiertas por materia orgánica (Stumm y Morgan, 1996).

Factores que controlan la abundancia, distribución y composición de los sólidos suspendidos

Según Gibbs (1967), la carga de los ríos está controlada por una serie de factores que varían las características y la concentración de los sólidos suspendidos (sólidos disueltos y sedimentos de fondo). A continuación se mencionan dichos factores:

Litología. El tipo de roca que interaccione con el agua del río, definirá la composición geoquímica y la concentración del sólido suspendido. La composición geoquímica del sólido suspendido incluye la forma, la angularidad, el tamaño de grano, la composición mineralógica y la composición química (Billotta y Brazier, 2008). Este factor se encuentra supeditado a la precipitación atmosférica, la superficie de escorrentía, infiltración, temperatura, entre otros; que pueden variar considerablemente las características del sólido suspendido (Rodríguez y Marín, 1999; Gaillardet y col., 1999).

Otro factor importante lo constituye la **Vegetación**. La mecánica de erosión causa el aporte de partículas al sistema del río, luego del proceso de meteorización; y la cobertura vegetal disminuye dicha acción erosiva. Tramblay (2010) expone que el porcentaje de cobertura vegetal resulta una de las variables más importantes para estimar la concentración de sólidos suspendidos, mediante modelos de regresión. Por ello, la escorrentía en zonas urbanas, con poca protección vegetal, contiene una carga significativa de sólidos suspendidos (Davis y col., 2001; Restrepo y col., 2006; Tessier y col., 1979). Otro aspecto al resaltar es que la acción de las raíces en los suelos conlleva una mayor cohesión entre los granos, lo que inhibe la erosión y resulta una menor disponibilidad de dichos granos como sólidos suspendidos en el sistema fluvial.

Relieve. Este factor está relacionado con la pendiente del terreno por donde drena el río; dado que una mayor pendiente está asociada a una mayor energía de transporte, por lo que si existen granos disponibles, éstos serán transportados al río. Por tal motivo, las altas concentraciones de valores de sólidos suspendidos son probablemente debidas al incremento en la velocidad del agua del río que está directamente ligada a su capacidad de transporte. Por ello, se puede decir que el relieve va a inducir un nivel de energía de transporte al río, el cual mientras mayor es, mayor será la cantidad de sólidos suspendidos, puesto que en esta condición los mencionados sólidos estarán siendo transportados y no sedimentados. Se ha observado que un ambiente sedimentario fluvial de baja energía de transporte está representado por sólidos suspendidos de grano fino, tipo arcilla;

en contra parte, los ríos con alta energía de transporte, pueden tener en suspensión a sólidos suspendidos de tamaño de grano grueso, tipo arena muy fina (Bloom, 1999).

Clima. Este factor se encuentra bien caracterizado con los parámetros temperatura y precipitación atmosférica media. Por un lado, el aumento de la temperatura acelera el proceso de meteorización, colocando una cantidad de partículas disponibles para ser erosionadas y transportadas hasta los ríos. Por el otro, las altas precipitaciones atmosféricas producen un aumento de la cantidad de sólidos suspendidos; y una disminución de la cantidad de los sólidos disueltos. Debido a esto, generalmente, las altas concentraciones de sólidos suspendidos están relacionadas a las altas descargas de agua, dicha tendencia se debe probablemente al proceso de resuspensión temporal de los sedimentos de fondo del río, que ocurre por el aumento de la energía de transporte del agua del río conferida por la introducción de agua meteórica al sistema fluvial, que es capaz de transportar transitoriamente los sedimentos de fondo someros que estaban depositados (Carvalho, 2002).

Actividad antrópica. Las actividades antrópicas generan un gran aporte de sólidos suspendidos y sólidos disueltos al sistema acuático, que pueden alterar drásticamente las condiciones del mismo. Las fuentes principales de las partículas suspendidas son los sedimentos de fondo procedentes de la escorrentía superficial en las zonas urbanas. Este aporte se deriva de la corrosión de edificios, depositación atmosférica, residuos sólidos urbanos y, desechos y derrames industriales (Davis y col., 2001). En general, las grandes cargas que transportan un río contaminado están relacionadas con las mayores descargas de efluentes de zonas urbanas, por lo que la concentración de sólidos suspendidos es mayor (Salomão y col., 2001).

Las perturbaciones antropogénicas traen como consecuencia un gran incremento de la concentración de los sólidos suspendidos en el agua. Esta variación de las condiciones naturales del río produce efectos físicos y químicos. Entre los efectos físicos están la reducción de la penetración de la luz, cambios de la temperatura y el relleno de los canales y reservorios cuando los sólidos son depositados. Estos efectos causan aumento del costo del tratamiento del agua, reducción de la navegación de los canales y descenso en la longevidad de presas y reservorios de agua (Billota y Brazier, 2008; Lloyd y col., 1987; Ryan, 1991; Verstraeten y Poesen, 2000). Dentro de las alteraciones de índole químico están la liberación de contaminantes a los cuerpos de agua, como metales pesados, pesticidas, materiales orgánicos y nutrientes (como el fósforo); y

esto afecta de forma negativa el ecosistema fluvial (Dawson y Macklin, 1998; Kronvang y col., 2003; Haygarth y col., 2006; Ryan, 1991).

Birkett y col., (2007) determinaron que una concentración de 200 mg/l de sólidos suspendidos produce una reducción mayor del 50 % de la biomasa que comprende los productores primarios, en los cuales se tienen las algas. Asimismo, con una concentración de sólidos suspendidos igual a 488 mg/l se alcanza una tasa de mortalidad del 50 % de los salmones jóvenes Chinook (Stober y col., 1981). Ambos estudios fueron realizados en cuerpos de aguas ubicados en Estados Unidos.

Dentro de las sustancias dañinas para los cuerpos de agua, provenientes de las actividades del hombre, se encuentran los metales pesados. Un metal pesado es aquel elemento que tiene número atómico superior a veinte (20), excepto los metales alcalinos y los alcalinotérreos; o cuya densidad es igual o superior a 5 g/cm^3 cuando está en forma elemental. Su presencia en la corteza terrestre es menor al 0,1 % y casi siempre inferior a 0,01 %. (Blanco, 2007). Éstos son frecuentemente detectados en los sedimentos y en la columna de agua del río (Akçay y col., 2003; Olivares y col., 2005). Windom y col. (1991) reportaron que en promedio aproximadamente 62 %, 40%, 92 % y 80 % de las cantidades totales de Cd, Cu, Pb y Zn son transportados por los sólidos suspendidos por los ríos de la costa este de Estados Unidos. Por ello, la presencia de metales pesados en solución en escorrentías urbanas es motivo de preocupación ya que son más tóxicos, debido al aumento de la biodisponibilidad y concentración; teniendo como ejemplos el Pb y Zn, que han sido reconocidos como contaminantes relacionados al tráfico (Sansalone y Buchberger, 1997).

Debido a la importancia de los metales pesados como contaminantes, en la **tabla N° 1** son presentadas las principales fuentes antrópicas de metales pesados que pueden ser introducidos al sistema fluvial.

Los metales pesados viajan preferencialmente en las partículas de menor tamaño que conforman el sólido suspendido, ya que los compuestos de estos metales son insolubles en agua y asociados a estas partículas, de gran área y carga superficial, adquieren estabilidad en el medio acuoso. Dichas partículas (tipo arcilla) son fácilmente transportadas, pero, finalmente, pasarán a formar parte del sedimento (Guillén, 1982; corroborado por Perhac y Whelan, 1972).

Tabla N° 1. Principales fuentes antrópicas de metales pesados (Forstner y Wittman, 1981; Bautista, 1999; Klein y col. 1974; MOPU, 1982)

Fuente	Metales pesados
Riego	Cd, Se y Pb.
Fertilizantes	Cd, Cr, Cu, Co, Ni, Pb, Zn, As, B, Ba, Ce, Be, Br, Mo, Ni, Hg, Sn, Zr, Sr, Rb, Se, Sc, Te, U, V y Mn
Pesticidas	Pb, As, Br, Cu, Cr, Hg, V y Zn
Abono	Cr, Cu, Co, Ni, Pb, Zn, As, B, Ba, Ce, Be, Br, Mo, Ni, Rb, Sn, Zr, Sr, Rb, Se, Sc, Te, U, F, Ge y Mn
Lodos residuales	Cd, Cr, Cu, Co, Ni, Hg, Pb, Zn, As, B, Ba, Ce, Be, Br, Ge, Mo, Ni, Rb, Sn, Zr, Sr, Rb, V y Mn
Fundidoras	Cd, As, Hg, Sb, In, Se y Pb.
Automóviles	Pb, Cd, Cu y Cr.
Combustión del carbón	Pb, As, Se y Sb.
Pinturas	Pb y Cd
Baterías eléctricas	Cd, Cu, Pb y Ni
Cementos	Cr
Papeleras y similares	As, Cu, Cr, Hg, Pb y Zn
Pigmentos y tintes	Sb, Cd, Co, Cr, Cu, Pb, Ni y Zn
Minerías	Pb, As, Sb, Cu, Cr, Ni, Zn, Cd y Hg
Plásticos	Sb, Cd, Cr, Zn
Textiles	Sb, Cu, Cr, Zn
Cerveceras	Cu y Zn
Alimentos diversos	Cu, Cr, Ni y Zn

La concentración y movilización de los metales traza está relacionada con el tamaño y tipo de partículas que componen el sedimento. De este modo el As es adsorbido en las fases de óxidos de Fe, y el Pb es sorbido en las fases de óxido de Mn; mientras que, otros metales como Cd, Co, Cu, Mo, Ni, V y Zn están sorbidos en las arcillas (como las esmectitas). En la fase de materia

orgánica, dentro de la fracción fina de los sedimentos, se pueden presentar altas concentraciones de Hg, Cu, Ni, V y Zn (Siegel, 2002).

En el ambiente acuático, los metales pesados están usualmente distribuidos en los sólidos disueltos, los sólidos suspendidos (los cuales comprenden los coloides) y la fase sedimentaria. Sin embargo, principalmente se encuentran en las fases de sólidos suspendidos y en los sedimentos de fondo; y en ciertas condiciones, más del 99 % de los metales pesados pueden acumularse en estas dos fases (Salomons y Stigliani, 1995).

Esto se debe al comportamiento de los sólidos suspendidos como sistemas coloidales. Las características particularmente relevantes de los sistemas coloides son: a) Debido a su enorme área superficial, la química está controlada por propiedades superficiales, lo que permite una mayor probabilidad de que las sustancias sean adsorbidas en su superficie; y b) Los coloides poseen una carga eléctrica superficial debido a la adhesión de iones, teniéndose que cada partícula del sistema coloidal tiene carga del mismo signo (negativo o positivo), y ello significa sitios de adsorción disponibles.

Todo lo anteriormente expuesto permite definir la contaminación de las aguas como la acción o efecto de introducir elementos, compuestos o partículas capaces de modificar las condiciones del cuerpo de agua superficial (o subterráneo) de manera que se altere su calidad, en relación con los usos posteriores o con su función ecológica para el desarrollo de la vida acuática y ribereña (Colin, 2001).

Factores que influyen en la distribución y movilidad de los metales pesados en los sedimentos del agua del río.

pH. El pH se define como la medida de la actividad de iones hidronios en el medio acuoso. Este factor es de mucha importancia, debido a que influye en las reacciones químicas que ocurren en las aguas naturales (involucrado con procesos sedimentarios) afectando la solubilidad de las especies químicas. Un ejemplo de ello es el Fe; cuya solubilidad en medio acuoso, a un valor de pH 6, es mucho mayor que para un pH de 8,5. Por su parte, el aluminio permanece en solución a pH 3 como Al^{3+} , mientras que a pH 7 precipita como $\text{Al}(\text{OH})_3$, y a pH 8 permanece en solución como $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ (González, 1982). De lo último, se puede desprender la premisa de que el pH interviene en la especiación de los elementos, como lo son los metales pesados. De igual forma, el pH también influye en la carga de la superficie de los óxidos y de la materia orgánica, así como

en la solubilidad de carbonatos y sulfuros; esto debido a que los H^+ y OH^- se localizan en los espacios de adsorción en la superficie de las partículas, definiendo considerablemente sus cargas (Du Laing et al., 2008). En resumen, mientras el pH disminuye, la intensidad de la adsorción y la movilidad disminuyen; y la biodisponibilidad aumenta (Gundersen y Steinnes, 2003).

Materia orgánica. La reacción de complejación es la que gobierna la interacción entre la materia orgánica (presente como parte de la fase de los sólidos suspendidos) y los metales pesados. En los ríos naturales, la materia orgánica está principalmente compuesta por sustancias húmicas y fúlvicas (Peng y col., 2009). Por lo tanto, la degradación de la materia orgánica en la fase de sólidos suspendidos y sedimentos de fondo aeróbicos conlleva la liberación de los metales pesados que están absorbidos o acomplejados (Theofanis y col., 2001; Kelderman y Osman, 2007).

Potencial oxidación-reducción (Eh). Es la medida de la disponibilidad de electrones en el medio; es decir, condiciones oxidantes o reductoras del ambiente. Los metales responden de diferentes maneras a los cambios de Eh. En un ambiente reductor, el Fe permanece en solución como Fe^{2+} y en un ambiente oxidante precipita como Fe_2O_3 (González, 1982; Du Laing y col., 2008). Los iones de metales tales como Zn, Cu y Hg pueden ser móviles en aguas oxidantes, pero cuando son movilizados a un ambiente sulfato reductor, precipitan como minerales de sulfuros (Siegel, 2002). En el ambiente acuático óxico, el que controla en buena medida en la distribución de los metales pesados es el SO_4^{2-} y los compuestos producto de la descomposición de la materia orgánica. En contra parte, en un ambiente acuático anóxico, la química del H_2S es el que controla el comportamiento de los metales pesados. Una variación de las condiciones del sistema, como el cambio de condiciones anóxicas a condiciones oxidantes, puede producir, por ejemplo, que los metales pesados puedan ser liberados al agua, colocando en riesgo el agua y a los organismos.

El potencial redox o Eh está íntimamente relacionado con el **oxígeno disuelto**. La presencia del oxígeno es esencial en el agua para la vida de los organismos que allí habitan, y es el principal agente oxidante de este sistema. Este parámetro puede indicar contaminación elevada si presenta valores bajos, dado que indica condiciones de degradación de materia orgánica o una actividad bacteriana intensa, en la cual se consumen oxígeno; y el sistema resulta perjudicial o fatal para la fauna y flora acuática. Por ello se le puede considerar como un indicador de contaminación. Por otro lado, la presencia de oxígeno disuelto en el agua depende de la temperatura, la presión y los iones en solución (Fukue et al., 2007; Yong et al., 2006).

Es importante destacar que los factores del pH, materia orgánica y Eh son los de mayor importancia, dado que una pequeña variación de la concentración de H^+ , e^- y materia orgánica cambiará la especie del metal pesado y esto afectará su coeficiente de reparto, es decir, definirá si se acumulará en la fase disuelta o en la fase sólida, y de qué forma preferencialmente. Sin embargo, hay otros factores que afectan la distribución de los metales pesados en los sólidos suspendidos. Entre estos factores se encuentran la temperatura, la capacidad de intercambio catiónico, la conductividad eléctrica y el potencial iónico.

El parámetro de la **temperatura** influye, por lo general, en el retardo o aceleración de la actividad biológica, la absorción de oxígeno, la precipitación de compuestos, los procesos de mezcla, floculación, sedimentación y filtración. Múltiples factores, principalmente ambientales, pueden hacer que la temperatura del agua varíe continuamente, a pesar de su alta capacidad calórica. También el aumento de temperatura aumenta la solubilidad de las sales; igualmente asciende la velocidad de las reacciones del metabolismo, acelerando la putrefacción, aunque disminuye la solubilidad de los gases. Garnier y col., (2006) donde se determinó que el incremento de la temperatura produce el descenso gradual de la adsorción.

La **capacidad de intercambio catiónico** (CIC) es la competencia entre los cationes por un ligando o anión, ello definirá su movilidad y/o capacidad (Emile y Jhonathan, 1998). La CIC y la **salinidad** están relacionadas. Esta última es un parámetro referido a la concentración de iones o sales disueltas en el agua. Sí la concentración de iones en el agua es alta, mayor será la salinidad y viceversa. Además, un aumento de la salinidad es asociada con un incremento en las concentraciones de los principales cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , que compiten con los metales traza por los sitios de sorción (García y Dorronsoro, 2000; Du Laing et al., 2008). Una mayor salinidad indica mayores iones en competencia, lo cual afectará a la especiación de los metales disueltos y el nivel de toxicidad.

La **conductividad eléctrica** (CE) es una medida que se realiza al agua pura la cual refleja los iones en disolución; siendo esta medida proporcional a la cantidad y características de esos electrolitos. Se ha determinado que a mayor iones en solución, hay mayor movilidad de los metales pesados en el agua. (García y Dorronsoro, 2000; Du Laing et al., 2008). Por esto se usan los valores de conductividad como índice aproximado de concentración de solutos.

El **potencial iónico** (densidad de carga) se refiere a la relación carga/radio del ión. Este potencial muestra el grado de hidratación de una especie química, influyendo en la capacidad de

solvatación de los elementos en agua (González, 1982). Los elementos con bajo potencial iónico, tales como Na, Ca y Mg, permanecen en solución durante el proceso de meteorización y transporte; mientras que elementos con potencial iónico intermedio, son precipitados por hidrólisis, siendo sus iones asociados con grupos hidroxilos procedentes de las soluciones acuosas; y elementos con potencial iónico aún más elevado, forman aniones conteniendo oxígeno, que son a su vez solubles.

Los efectos de muchos factores pueden influenciar el coeficiente de partición de un ión, incluyendo el pH, la concentración de sólidos suspendidos, la concentración del ión per se, la concentración materia orgánica disuelta, la concentración de materia orgánica en partículas, la dureza del agua y la fuerza iónica. (Lu y Allen, 2001). Para la mayoría de los metales pesados, el pH, el potencial redox, el contenido y características de la materia orgánica, la fuerza iónica y la textura del sólido suspendido (o sedimento de fondo) son los factores dominantes que determinan la movilidad y la biodisponibilidad en las aguas; haciéndose más importantes con el aumento de la salinidad (Beefink et al., 1982; Rozema et al., 1990).

Específicamente, en el caso de una disminución del pH y potencial redox, la disponibilidad de hierro y manganeso soluble e intercambiable se vería favorecida (Gotoh y Patrick, 1974; Hesse, 1971); mientras que un incremento del pH bajo condiciones de anoxia, causaría la precipitación de los metales como sulfuros insolubles, que se inmovilizarían e irían acumulando gradualmente en el sedimento (Rodríguez y Marín, 1999).

En función de todos los factores mencionados, es posible afirmar que los cambios en las condiciones fisicoquímicas promueven la fijación de los metales pesados a los sólidos suspendidos y a los sedimentos de fondo, por lo que fungen como un importante medio de transporte y fuente de metales pesados. De igual forma las variaciones fisicoquímicas pueden inhibir la adsorción de los metales pesados (importante mecanismo de transporte), lo que trae como consecuencia que los metales sean biodisponibles (Theofanis, 2001).

En otro sentido, Tessier y col., (1979); Yu y col., (2001) y Hakanson y col., (2003), determinaron que los metales pesados en los sólidos suspendidos pueden estar:

- Adsorbidos en superficies de arcillas u oxihidróxidos de Fe y Mn.
- Acomplejados con la materia orgánica
- Ocluidos en materiales amorfos.
- En la estructura de minerales secundarios como carbonatos, sulfatos y óxidos.

- En la estructura de minerales primarios como silicatos.

Mecanismos fisicoquímicos que influyen en la movilidad de los metales pesados

Existen varios mecanismos fisicoquímicos que imperan en la movilidad de los metales pesados en el sistema fluvial, lo cual definirá su distribución entre la fase disuelta y la fase sólida del río. Los mecanismos fisicoquímicos más importantes son nombrados a continuación:

Adsorción. Es el proceso fisicoquímico superficial que consiste en la acumulación de materia en la interfase sólido-agua, es decir, es el proceso mediante el cual, los átomos, moléculas o iones se adhieren a una superficie por fuerzas que pueden ser electrolíticas, tipo Van Der Waals, entre otras. En el sistema natural, el proceso de adsorción ocurre frecuentemente entre los metales pesados y las arcillas; debido a que ésta última posee una carga superficial generalmente negativa, y una alta área superficial; lo cual hace energéticamente favorable la adhesión de los metales en la superficie de las arcillas (Castellan, 1998; Green y col., 2001).

Algunos principios que gobiernan la adsorción se pueden establecer de la siguiente manera:

- La cantidad adsorbida incrementa a medida que incrementa su área superficial.
- La adsorción se ve favorecida si el metal forma con el sólido suspendido un compuesto de baja solubilidad. Un ejemplo de ello, es la adsorción de iones fosfatos por el hidróxido de hierro.
- La cantidad del metal adsorbido de una solución incrementa con su concentración en la solución.
- Los iones con carga más alta son adsorbidos más rápidamente que los iones con carga más baja.

Peng y col., (2009) basados en experimentos de adsorción-desorción, determinaron que los metales pesados asociados más recientemente a los sólidos suspendidos son menos estables en esa condición que los que llevan más tiempo adsorbidos.

La **floculación** es la formación de partículas gruesas (flóculos) como resultado de la agregación de partículas más pequeñas, que se encuentran en movimiento en un sistema. Este mecanismo se encuentra en el campo del sistema coloidal. El proceso de floculación es generalmente acelerado por medios mecánicos, físicos y químicos, como el aumento del flujo de turbulencia, que permite la mayor interacción entre las partículas (Yariv y Cross, 1979). Es importante señalar que

investigaciones realizadas por Phillips y Walling (1995), Droppo (2001) y Jonas y Millward (2010) han demostrado que el transporte de sólidos suspendidos, y por ende los metales pesados, ocurre frecuentemente en la forma de grandes agregados de flóculos. Estos sólidos suspendidos coloidales que se forman, pueden ser cristalinos o amorfos, y se pueden formar a partir de partículas más pequeñas que se congregan en partículas de tamaño coloidal. Durante este proceso, mientras el agregado coloidal crece, su densidad efectiva (considera el volumen total que ocupa = considera la masa y los espacios vacíos) generalmente decrece, y su velocidad incrementa en función de que la energía del medio tiene mayor área superficial donde hacer contacto para transportarla, cumpliéndose un equilibrio hidrodinámico (Tambo and Watanabe, 1979; Dyer and Manning, 1998). Es importante acotar el proceso de “biofloculación”, que ocurre por medio de partículas con cobertura orgánica las cuales poseen largas cadenas de moléculas de este tipo. Por ejemplo, polímeros naturales que tienen la capacidad de aglutinar otras partículas (Underwood and Paterson, 2003; Underwood, 2010).

El ***intercambio iónico***. Es el proceso mediante el cual una estructura mineral o amorfa remueve iones de cargas positivas (cationes) o negativas (aniones), de una solución salina, que transfiere otros iones de carga similar a la solución en una cantidad equivalente. Este fenómeno está controlado por la naturaleza de las especies involucradas y las condiciones fisicoquímicas del medio. El tipo de energía involucrada que atrae a los iones hacia el sólido puede ser pura electrostática o parcialmente química (Yariv y Cross, 1979; Rayner-Canham, 2000).

Las arcillas juegan un rol importante en el ambiente actuando como un receptor natural de contaminantes mediante la adsorción de cationes y aniones. Esto ocurre a través del intercambio iónico, la adsorción o ambas. Así, las arcillas invariablemente contienen cationes y aniones intercambiables fijados en su superficie. Algunos de los principales iones que se encuentran en la superficie de las arcillas son por ejemplo: Ca^{2+} , H^+ , K^+ , Na^+ , Cl^- . Estos iones pueden ser intercambiados, relativamente fácil, con otros iones sin afectar la estructura del mineral de arcilla. La gran área superficial, estabilidad química y mecánica, estructura en capas, alta capacidad de intercambio catiónico (CIC), entre otros, han hecho de las arcillas un excelente material que funciona como medio de transporte importantes para los metales pesados en el sistema fluvial.

La ***precipitación*** se refiere a la formación de sólidos mediante el proceso de nucleación en una solución por un incremento en la concentración de las especies; es decir, por sobresaturación de la solución. Este proceso está determinado por la naturaleza de las especies presentes y las

características fisicoquímicas del medio donde tiene lugar (Yariv y Cross, 1979; Rayner-Canham, 2000).

La ***coprecipitación*** consiste en la separación de los compuestos solubles de la solución como respuesta de la precipitación de otro elemento más abundante. A través de este proceso un elemento traza que debería estar en solución, coprecipita junto con oxo-hidróxidos de hierro o carbonatos. Durante la coprecipitación ocurren procesos de adsorción, formación de cristales mixtos, oclusión y captura mecánica (Thornber, 1992). La coprecipitación también se puede definir como el reparto de solutos entre partículas y disolución, es decir, cuando una fase sólida precipita en un sistema multicomponente, iones extraños, metales o ligandos, tienen la posibilidad de ser incorporados en la matriz sólida. Aunque en primera instancia se da un proceso de adsorción, la inclusión de estos iones en el seno de la fase sólida se restringe a los iones cuya valencia y distancia de enlace son próximas a las de los iones que precipitan. (Rodríguez y Marín, 1999). Por ello, cuando las sustancias solubles son arrastradas por un precipitado, se dicen que quedan coprecipitadas. Un ejemplo de coprecipitación por oclusión (por isomorfismo), es el caso del ión Pb que puede ocupar posiciones normalmente ocupadas por el ion Ba en la red cristalina del BaSO₄ y puede ser coprecipitado, aún cuando la concentración de Pb sea tan pequeña que no pueda formarse PbSO₄ como precipitado primario.

El ***acomplejamiento*** es la unión de un átomo o ión central con uno o más ligandos para formar una especie metal-ligando denominada complejo. La solubilidad de muchos cationes puede ser incrementada considerablemente, cuando forman enlaces con compuestos orgánicos o inorgánicos para formar complejos. El acomplejamiento viene dado por la naturaleza de la especie metálica, tipo de ligando y condiciones fisicoquímicas del medio (Rayner-Canham, 2000). Los metales traza pueden ser movilizados por medio de la formación de iones complejos solubles estables de cloruros. Por ejemplo, la estabilidad y solubilidad de CdCl₂ es relativamente más alta que el Cd²⁺; igual sucede para Zn y Hg.

La ***quelatación*** viene dada por la formación de los quelatos, que son compuestos cíclicos organometálicos, en los que el metal es parte de uno o más anillos de cinco o seis miembros, son de baja densidad y solubilidad en agua y a menudo de color intenso. Las especies que determinan este tipo de compuestos son denominados agentes quelatantes (Rayner-Canham, 2000). La materia orgánica puede controlar la movilidad de muchos elementos químicos en el ambiente de meteorización y sedimentación, mediante la formación de diversos complejos organometálicos.

Estas sustancias tienen grupos carboxílicos COOH y fenólicos OH que permiten la quelatación con cationes metálicos.

Por otro lado, es de gran valor indicar que la especiación de los metales traza en aguas naturales es un factor crítico a considerar cuando se va a evaluar el potencial del impacto ambiental. La especiación es importante en términos de biodisponibilidad, transporte y destino en el ambiente acuático, y para los criterios de calidad de agua (Luoma, 1983; Allen, 1993).

El concepto de biodisponibilidad en los ríos se refiere a la concentración de los iones en solución que tienen la posibilidad de entrar en sistemas vivos. Dependiendo de cada organismo, la disponibilidad de cationes y aniones puede ser sorbida o acumulada. La biosorción es un término que describe la remoción de los metales pesados de forma pasiva entre la biomasa y elementos abióticos de soluciones acuosas; ello implica que el mecanismo de remoción no está controlado por el metabolismo. En contraste, la bioacumulación describe un proceso activo donde la remoción de metales requiere la actividad metabólica de un organismo vivo. Las algas marrones son un tipo de biosorbentes que tienen la habilidad de secuestrar los metales pesados (Davis y col., 2003). Por lo tanto, la biodisponibilidad permite el aumento de la bioacumulación, siendo éste un proceso de acumulación progresiva de sustancias químicas en los tejidos de los seres vivos, a medida que se asciende en la cadena alimenticia (Colin, 2001).

El material de los sólidos suspendidos en ríos juega un papel importante en el control de la especiación de metales traza y biodisponibilidad. Esto es debido a que los sólidos suspendidos son caracterizados por partículas con una gran diversidad composicional, y cada composición tiene inherente unas propiedades que regirán la especie química de los metales pesados. Asimismo el grado de movilidad, la actividad y la biodisponibilidad se ven influenciadas por muchos factores, a saber, el pH, temperatura, potencial redox, materia orgánica, procesos de intercambio iónico y la actividad microbiana (Filgueiras et al., 2002).

Índices de contaminación

En el campo de la geoquímica ambiental, son usados ciertos índices, utilizados como criterios para clasificar y conocer el grado de enriquecimiento que tiene el sólido suspendido en un elemento, por lo que dan un buen indicio del nivel de contaminación de un sistema particular. Estos índices de contaminación son el resultado de una normalización geoquímica, las cuales permiten conocer, también, el potencial de toxicidad del sólido suspendido. Entre estos

indicadores, los más utilizados en el análisis ambiental son el factor de enriquecimiento (FE) y el índice de geoacumulación (Igeo).

El factor de enriquecimiento se basa en la estandarización de la concentración de un elemento de prueba contra uno de referencia, identificándose las concentraciones anormales del elemento. De acuerdo a Ergin y col. (1991), el FE se define como:

$$FE = \frac{\left(\frac{Cn}{Cm}\right)_{\text{muestra}}}{\left(\frac{Cn}{Cm}\right)_{\text{referencia}}}$$

donde Cn es la concentración del elemento a estudiar y Cm es la concentración del elemento empleado como referencia. En el denominador se usa el contenido base de ambos elementos en un ambiente de referencia. Como elementos de referencia se emplean generalmente Fe, Al y Ti. De acuerdo a Zhang y Liu (2002), los valores de FE entre 0,5 y 1,5 indican que el metal proviene de un proceso natural, mientras que valores mayores de 1,5 sugieren que la fuente es antropogénica. Sutherland (2000) estableció cinco grados de contaminación del sedimento reconocidos en base al valor del FE, los cuales se presentan en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2. Categorías en base al Factor de Enriquecimiento.

Clases de FE	Grado de contaminación
< 2	Deficiencia de enriquecimiento
2 – 5	Enriquecimiento moderado
5 – 20	Enriquecimiento significativo
20 – 40	Enriquecimiento muy alto
> 40	Enriquecimiento extremadamente alto

Por su parte, el índice de geoacumulación (Igeo) está definido como:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left(\frac{Cn}{1,5Bn} \right)$$

donde Cn es la concentración determinada del metal n en la fracción del sólido suspendido, Bn es el valor de concentración base de ese elemento, y la constante 1,5 es un factor de corrección de

las fluctuaciones naturales de una determinada sustancia en el medio ambiente y pequeñas influencias antrópicas

Muller (1981), distingue el índice de geoacumulación en seis clases, como lo muestra la Tabla N° 3, la cual se muestra a continuación:

Tabla N° 3. Índices de geoacumulación y grado de contaminación asociado.

Valor de Igeo	Clases de Igeo	Grado de contaminación
0	$I_{geo} < 0$	No contaminado
1	$0 < I_{geo} < 1$	No contaminado a moderadamente contaminado
2	$1 < I_{geo} < 2$	Moderadamente contaminado
3	$2 < I_{geo} < 3$	Moderado a fuertemente contaminado
4	$3 < I_{geo} < 4$	Fuertemente contaminado
5	$4 < I_{geo} < 5$	Fuertemente contaminado a extremadamente contaminado
6	$I_{geo} > 5$	Extremadamente contaminado

ANTECEDENTES

En la siguiente sección se presentan investigaciones internacionales y nacionales que proporcionan aportes valiosos a través de las teorías que generaron dichos estudios, fungiendo de soporte y justificación para la realización del presente trabajo.

Internacionales

Woitke y col., (2003) realizaron un muestreo de sólidos suspendidos y sedimentos de fondo a lo largo del Río Danubio (Alemania, Austria, Eslovaquia, Hungría, Croacia, Serbia, Bulgaria, Ucrania y Rumania) y sus principales tributarios; con el fin de evaluar el estado de contaminación de este importante cuerpo de agua, por medio de la determinación de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Pb, Mn, Hg, Ni y Zn. Adicionalmente fueron medidos parámetros químicos y biológicos en agua, sólidos suspendidos, sedimentos de fondo y mejillones, además de estudios de la flora y fauna acuática, así como determinaciones de indicadores bacteriológicos. Los metales pesados fueron sometidos a una digestión ácida (HNO₃:H₂O, 3:2) en un microondas a 160 °C por 25 min. El análisis de las concentraciones de los metales pesados se ejecutó a través del ICP-AES (Perkin Elmer OPTIMA 2000DV); excepto el Hg que fue determinado por inyección de flujo-horno de grafito-AAS (Perkin Elmer 4100 ZL con FIAS 200). Los resultados indican que los metales pesados de la zona de estudio presentan un bajo estado de contaminación por As, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, y Zn, salvo algunos puntos de muestreo en el canal principal y algunos afluentes. No obstante, la concentración de Cd fue alta tanto en los sólidos suspendidos y sedimentos de fondo, en gran parte del Río Danubio.

Helios y col., (2005) determinaron la distribución espacial de la concentración de metales pesados (Cd, Zn, Pb, Cu, Ni, Cr, Hg, Mn, Fe y As) en agua, sólidos suspendidos y sedimentos de fondo en el Río Odra (Polonia-Alemania-República Checa), para evaluar su nivel de contaminación y estimar las formas químicas de los metales y su movilidad en los sólidos del río. Las muestras de agua fueron filtradas (< 0,45 µm) para separarlas de los sólidos suspendidos. Por su parte, las muestras de sólidos suspendidos y sedimentos de fondo fueron sometidas a un ataque ácido con agua regia en un horno de microondas. Para determinar las formas químicas de los metales pesados se hizo uso del método de extracción secuencial propuesto por Förstner y col., (1990).

Las determinaciones de concentraciones de metales fueron realizadas por ICP-AES. Los resultados de los análisis arrojaron que las muestras de agua están fuertemente contaminadas con Cd, Cu y Zn, siendo la sección media del Río Odra la más afectada. Los sólidos suspendidos y sedimentos de fondo se encontraron altamente contaminados con Cd y Zn, y en menor medida Hg, Cu y Pb. Sin embargo, la contaminación por metales pesados disminuyó, especialmente para Zn, Pb y Cu, con respecto a resultados de investigaciones precedentes en la misma zona. Y a partir de los estudios de especiación se obtuvo que los elementos Cd, Zn y As presentan una alta movilidad en el Río Odra.

Zhang (2009) realizaron un análisis de metales pesados (Al, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn) en los sedimentos superficiales, de la zona intermareal del Río Yangtze (China), para evaluar el grado de contaminación de los mismos; lo cual fue realizado a través del Factor de Enriquecimiento y el Índice de Geoacumulación. Las muestras se sometieron a una digestión ácida con 5 % H₂O₂ y 0,2 M HCl para disolver la materia orgánica. Posteriormente, las muestras fueron tratadas con HNO₃:HClO₃:HF (15ml:5ml:5ml). La concentración de los elementos Cd y Pb fueron analizados en un horno de grafito AAS (Perkin Elmer Analyst 800), y las concentraciones de Al, Fe, Cr, Cu, Mn, Ni y Zn fueron medidas en un Perkin Elmer Plasma 2000 (espectrometría de emisión atómica inductivamente acoplado a plasma). Las concentraciones obtenida fueron (en mg/kg, en peso seco): Al, 40,803–97,213; Fe, 20,538–49,627; Cd, 0.12–0.75; Cr, 36.9–173; Cu, 6.87–49.7; Mn, 413–1,112; Ni, 17.6–48.0; Pb, 18.3–44.1; y Zn, 47.6–154; respectivamente. Por otro lado, el FE indica que están enriquecidos el Cd (en 52 estaciones), Cr (en 54 estaciones), Cu (en 5 estaciones), Ni (en 26 estaciones), Pb (en 5 estaciones) y Zn (en 5 estaciones). Los índices calculados permiten determinar que el Cd, Cr y Ni están enriquecidos en lo amplio de la zona, mientras que Cu, Mn, Pb y Zn están enriquecidos localmente. Además, el Cd está asociado con el carbón orgánico, mientras que Cu, Cr, Ni, Pb y Zn están asociados al Mn.

Nacionales

Lugo (1982) determinó la distribución y abundancia de los elementos Fe, Co, Pb, Zn, As, Ni, Mn, Cd, Cu, Hg, Cr y C orgánico, en sólidos suspendidos de la cuenca del Río Tuy, en dos épocas principales, una de sequía y otra de lluvia. Los elementos fueron determinados por espectrofotometría de absorción atómica, a excepción del As que se analizó por el método de generación de hidruros y el mercurio por el método de vapor frío; a su vez el carbono fue determinado por volumetría. Los resultados indican que la concentración de Pb, Zn, As, Cd, Cu, Hg, Cr y C orgánico son atribuidos a las actividades domésticas, industriales y agropecuarias, que presentan mayor influencia en época de lluvia; adicionalmente los elementos Fe, Mn, Ni y Co son atribuidos principalmente a la litología de la zona; determinando a su vez, que la mayor concentración de sólidos suspendidos está presente en época de lluvia.

Guillen (1982) evaluó el grado de contaminación a través del estudio de Fe, Co, Pb, Zn, As, Ni, Mn, Cd, Cu, Hg, Cr y C orgánico, en sedimentos de fondo de la cuenca del Río Tuy, así como también la composición granulométrica, de puntos estratégicos, y la concentración de los elementos por fracción granulométrica en puntos estratégicos. Los resultados indican que los elementos Fe, Mn, Cr, Ni y Co provienen de la litología de la zona, mientras que los elementos Pb, Zn, As, Ni, Cd, Cu, Hg y C orgánico son atribuidos a fuentes agropecuaria, domésticas e industriales.

Rivera (1982) estudió la existencia de contaminación en la cuenca del Río Tuy, por medio de la medición, en muestras de agua, de pH, el oxígeno disuelto, la temperatura, la conductividad y la determinación de las concentraciones de los elementos Cu, Co, Cr, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn en los períodos de sequía y lluvias. Los resultados permitieron señalar que la zona situada aguas arriba de El Consejo no presentó evidencias de contaminación, presentando características similares a los afluentes no contaminados. Las zonas de El Consejo-Tácata y Araguaita-Agua Clara presentaron contaminación por compuesto orgánicos, reflejado en los bajos valores obtenidos de oxígeno disuelto, mientras que los altos valores de conductividad indicaron contaminación inorgánica en cuanto a sólidos disueltos se refiere. No se encontraron indicios de contaminación ácida o básica a lo largo del río, a excepción de la Hacienda Santa Teresa donde se apreció un valor anormal de pH (ácido). Los elementos Fe, Mn, Ni y Co poseen un control natural por lo que

no indican contaminación, a diferencia de Cr, Cu, Pb y Zn que provienen de fuentes antrópicas. De los afluentes estudiados el río Guaire ejerce mayor influencia negativa en la composición de las aguas del Río Tuy, en oposición, los ríos Taguaza y Cuira tienen el mayor efecto en cuanto al mejoramiento de las aguas del río Tuy. Otra conclusión del autor es que los elementos estudiados están predominantemente en la fase de los sólidos suspendidos.

Mogollón (1985) determinó la distribución y abundancia de los elementos Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, C orgánico, Mn, Ni, Cu, Co, Cr, Pb, Zn y Cd, en la fracción menor de 120 mallas de sedimentos de la cuenca del Río Tuy. Las muestras de sedimentos fueron tomadas en las épocas de lluvia y sequía. Los resultados de los análisis de las muestras indican que las zonas más afectadas son Guayas-Santa Teresa y Araguaita-Panaquire; donde existe contaminación por los elementos Ca, Mg, C orgánico, Pb, Zn, Cr y Ni. Por su parte, el Río Guaire y el Río Caucagua ejercen una influencia importante en el deterioro de las condiciones del Río Tuy en su cuenca baja ya que aportan cantidades considerables de Ca, Mn, Pb, Cd y Zn. Las concentraciones de Na, K, Al y Fe presentes en los sedimentos son de origen natural. El transporte y la acumulación de los elementos Mg, Ni, Cu, Pb, Co, Zn y Mg en las partes del sistema consideradas contaminadas están controlados por la materia orgánica. Los oxihidróxidos de Fe controlan el comportamiento de los elementos Mg, Co y Cu en los sitios limpios, además de Mn, Cr y Cd, con los cuales están asociados en todo el sistema. El período de lluvia ejerce una influencia beneficiosa sobre los sedimentos del Río Tuy, disminuyendo las concentraciones de las especies químicas estudiadas.

Mogollón (1989) realizó un estudio geoquímico con el objetivo de establecer como los factores antrópicos, litológicos, de la precipitación y la vegetación, influyen en los parámetros fisicoquímicos de las aguas tales como: conductividad, oxígeno disuelto, temperatura y pH. Para tal fin, determinó la concentración de los metales pesados Fe, Mn, Cr, Co, Cu, Cd, Ni, Pb, Zn y C orgánico en los sedimentos de fondo de la cuenca del Río Tuy. Los resultados indican que las mayores concentraciones de Cr y Ni están asociadas con rocas ultramáficas. En los sitios contaminados Pb, Zn y C orgánico están enriquecidos hasta cuatro (4) veces; siendo los dos primeros indicadores del tráfico automotor y de la actividad industrial. La influencia de la litología, precipitación y vegetación indica que es necesario establecer las líneas base para cada área bajo estudio cuando se realizan estudios de Geoquímica Ambiental.

Medina (2000) estudió los niveles de concentración de los elementos Cd, Zn, Cu, Cr, Hg, Pb y C orgánico en sólidos suspendidos del Río Guaire, a través de la técnica de espectroscopia de emisión atómica-plasma inductivamente acoplado, mientras que el Hg fue analizado por el ultrasonido (Equipo Transsonic TP 690), a su vez el carbono fue determinado por el método de Walkely-black (1934). Los resultados de correlaciones lineales indican una contribución de efluentes domésticos, agropecuarios e industriales, señalados por parte de los elementos Cu, Pb, Hg, Zn y C orgánico. Los metales Cd y Cr, por su parte, presentan los valores mínimos en los ríos no intervenidos.

Acosta y col., (2002) establecieron los niveles de metales pesados (Cu, Mn, Fe, Zn, Cd, Ni, Pb y Cr) en sedimentos superficiales en tres zonas litorales de Venezuela. Los elementos fueron analizados por la técnica de absorción atómica, utilizando un espectrofotómetro Perkin Elmer (Mod. 3110). Los sedimentos recolectados se trabajaron a base de 10 réplicas. Los resultados indican que en Río Chico y Boca de Paparo presentaron altas concentraciones de metales pesados debido a las influencias y descargas del Río Tuy; mientras que playa Guiria no mostró contaminación por metales pesados.

Blanco, (2007) determinó la concentración y distribución de los metales pesados Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Ni, Pb, V y Zn; en sólidos suspendidos del Río Guaire. Estos sólidos suspendidos fueron sometidos a un proceso de digestión ácida parcial con HCl 1 M y agua regia (HCl:HNO₃, 3:1). Los resultados indican que los elementos Cu, Zn, Pb, Co y Cd, están asociados a la fase de carbonatos y compuestos amorfos, en forma absorbida e intercambiables, influenciado por actividades antrópicas; mientras que el Al, Fe, Mg, Ni, Cr y V, fueron extraídos mayormente con agua regia, lo que sugiere que los mismos están asociados a oxihidróxidos de mayor grado de cristalinidad, así como a las arcillas, influenciado por un control litológico; al igual que el Ca, pero este se debe a la erosión de carbonatos de la cuenca.

Orozco (2009) analizó la distribución granulométrica y la concentración de los elementos Au, Al, Mg, Cu, Pb, Zn, As y Sb, en sedimentos en la cuenca del Río Cuira, afluente del Río Tuy. Con respecto a su distribución granulométrica, los resultados indican que la fracción granulométrica que predomina en la zona es de tipo arena muy gruesa. Para la determinación de los elementos, los sedimentos fueron tratados químicamente a través de un proceso de digestión ácida

secuencial, con HCl y HNO₃, para luego ser analizados por espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (AES-ICP). Los resultados obtenidos arrojaron que los elementos Zn y Cu tienden a enriquecerse en la fracción más fina (limo y arcillas). Por su parte, los elementos Al y Mg se distribuyen homogéneamente en la cuenca; mientras que no ocurre lo mismo con los elementos Cu, Pb y Zn. Asimismo, los elementos Sb y As están enriquecidos en una subunidad al este de la cuenca (metatobas).

Los estudios señalados anteriormente facilitan comprender los procedimientos, métodos, resultados y conclusiones de dichas investigaciones, las cuales permitirán correlacionar con los resultados de este proyecto.

ZONA DE ESTUDIO

Ubicación

La cuenca del Río Tuy tiene un área aproximada de 6600 Km² y se encuentra ubicada en la región nor-central de Venezuela, abarcando la parte centro-oriental del Estado Aragua y la zona central del Estado Miranda (Ramírez, 1990). Su nacimiento se encuentra en la vertiente sur de la Serranía del Litoral a unos 2400 metros de altura, cerca del Pico Codazzi (2429 m.s.n.m), al norte de la Colonia Tovar, estado Aragua. Allí corre en dirección norte-sur; luego se desvía para tomar una dirección oeste-este hasta su desembocadura en Boca de Paparo, Miranda (Picard, 1968).

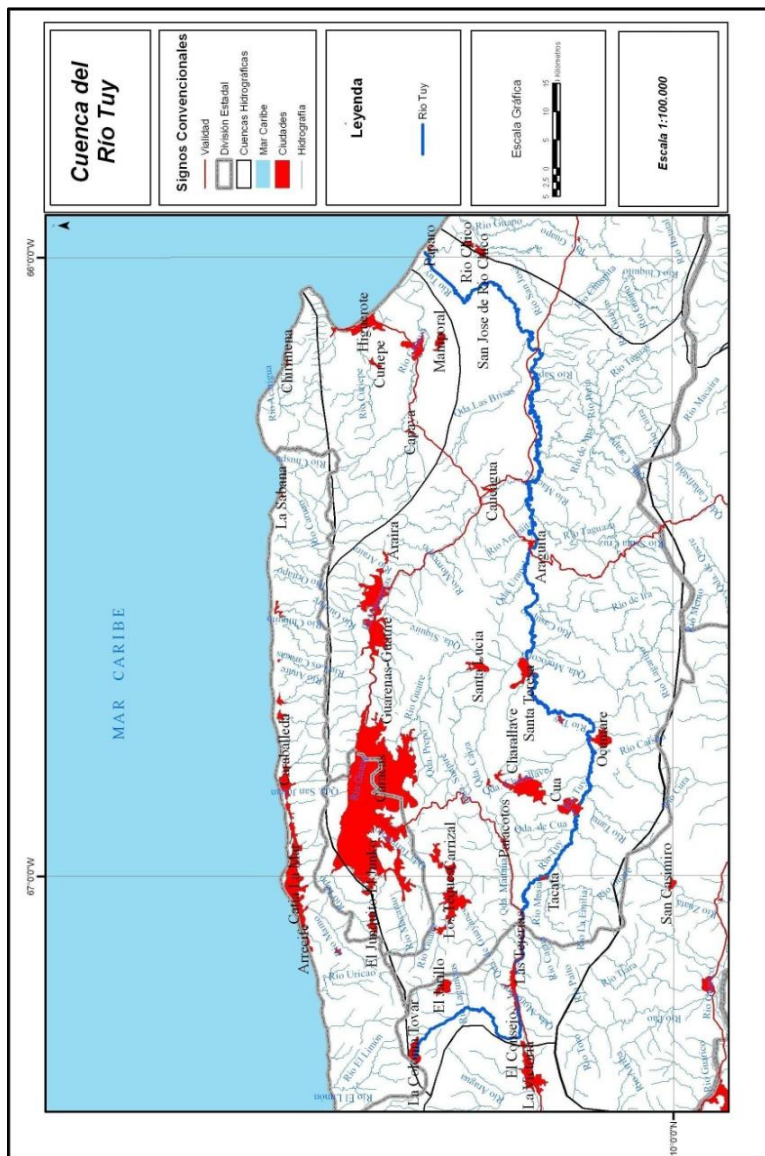


Figura 1. Cuenca del Río Tuy

Geología de la Cuenca del Río Tuy

La cuenca del Río Tuy drena las siguientes formaciones geológicas:

Formación Las Mercedes

Esta formación aflora al noroeste de la Cuenca de Santa Lucía-Ocumare del Tuy. La unidad consiste de esquistos calcáreo-grafitoso-micáceo-sericíticos, filitas grafitoso-sericíticas, calizas recristalizadas y meta-areniscas; la mayoría de estas rocas son calcáreas. (Picard, 1968).

Formación El Caño

La unidad se compone de metatobas laminadas, filitas tobáceas, conglomerados volcánicos, metalavas y “sills” hipabisales y se extiende a lo largo de la Serranía del Interior en los estados Carabobo, Aragua, Miranda y Guárico (González y col., 1980).

Las metatobas máficas constituyen el 75% del volumen de rocas dentro de la formación y constituyen la litología más característica de ella. El conjunto de minerales metamórficos cuarzo-albita-pumpellyta-estilpnomelano es el más común y aparecen en casi todas las metatobas. (González y col., 1980).

Formación Siquire

Esta formación consiste de areniscas líticas con cemento calcáreo y limonitas bien estratificadas, intercaladas con lutitas laminadas y astillosas con restos de vegetales y peces, conglomerados, algas calizas y margas. La característica resaltante de la unidad es la interstratificación de capas delgadas con contactos bien definidos y el desarrollo de algunas capas gruesas de conglomerados. (Picard, 1968; Gonzalez de Juana y col., 1980)

Formación Tuy

Es una unidad de sedimentos poco consolidados restringida a la Cuenca de Santa Lucía-Ocumare del Tuy con localidad tipo en la carretera Petare-Santa Teresa, entre Puente Pichao y La Virginia. El ambiente sedimentario de la formación es fluvio-lacustre. (Picard, 1968),

La formación Tuy se caracteriza por una intercalación monótona de capas de 1 a 3 m de espesor de gravas heterogéneas y conglomerados líticos mal consolidados, con matriz limo-arcillosa abundante y a veces con cemento calcáreo, intercaladas con arcillas y lutitas y cantidades menores de margas y areniscas. (González y col., 1980).

Formación Aramina

La localidad tipo de la Formación Aramina es la quebrada Aramina, tributaria norte del río Tuy, que atraviesa la carretera Caucagua-Higuerote 7 Km al suroeste de Capaya. La Formación comienza con un conglomerado basal de 50 a 60 m de espesor con estratificación gruesa. Sobre este paquete hay una sección interestratificada de areniscas, conglomerados y calizas impuras, a la que le siguen lutitas de color gris verdoso dominantes y areniscas. (González y col., 1980).

Formación Cumaca

La localidad tipo de esta formación es la Quebrada La Cumaca, subtributario del río Tuy, que cruza el camino a Araguaita 7 kilómetros al suroeste de Caucagua. La sección tipo se extiende desde un punto 515 metros aguas arriba del cruce entre el camino y la quebrada, hasta otro punto ubicado 325 metros aguas abajo del cruce. La unidad se restringe al extremo oeste de la ensenada inferior del Tuy, Miranda oriental. La litología consiste en lutitas grises verdosas, achocolatadas y negras, y arcillas lutíticas con un porcentaje relativamente pequeño de areniscas. (González y col., 1980).

Clima del la cuenca del Río Tuy

La investigación de Yanes, 1980 señala que las temperaturas medias en la Cuenca del Río Tuy se encuentran entre 25 °C y 30°C, con extremos de 12°C en las noches más frescas del mes de Enero y de 40°C en los días más calurosos del mes de Mayo.

Posee un clima tropical de altura, con valores pluviométricos que varían entre 800 a 2800 mm promedio anual. Presentándose dos épocas bien definidas: una época lluviosa, en la cual cae el 80% del promedio anual de precipitación y la cual ocurre durante los meses de Mayo a Octubre; y una época de sequía con un 20% del promedio anual de precipitación y que dura desde

Noviembre hasta Abril. La mayor precipitación media, 1100-1500 mm/año, se registra hacia la Colonia Tovar. (Yánes, 1980; FUNDAMBIENTE, 2006).

Otras características que vale la pena resaltar para entender el sistema fluvial del Tuy es que el río propiamente nombrado es aprovechado desde su zona alta, donde abastece la ciudad de Los Teques hasta la región baja, además los tributarios son fuentes importantes para el sistema de abastecimiento de la Gran Caracas, a través de 9 embalses. Asimismo, es un importante receptor de aguas servidas desde la zona alta, principalmente por el río Guaire, el cual en toda su extensión recibe aguas servidas, desde cerca de Los Teques, incluyendo la totalidad de las aguas servidas domésticas e industriales de la Zona Metropolitana de Caracas. Por su parte, el Río Grande, tributario del río Tuy aguas debajo de la afluencia del río Guaire, recibe las descargas de aguas servidas de Guarenas y Guatire. En la región baja, el río Tuy tiene uso como fuente de abastecimiento para riego y es receptor del drenaje de tales áreas, lo cual traslada hacia la desembocadura en el mar (FUNDAMBIENTE, 2006).

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

En este apartado del trabajo se plantea las diferentes etapas que se realizaron dentro de la parte experimental, con la finalidad de cumplir los objetivos planteados en la presente investigación.

La primera etapa fue la *etapa de pre-campo*. En ella se desarrolló el plan de desmuestre, en el que se eligieron y ubicaron los puntos de muestreo de sólidos suspendidos en el Río Tuy, y en sus afluentes más importantes. Todo ello se encuentra enmarcado en los criterios de muestreo planteados por Yáñez, (1980); Lugo, (1982); Guillén, (1982) y Rivera, (1982), para diagnosticar los casi 260 km que comprende el Río Tuy, y también poder comparar de forma correcta los resultados que se obtenga en este trabajo con investigaciones previas. Dichos criterios se encuentran basados en lo siguiente:

- Previa estaciones del Ministerio del Ambiente.
- Vías de acceso.
- Litología.
- Actividades Industriales.
- Actividades Agrícolas
- Poblaciones.

Los puntos de muestreo en la cuenca del Río Tuy establecidos fueron 36. Dichos puntos de muestreo están distribuidos en 19 puntos en el Río Tuy, y 17 puntos que corresponden a los afluentes. En cada punto se planteó obtener una muestra de sólidos suspendidos, a la cual se le haría la determinación de un conjunto de metales pesados (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Mn, Pb, Zn). La ubicación de cada punto de muestreo están señalados en la *Tabla 3* y *Tabla 4*. En la primera tabla se indica los puntos de muestreo en el Río Tuy, y en la segunda tabla se muestra los puntos de muestreos de los afluentes.

Tabla N° 4. Puntos de muestreo en el Río Tuy

N°	Ubicación	N°	Ubicación
1	Colonia Tovar	11	Ocumare
2	Hacienda Buen Paso	12	Lagartijo
3	Hacienda Torre Casa	13	Santa Teresa del Tuy
4	El Consejo	14	Taguacita-Tuy
5	Hacienda Santa Teresa	15	Araguita
6	Guayas	16	Panaquire
7	Boca de Cagua	17	El Samán
8	Tuy antes de Guare	18	San Juan-Galpones
9	Tácata	19	Boca de Paparo
10	Cúa		

Tabla N° 5. Puntos de muestreo de los tributarios más importantes del Río Tuy

N°	Ubicación	N°	Ubicación
1	Quebrada Guayas	10	Río Taguacita
2	Río Guare	11	Río Taguaza
3	Quebrada Cúa	12	Río Caucagua
4	Río Tarma	13	Río Cuirá
5	Quebrada Ocumarito	14	Río Panaquirito
6	Quebrada Charallave	15	Quebrada Yaguapo
7	Río Marare	16	Quebrada Urba
8	Río Súcuta	17	Río Sapo
9	Río Guaire		

La segunda etapa que se ejecutó fue la **etapa de campo**. Ésta comprendió las salidas de campo en la que se tomaron las muestras de sólidos suspendidos; y en la que se realizaron mediciones *in situ* de los parámetros fisicoquímicos que se muestran a continuación: pH, Eh, conductividad, alcalinidad, caudal, oxígeno disuelto, turbiedad y temperatura. Además, esta etapa incluyó la

toma de muestra de agua en recipientes plástico de 500 ml para determinar la concentración de sólidos suspendidos.

Para la toma de las muestras de sólidos suspendidos se siguieron dos metodologías. En la primera (**1era**) de ellas se tomaron las muestras en bidones de 25 litros de capacidad. De manera detallada, esta primera metodología de toma de muestra consistió en: a) Recolectar agua del río en dos envases de plásticos de 25 litros, llenos al ras; b) Dejar reposar unos minutos el agua en los recipientes para que los sólidos suspendidos sedimenten, y luego decantar para preconcentrar los sólidos. En cada cuerpo de agua, la operación previa, se realizó las veces que se consideró necesarias para obtener una buena cantidad de sólidos suspendidos; c) Con la ayuda de un embudo de plástico se traspasó el contenido de los envases plásticos a los bidones de 25 litros.

La segunda metodología experimental (**2da**) fue empleada en los puntos de muestreo donde el caudal del río era alto, y la captación de la muestra era más adecuada desde el puente sobre el mismo. Los pasos seguidos para este demuestre fueron los siguientes: a) Recolección de agua del río mediante un recipiente de plástico sujeto a una cuerda; b) Llenado de agua de cuatro recipientes de plástico de 25 litros, y dejar reposar por dos horas; c) Decantado del agua de los recipientes y trasvasado de los sólidos suspendidos recolectados a un recipiente de plástico de 3,9 litros (galón), con la ayuda de un embudo de plástico. Luego se repetía toda la operación; obteniéndose de esta manera dos muestras en el mismo lugar.

A continuación se inició la *etapa de post-campo*. Esta fase del estudio se subdivide en dos: tratamiento físico y tratamiento químico realizados en el laboratorio. El primero de ellos consistió en la decantación de cada muestra y la colocación en envases de plástico de 2 litros con forma de plato los sólidos suspendidos, para obtenerlos con la menor cantidad de agua posible; dado que luego se dejaron reposar a temperatura ambiente hasta la sequedad. Y finalmente fueron recogidos en una bolsa plástica.

En esta fase se incluye la determinación de la concentración de los sólidos suspendidos. Un primer método (**A**) consistió en la filtración de las aguas recolectadas en los recipientes de plásticos de 500 ml haciendo uso de un papel de filtro de 0,45 μm , previamente pesado. Luego que la muestra de agua de río fue filtrada, se dejó secar a temperatura ambiente el papel de filtro y al secarse se pesó. De esta manera, por sustracción, se obtiene la masa de sólidos suspendido que viaja en 500 ml de agua de río. El segundo método (**B**) utilizado para calcular la concentración de sólidos suspendidos consistió en llenar al ras cuatro recipientes de plásticos de

25 litros de capacidad con agua de río; luego de 2 horas se decantaban y se recolectaba todo el sólido suspendido, con la menor cantidad de agua posible, en un recipiente de 3,9 litros. Posteriormente, se decantó la muestra en un recipiente de plástico de 2 litros con forma de plato para eliminar el agua y obtener finalmente los sólidos suspendidos secos. Finalmente se pesaba los sólidos suspendidos y se conocía que masa de sólidos suspendidos viajan en 100 litros de agua de río.

Por su parte, el tratamiento químico de las muestras consistió en la digestión ácida de sólidos suspendidos, para determinar los elementos Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Mn, Pb, Zn. Para ello se siguió la metodología de digestión ácida secuencial de Moreno, 2009. La misma consiste en pesar 2 g de muestra de sólidos suspendidos, y dentro del beaker donde se encuentran, agregar 40 ml de HCl (1 M), lo cual se agita constantemente durante 3 horas y se deja reposar por 12 horas aproximadamente. Luego de esto, la solución se filtra utilizando un papel de filtro Advantec de 0,45 μm , para separar la fracción soluble asociada al ácido, la cual consiste en carbonatos, hidróxidos amorfos y especies sorbidas superficialmente. Esta fracción se enrasa en un balón aforado de 50 ml, y el residuo insoluble se lava con agua deionizada y se deja secar. Posteriormente se le agrega 10 ml de HNO_3 concentrado al residuo (incluyendo el papel de filtro) y se calienta la solución a 95 $^\circ\text{C}$, aproximadamente, durante 2 horas y se agita constantemente. La solución obtenida se filtra y de esta forma se obtienen los elementos asociados a la materia orgánica, oxi-hidróxidos cristalinos, las arcillas de baja cristalinidad y los sulfuros. Esta metodología se puede observar esquematizada en la **figura 2**.

La determinación de la concentración de los metales pesados, excepto el Hg, se realizaron utilizando la técnica espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (EEA-ICP).

La determinación de Hg siguió la siguiente metodología. Se pesó 0,2 g de la muestra y se colocó en capsulas de níquel, las cuales fueron insertadas en el equipo DMA~80 (Analizador Directo de Mercurio); para llevar a cabo su análisis. Este instrumento permite una buena medición de mercurio dado que utiliza una alta energía cinética, lo que conviene por la alta presión de vapor a temperatura ambiente del mercurio.

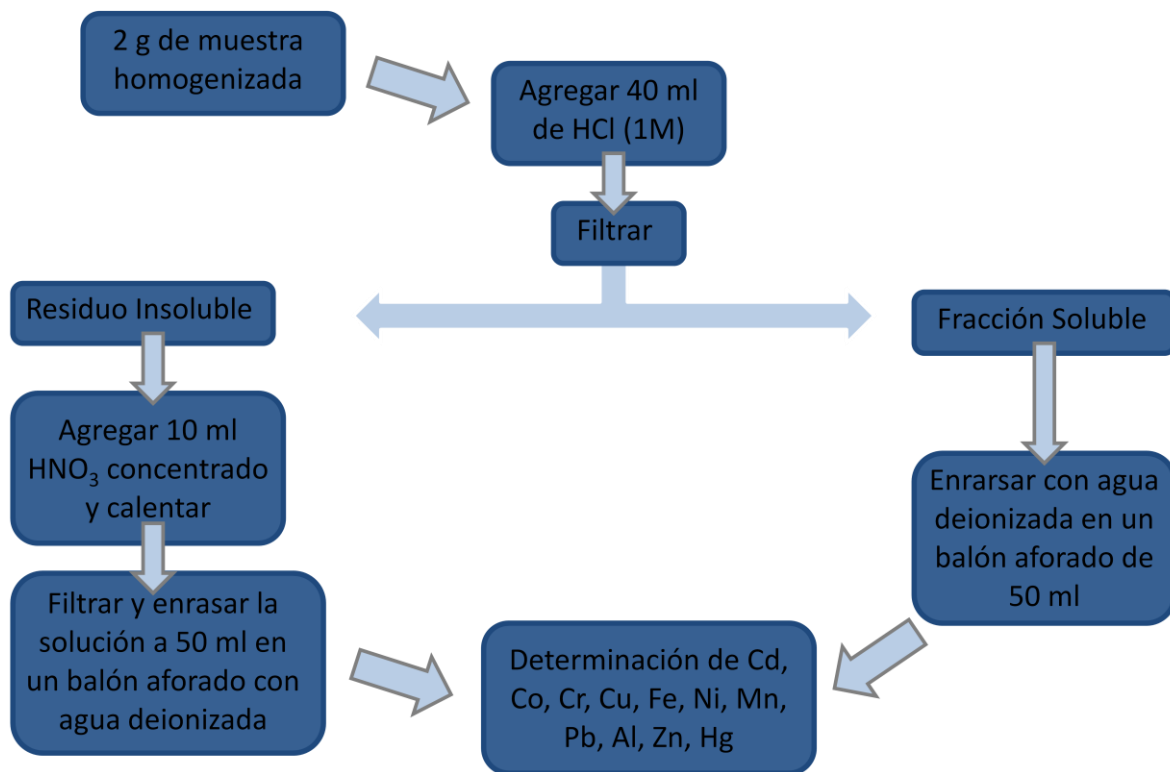


Figura 2. Tratamiento químico de los sólidos suspendidos

Tratamientos de datos

Esta etapa consistió en el tratamiento estadístico de los datos obtenidos, calculándose media, desviación estándar, coeficiente de variación y límite de confianza (95 %). Además se calcularon coeficiente de correlación, factor de enriquecimiento y coeficiente de partición, permitiendo obtener una apreciación sobre la distribución espacial de los sólidos suspendidos y de los metales pesados asociados a ellos.

Asimismo fueron realizados histogramas de la distribución en el Río Tuy de la concentración de sólidos suspendidos y de las concentraciones elementales. Además se realizaron gráficos de correlación de concentración de los elementos estudiados en la solución de HCl 1 M y HNO₃ concentrado, y correlación entre elementos, con la finalidad de estimar asociaciones entre los mismos.

PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección son presentados y discutidos los resultados obtenidos en la etapa de campo y en la etapa de laboratorio. En primera instancia, son expuestos los resultados de los parámetros medidos en campo tales como: pH, conductividad eléctrica, temperatura, alcalinidad, entre otros. Posteriormente, se presentarán las determinaciones realizadas en el laboratorio; iniciando con la concentración de sólidos suspendidos obtenida para cada punto de muestreo. A continuación son mostrados los resultados de concentración de Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb y Zn a lo largo del Río Tuy, según la extracción realizada con HCl 1 M y la con HNO₃ concentrado, medidos con EEA-ICP. Por su parte el Hg fue medido con el DMA-80. De igual forma serán presentadas diferentes correlaciones, y finalmente las comparaciones con otros trabajos.

Parámetros fisicoquímicos

Al captar cada muestra de sólidos suspendidos en los cuerpos de agua de la cuenca del Río Tuy se realizaron las mediciones de diversos parámetros fisicoquímicos, con el objetivo de conocer sus características actuales. La **tabla N° 6** señala el pH, conductividad eléctrica, temperatura y alcalinidad, en función de la distancia (km) de cada punto de muestreo con respecto al nacimiento del Río Tuy. En la **tabla N° 7** se puede observar los valores de caudal, oxígeno disuelto y turbiedad de sólo algunos puntos de muestreo. Por su parte, la **tabla N° 8** muestra el Eh para varios sitios estudiados en este trabajo. Es importante destacar que debido a problemas de logística sólo en algunos puntos de muestreo fue posible medir caudal, oxígeno disuelto, Eh y turbiedad.

Las mediciones realizadas son de gran importancia porque proporcionan información de interés para entender el comportamiento de los sólidos suspendidos y de los metales pesados estudiados, y comprender los valores de sus concentraciones determinadas.

Tabla N° 6. Medidas de distancia y parámetros fisicoquímicos en el Río Tuy.

Punto de muestreo	Distancia (km)	pH	Cond. (µS/cm)	Temp. (°C)	Alcalinidad (HCO₃⁻ mg/L)
Colonia Tovar	0	6,9	184,0	16,5	44,6
Hda. Buen Paso	21	7,7	345,0	21,8	139,5
Hda. Torre Casa	27	7,8	369,0	24,9	148,8
Hda. Santa Teresa	30	8,0	397,0	24,5	160,0
El Consejo	34	7,8	377,0	23,8	141,4
Qda. Guayas	39	7,6	937,0	28,5	297,6
Guayas	40	7,7	708,0	29,8	245,6
Boca de Cagua	44	6,4	713,0	26,4	353,5
Tuy antes Guare	58	7,7	445,0	25,0	156,3
Río Guare	59	8,1	351,0	24,7	199,1
Tácata	59	7,7	433,0	25,5	167,4
Cúa	70	7,6	436,0	27,5	167,4
Qda. Cúa	71	7,4	1853,0	29,5	375,8
Río Tarma	76	7,8	387,0	28,2	202,8
Río Ocumarito	83	7,3	556,0	27,8	236,3
Qda. Charallave	85	7,7	1331,0	33,6	368,3
Ocumare	86	7,4	737,0	27,6	260,4
Río Marare	89	7,4	312,0	26,3	135,8
Río Súcuta	90	8,0	311,0	26,3	163,7
Lagartijo	103	7,3	658,0	29,7	234,4
Sta Teresa del Tuy	113	7,3	656,0	29,9	213,9
Río Guaire	117	6,7	606,0	27,4	271,6
Río Taguacita	129	7,6	153,6	27,1	78,1
Taguacita-Tuy	130	7,5	677,0	26,7	195,3
Araguita	144	7,3	648,0	30,8	206,5
Río Taguaza	151	7,4	134,1	29,3	63,3
Río Caucagua	161	6,3	694,0	28,2	245,6
Río Cuira	171	7,4	212,0	NM	99,0
Panaquire	186	7,6	463,0	27,6	157,2
Río Panaquirito	187	7,4	183,5	26,4	63,0
Qda. Yaguapo	193	7,6	170,2	25,2	72,0
Qda. Urba	193	7,2	188,9	25,3	84,0
Río Sapo	197	6,9	133,3	25,8	58,2
El Samán	202	6,9	482,0	28,1	166,2
San Juan-Galpones	228	7,1	486,0	27,3	135,8
Boca de Paparo	262	7,1	476,0	27,6	160,2
Afluentes			NM: no medido		
Río Tuy					

Tabla N° 7. Medidas adicionales de campo en el Río Tuy.

Localidad	Caudal (m ³ /s)	OD (mg/l)	Turbiedad (NTU)
Colonia Tovar	0,12	7,2	6,3
El Consejo	1,25	7	80,4
Boca de Cagua	2,4	6,7	6,4
Tácata	3,4	6,8	289
Ocumare	8,58	4,8	>1000
Río Guaire	14,07	5,8	519
Taguacita-Tuy	24,48	1,6	>1000
Río Caucagua	11,62	4,2	381
Panaquire	149,85	2,4	346
San Juan-Galpones	74,42	1,1	>1000

Tabla N° 8. Medidas de Eh en algunos puntos del río Tuy.

Punto	Eh (mV)	Punto	Eh (mV)
Hda. Buen Paso	215	Qda. Cúa	-111
Hda. Torre Casa	119	Qda. Ocumarito	42
Hda. Santa Teresa	89	Qda. Charallave	112
Qda. Guayas	67	Ocumare	70
Guayas	70	Río Súcuta	33
Tuy antes Guare	73	Lagartijo	115
Río Guare	18	Sta. Teresa del Tuy	67
Tácata	106	Taguacita	100
Cúa	240	Araguita	155

De acuerdo con la Metodología Experimental discutida anteriormente, se procedió a determinar la concentración de sólidos suspendidos conforme a dos métodos diferentes. A continuación se indica cuál método fue empleado en cada punto de muestreo.

Tabla N° 9. Metodologías de toma de muestra de sólidos suspendidos en el Río Tuy

Lugar	1era	2da
Colonia Tovar	-	-
Hda. Buen Paso	√	-
Hda. Torrecasa	-	-
El Consejo	-	√
Hda. Sta. Teresa	√	-

Continuación de tabla N° 9. Metodologías de toma de muestra de sólidos suspendidos en el Río Tuy

Lugar	1era	2da
Qda. Guayas	√	-
Guayas	√	-
Boca de Cagua	-	√
Tuy antes Guare	-	-
Río Guare	√	-
Tácata	√	√
Cúa	√	-
Qda. Cúa	√	-
Río Tarma	-	-
Río Ocumarito	√	-
Qda. Charallave	√	-
Ocumare	√	√
Río Marare	-	-
Río Súcuta	√	-
Lagartijo	√	-
Sta. Teresa del Tuy	√	-
Río Guaire	-	√
Taguacita-Tuy	-	√
Río Taguacita	-	-
Araguita	√	-
Río Taguaza	-	-
Río Caucagua	-	√
Río Cuira	√	-
Panaquire	-	√
Río Panaquirito	-	-
Qda. Yaguapo	-	-
Qda. Urba	-	-
Río Sapo	-	-
El Samán	-	-
San Juan-Galpones	-	√
Boca de Paparo	√	-

Concentración de sólidos suspendidos

La aplicación de los métodos propuestos dependía fundamentalmente del acceso al río y el caudal del mismo. La **tabla N° 10** indica cuál método se realizó en cada punto de muestreo. Existen casos particulares, como por ejemplo Tácata y Ocumare en la que se emplearon ambos métodos debido a que se realizó el muestreo dos veces en estos sitios, y el tiempo lo permitió. Por otro lado existe el caso de los ríos Sapo y Panaquirito, entre otros, en los cuales se percibió una muy baja concentración de sólidos suspendidos, por lo que la muestra no pudo captarse.

Tabla N° 10. Métodos para la determinación de la concentración de sólidos suspendidos.

Lugar	A	B	Lugar	A	B
Colonia Tovar	-	-	Río Súcuta	√	-
Hda. Buen Paso	√	-	Lagartijo	√	-
Hda. Torrecasa	√	-	Sta. Teresa del Tuy	√	-
El Consejo	-	√	Río Guaire	-	√
Hda. Sta. Teresa	√	-	Taguacita-Tuy	-	√
Qda. Guayas	√	-	Río Taguacita	-	-
Guayas	√	-	Araguita	√	-
Boca de Cagua	-	√	Río Taguaza	√	-
Tuy antes Guare	√	-	Río Caucagua	-	√
Río Guare	√	-	Río Cuira	-	√
Tácata	√	√	Panaquire	-	√
Cúa	√	-	Río Panaquirito	-	-
Qda. Cúa	√	-	Qda. Yaguapo	-	-
Río Tarma	√	-	Qda. Urba	-	-
Río Ocumarito	√	-	Río Sapo	-	-
Qda. Charallave	√	-	El Samán	-	-
Ocumare	√	√	San Juan-Galpones	-	√
Río Marare	√	-	Boca de Paparo	-	√

Es importante mencionar que la discusión sobre la concentración de sólidos suspendidos empleará la nomenclatura “(A)” y “(B)”, lo cual indicará que método se utilizó para medir dicha concentración en el punto de muestreo establecido. Para cada punto de muestreo se estipuló determinar la concentración de sólidos suspendidos y de metales pesados. Sin embargo, para algunos puntos no se pudo lograr este objetivo, debido a su baja concentración de sólidos

suspendidos. Por ello, en la **tabla N° 11** son señaladas las determinaciones efectuadas para cada muestra.

Tabla N° 11. Determinaciones realizadas a las muestras de sólidos suspendidos del Río Tuy.

	CSS	Hg	MP	Lugar	CSS	Hg	MP
Colonia Tovar	-	-	-	Río Súcuta	√	√	√
Hda. Buen Paso	√	√	-	Lagartijo	√	√	√
Hda. Torrecasa	√	-	-	Sta. Teresa del Tuy	√	√	√
El Consejo	√	√	√	Río Guaire	√	√	√
Hda. Sta. Teresa	√	√	-	Taguacita-Tuy	√	√	√
Qda. Guayas	√	√	√	Río Taguacita	-	-	-
Guayas	√	√	√	Araguita	√	√	√
Boca de Cagua	√	√	√	Río Taguaza	√	-	-
Tuy antes Guare	√	-	-	Río Caucagua	√	√	√
Río Guare	√	√	-	Río Cuirá	√	√	
Tácata	√	√	-	Panaquire	√	√	√
Cúa	√	√	-	Río Panaquirito	-	-	-
Qda. Cúa	√	√	-	Qda. Yaguapo	-	-	-
Río Tarma	√	-	-	Qda. Urba	-	-	-
Río Ocumarito	√	√	-	Río Sapo	-	-	-
Qda. Charallave	√	√	√	El Samán	-	-	-
Ocumare	√	√	√	San Juan-Galpones	√	√	-
Río Marare	√	-	-	Boca de Paparo	√	√	√

CSS = Determinación de concentración de sólidos suspendidos

Hg = Determinación de mercurio.

MP = Determinación de metales pesados (Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn)

Es importante resaltar, que las muestras de sólidos suspendidos fueron recolectadas en los meses de julio, agosto y octubre del 2010, durante la época de lluvia de la cuenca hidrográfica. Las muestras El Consejo (B), Boca de Cagua, (B), Tácata (B), Ocumare (B), Río Guaire (B), Taguacita-Tuy (B), Río Caucagua (B), Panaquire (B), San Juan-Galpones (B) y Boca de Paparo (B) son muestras captadas en agosto correspondientes a una campaña de muestreo en colaboración con el Laboratorio Nacional de Hidráulica (LNH).

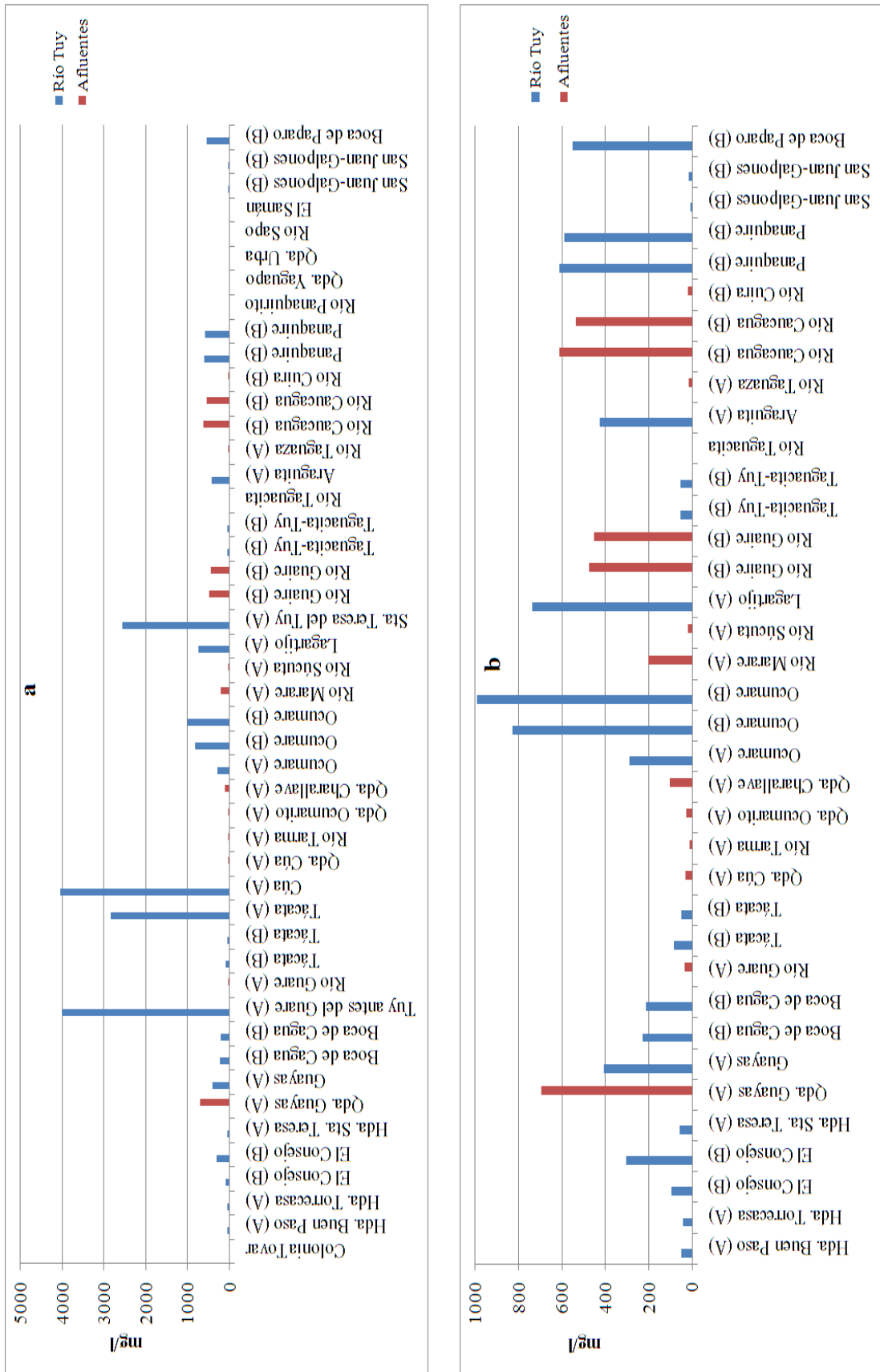


Figura 3. Distribución de la concentración de sólidos suspendidos a lo largo de la cuenca del Río Tuy.

En la **figura 3a** se ilustra la concentración de los sólidos suspendidos a lo largo del Río Tuy, desde su nacimiento hasta la desembocadura. En primera instancia se observa una tendencia a aumentar progresivamente la concentración, iniciando con 50 mg/l en Hacienda Buen Paso y finalizando en Boca de Paparo con una concentración 10 veces mayor (551 mg/l); presentando una concentración promedio de 304 mg/l, aproximadamente. No obstante, es claramente notorio la existencia de un grupo de puntos de muestreo que presenta concentraciones muy altas de sólidos suspendidos; representado por Tuy antes del Guare (4016 mg/l), Tácata (A) (2834 mg/l), Cúa (4039 mg/l) y Santa Teresa del Tuy (2572 mg/l).

La gran cantidad de sólidos suspendidos en Tuy antes del Guare y Tácata (A) se deben en gran medida a areneras ubicadas en esas zonas, debido a que las actividades concernientes a esa labor coloca una importante suma de granos disponibles para ser transportados por el río. Por su parte, el alto valor de sólidos suspendidos en Cúa puede ser una suma de la carga de sólidos provenientes de los puntos anteriores (Tuy antes del Guare y Tácata) y de desechos de origen antrópico (urbanizaciones residenciales). Es importante destacar que las muestras Tácata (B) fueron tomadas aguas arriba de las areneras, por ende las concentraciones de sólidos suspendidos no están influenciadas por esta actividad, razón por lo cual dichas concentraciones son notoriamente menores que la medida en la muestra Tácata (A). Por último, en Santa Teresa del Tuy, el río principal recibe un importante aporte de desechos por la alta densidad poblacional de la zona, aunado a actividad industrial y a la alta carga de sólidos que el río viene transportando.

En segundo orden, en la **figura 3b** se muestra de forma más clara la distribución de la concentración de los sólidos suspendidos del resto de las estaciones, con la exclusión de los predominantes puntos de muestreo (Tuy antes del Guare, Tácata (A), Cúa y Santa Teresa del Tuy). Además de los puntos de muestreo a los cuales no fue determinado la concentración. De esta manera, se destacan, de mayor a menor: Ocumare, Lagartijo, Panaquire, Boca de Paparo, Araguaita y Guayas. Por el lado de Ocumare y Lagartijo, su principal fuente de sólidos es la actividad industrial y la alta actividad poblacional. En Panaquire se ve claramente la influencia de la descarga al río Tuy del río Caucagua, el cual es un afluente que recoge las descargas de efluentes de la población de Caucagua. Con respecto a Boca de Paparo se refleja la gran cantidad de sólidos suspendidos, sobre todo de grano fino, que se mantiene a pesar de la disminución de la pendiente, que induciría una menor velocidad de transporte y a la sedimentación de los granos

más grueso (Henríquez, 2011). Esto concuerda con la disminución del caudal del Río Tuy de Panaquire a Boca de Paparo (**tabla N° 7**).

En este sentido, se observa en los primeros 25 km del río, un dominio de factores topográfico y estructurales, como barras de canales, que producen una reducción de la energía de transporte, determinando que los granos de mayor tamaño (predominantemente tamaño arena muy gruesa a gruesa) no viajen por esta sección del río, (Henríquez, 2011); manteniendo sólo el material de grano más fino. El caso es diferente en los puntos ubicados en las menores alturas topográficas con una morfología caracterizada con pendientes menos abruptas, como Santa Teresa del Tuy. Por ello, en Boca de Paparo puede ser transportado principalmente lodo debido a que el río presenta menor velocidad, y es dominado por procesos de floculación y sedimentación por la poca energía del medio Guillen, (1982).

En cuanto al alto valor del dato de concentración de sólidos suspendidos en Araguaita puede ser atribuido principalmente a una cementera y a las actividades agropecuarias realizadas en la zona, la cual contribuye con un aporte bien significativo de sólidos al río. Por último, el sector de Guayas, se ve mayormente influenciado por la contribución del afluente cercano Quebrada Guayas que es un importante centro de actividad industrial y poblacional de la zona. Por ello resulta con una alta concentración de sólidos suspendidos (694 mg/l), superando a Boca de Paparo y cercano a Ocumare.

Los aportes de sólidos suspendidos al Río Tuy por parte de los afluentes Río Guaire y Río Caucagua son relevantes, y esto sugiere ser resaltado. Estos ríos reciben una gran cantidad de desechos que se asocian a la fase de sólidos suspendidos. Dichos desechos son provenientes principalmente de las actividades de Caracas (Río Guaire) y Guarenas-Guatire (Río Caucagua). En otro sentido, sobresale el hecho de que los ríos Guaire y Caucagua, junto a Taguacita, presentan altos valores de caudal, por lo que estos afluentes al desembocar en el Río Tuy aumentan su caudal (**tabla N° 7**).

Otro afluente que resalta es el río Marare. A pesar de ser un cuerpo de agua de muy bajo caudal, presentó un destacable valor de concentración de sólidos suspendidos, el cual no se esperaba; siendo esto adjudicado a que el río es usado como receptor de desechos de las casas aledañas (cercanas al lugar del muestreo) y el agua es utilizada para actividades domésticas.

La magnitud de la concentración de sólidos suspendidos para San Juan-Galpones se estimaba mucho mayor de lo obtenido en este trabajo; dado que en campo este tramo del Río Tuy presentó

características físicas muy similares a los puntos de muestreo adyacentes (Panaquire y Boca de Paparo), observándose un gran caudal (asociado a una alta capacidad de transporte) y una alta turbiedad, además de cursar por terrenos de similares características. Por ello, la predicción era una concentración intermedia entre Panaquire y Boca de Paparo. Por lo tanto, se propone que la muestra fue tomada en un lugar no apropiado o representativo del río, además de tomarse en un muy corto tiempo, lo que pudo acarrear errores durante el desmuestre. Esto igualmente se encuentra aunado al hecho de un bajo caudal temporal en San Juan-Galpones, el cual es particular y notablemente menor que la estación de muestreo de Panaquire producto de precipitaciones aguas arriba de la segunda estación, que fue medida tres horas antes que la primera, el mismo día. En general, los valores de sólidos suspendidos respondieron a varios factores. Algunos de ellos, de control natural, no contribuyeron con el aumento de los sólidos en el agua del Río Tuy. Por ejemplo: la baja velocidad del río, asociado a un bajo caudal y la disponibilidad de granos gruesos (Hacienda Buen Paso); terreno geológico metamórfico, resistente a la meteorización y proveedor de granos muy gruesos que viajan preferencialmente en el fondo por saltación (Henríquez, 2011), sumado a una temperatura fría (16,5 °C) que desinhibe la intensidad de la mencionada meteorización (Colonia Tovar); y procesos de disolución, por aumento de caudal manteniéndose constante la disponibilidad de granos (Tácata (B)). Igualmente en la muestra Taguacita-Tuy, recolectada entre la represa de Taguacita y la desembocadura de este afluente en el Río Tuy, se observó que la previa represión o estancamiento del agua conllevó la sedimentación de los sólidos suspendidos, por lo cual presentó baja concentración de los mismos. Por otro lado, se estima que la concentración de sólidos suspendidos aguas arriba del punto de muestreo de Hacienda Buen Paso (50 mg/l) sea similar a la obtenida en los ríos Tarma (11mg/l) y Taguaza (14 mg/l); debido a que en la Colonia Tovar no se pudo captar muestra, lo que indica una muy baja cantidad de sólidos suspendidos.

Es conocido que existe variabilidad en la concentración de sólidos suspendidos en un mismo punto cuando se toma la muestra en diferentes fechas, pero incluso se da a diferentes horas de un mismo día. Ello fue observado en el punto de muestreo de El Consejo (B), donde dos horas de diferencia trajeron como consecuencia que la primera muestra captada presentara una concentración tres veces menor que la segunda recolectada (97 mg/l y 303 mg/l, respectivamente). Esto se asocia, probablemente, a precipitaciones ocurridas luego de la toma de la primera muestra y el aporte de desechos por acción del hombre.

Según reporta Medina, (2000) la concentración de sólidos suspendidos promedio en ríos no intervenidos es de 23 mg/l. Basado en dicho valor, el Río Tuy se encuentra altamente alterado puesto que la gran mayoría de las concentraciones determinadas sobrepasan este valor, incluyendo muchos de sus afluentes. Se tienen valores que son hasta 200 veces mayor (Cúa). Del mismo modo, Birkett y col., (2007) y Storber y col. (1981), indican varias concentraciones de sólidos suspendidos, señaladas anteriormente en el Marco Teórico, que son perjudiciales para algunos productores primarios (200 mg/l) y peces (488 mg/l).

En función de esos datos, el Río Tuy presenta una contaminación clara por sólidos suspendidos. Billota y Brazier, (2008), concluyen en su investigación que el nivel de daño de los sólidos suspendidos sobre los organismos depende de la concentración, duración de exposición, composición química y tamaño de los sólidos, variando entre organismos y entre ambientes. Igualmente estos autores resaltaron la importancia de los sólidos suspendidos al señalar que éstos son tomados en cuenta como criterio para determinar calidad de agua. El tomar en cuenta a los sólidos suspendidos sea hace notable cuando se conoce la masa asociada a la concentraciones. Por ejemplo, al calcularse la masa de sólidos suspendidos en el punto de muestreo Panaquire, realizando el producto entre la concentración de los mismos y el caudal en este punto del Río Tuy, se obtiene que por día son transportados 7776 toneladas de sólidos suspendidos en esta sección del río. Dicho valor, aunque es tres veces menor que el presentando por Lugo, 1982 (21000 ton/día) para una estación 20 km aguas debajo de Panaquire, no deja de ser importante; ya que representa una notable carga de contaminantes que puede ser introducida a la cuenca del Mar Caribe, pudiendo alterar este ecosistema.

En la **tabla N° 12** se puede apreciar que la cantidad de sólidos medidos por Lugo, (1982) es mayor, y en algunos casos muy superiores, a las determinadas en este trabajo. Esto probablemente está asociado a la disparidad en el volumen de precipitaciones atmosféricas durante el muestreo en cada investigación, debido a que altas descargas de agua están asociadas con altas concentraciones de sólidos suspendidos (Carvalho, 2002). Sin embargo, debe mencionarse que los valores de Táchata y el Río Cauagua en el presente trabajo son mayores que los obtenidos en Lugo, (1982). Por una parte, las altas concentraciones en Táchata se deben a la actividad arenosa, la cual ha aumentado significativamente la cantidad de granos disponibles para ser transportados en suspensión por el río. Por el otro lado, el crecimiento poblacional e industrial

en Guarenas y Guatire ha producido una mayor inyección de sólidos suspendidos al Río Caucahua.

Tabla N° 12. Concentración de sólidos suspendidos en el Río Tuy en Lugo, (1982) y en la presente investigación.

Lugar (puntos de muestreo)	CSS (mg/l) en época de lluvia	Presente Trabajo
Hacienda. Buen Paso	515	50
Hacienda. Santa Teresa	315	56
Quebrada. Guayas	780	694
Guayas	980	408
Tácata	1280	2834
Río Súcuta	200	21
Lagartijo	3880	737
Río Guaire	800	477
Araguita	1920	425
Río Caucahua	460	613
Panaquire	2550	611
Boca de Paparo	1120	551

Según Medina, (2000) los valores de concentración de los sólidos suspendidos obtenidos a lo largo del Río Guaire, desde el año 1995 hasta el 1998, oscilan entre 122 y 729 mg/l. En este intervalo de concentraciones entra el dato obtenido para el Río Guaire en el presente trabajo (477 mg/l). Sin embargo, en la investigación realizada por Blanco, (2007) en el Río Guaire se obtuvo una concentración de sólidos suspendidos de 1417 mg/l, en época de sequía. No obstante el autor destaca que ocurrieron importantes precipitaciones durante el muestreo lo que produjo el alto valor determinado. Al comparar el dato de dicha investigación con la presente, es notable que el resultado proporcionado por Blanco es mucho mayor; lo cual se atribuye nuevamente a las altas precipitaciones.

En la **tabla N° 13** están colocadas las concentraciones de sólidos suspendidos de ríos importantes venezolanos. En la misma puede observarse que la concentración obtenida en el presente trabajo es alta, encontrándose por detrás del Río Mitare, el cual se encuentra asociado a un ambiente sedimentario deltaico, caracterizado por una alta carga sólida en suspensión.

Tabla N° 13. Concentración de sólidos suspendidos en los principales ríos de Venezuela y en la presente investigación. (Tomando de Ramírez y Andara, 1993)

Río	Concentración de sólidos suspendido (mg/l)
Mitare	917
Tocuyo	450
Yaracuy	241
Tuy Norte	165
Tuy Sur	56
Unare	56
Neverí	110
Manzanares	96
Presente trabajo (Boca de Paparo)	551

La carga de sólidos suspendidos del Río Tuy demuestra que la tasa de aporte de estos sólidos por parte de las actividades antrópicas es importante, específicamente de las ciudades de los Valles del Tuy, Caracas, Guarenas y Guatire. Esto se concluye debido a que la concentración de sólidos suspendidos del Río Tuy, determinada en este trabajo, es muy superior con respecto a las concentraciones de los principales ríos del centro norte de Venezuela, señaladas en Ramírez y Andara, 1993; donde se incluyen ríos que presentan una notable modificación por parte del hombre, como el caso del Río Tocuyo (Andara, 1993).

Por lo tanto, es de gran importancia indicar que no hay trabajos recientes de sólidos suspendidos de la cuenca hidrográfica estudiada, ni en otras de carácter nacionales. Por lo cual, la información aportada por este trabajo es de gran referencia para conocer el estado del importante Río Tuy hoy en día, ya que se están actualizando datos de más de 20 años.

Por otro lado, Meybeck y col, (2002), determinan las concentraciones de sólidos suspendidos de diversos cuerpos de agua. Entre ellos, dos cuencas hidrográficas no contaminadas, de un área similar a la del Río Tuy: Río Alpenrhein-Austria (1236 mg/l), y Río Pecos-USA (4730mg/l). Por ello, a pesar de la actividad humana en la cuenca del Río Tuy se observa que la concentración de

sólidos suspendidos es menor que las concentraciones determinadas en los ríos anteriormente mencionados, que presentan condiciones similares.

Por su parte, Hergren y col., 2005. En dicha investigación estiman que los rangos de concentración de sólidos suspendidos de origen residencial, industrial y comercial son (en mg/l) 0,5-76,3; 2,1-86,0 y 10,3-49,5, respectivamente. Estos los valores establecidos son superados en el Río Tuy, en gran parte de su extensión, lo que indica la gran alteración antrópica de este río.

Concentración de metales pesados en los sólidos suspendidos

Es imperante indicar cuáles muestras fueron utilizadas para los análisis de metales pesados, debido a que se obtuvo poca cantidad de muchas de las muestras obtenidas y no era suficiente para realizar el análisis, lo que representó una limitante.

Tabla N° 14. Lista de muestras utilizadas para el análisis de metales pesados

Lugar	Lugar
El Consejo (t*)*	Lagartijo
Qda. Guayas**	Sta. Teresa del Tuy*
Guayas	Río Guaire (t*)*
Boca de Cagua (t*)	Taguacita-Tuy
Tácata (t)	Araguita
Cúa*	Río Caucagua*
Qda. Charallave (i)	Panaquire (t*)*
Ocumare (t) y (t*)	Boca de Paparo
Río Súcuta (i)	

Las muestras con “*” fueron tratadas con diferentes masas (1, 2, 3, 4, 5 g) con el fin de corroborar la calidad de la metodología aplicada. En el mismo sentido se realizó con Guayas (“**”) pero la cantidad de muestra era menor, por lo que se tomaron 1, 2, 3, 4 g. La cantidad de las muestras con “(i)” era muy poca por lo que sólo se tomó 1 g. El símbolo (t) indica que las muestras en ese punto fueron tomadas en diferentes fechas. Y el símbolo (t*) indica que las muestras son del mismo día pero diferente hora. Asimismo, es importante señalar que a partir de esta sección de la discusión se emplearon los símbolos “(1)” y “(2)” como nomenclatura para diferenciar muestras captadas en diferentes fechas. Así como también se utilizaron los símbolos “(1.1)” y “(1.2)” ó “(2.1)” y “(2.2)” para indicar muestras tomadas en el mismo lugar pero en diferentes horas.

La verificación de calidad del método analítico aplicado y de los datos obtenidos se realizó con la determinación elemental de siete (7) muestras, a las cuales se les hizo el tratamiento químico tomando diferentes masas de cada una (1, 2, 3, 4 y 5 g). Primeramente, se observó que las concentraciones son directamente proporcionales a la masa de submuestra utilizada. En segundo lugar, se realizó para cada elemento una regresión lineal utilizando el peso inicial y peso final (residuo seco) de las muestras. El resultado alcanzado fue un buen coeficiente de correlación para todos los casos (**Apéndice 3**), lo que significa que el procedimiento en el laboratorio fue adecuado porque es reproducible. Ello indica de igual manera que la cantidad de ácido utilizado fue suficiente para el intervalo de masa usado para las muestras (1- 5 g); observándose que el porcentaje de residuos de las submuestra de una muestra presentan valores similares, es decir, presentan una muy baja desviación estándar (alrededor de 1). En el mismo sentido, se observó que el porcentaje de residuo de Quebrada Guayas y de Santa Teresa del Tuy son bajos, lo que alude que la composición de sus sólidos suspendidos son los más sensibles al ataque ácido, sobretodo el primero de éstos (**Apéndice 4**). A diferencia de los granos de El Consejo y Ocumare que resultaron los más resistente al ataque con el HCl 1 M y HNO₃ concentrado. En último lugar, la calidad de la metodología es fundamentada en la calibración del equipo de medición, haciendo uso de cinco patrones de referencia multielementales de diferentes concentraciones (**Apéndice 1 y Apéndice 2**).

En otro orden de ideas, las **figuras 4a y 4b** muestran las concentraciones de Al en los sólidos suspendidos del Río Tuy (y sus afluentes), determinadas en la digestión con HCl 1 M y en la digestión de HNO₃ concentrado respectivamente. Es notorio, que en el Río Tuy las concentraciones de Al obtenidas de la extracción con HCl son menores que las obtenidas con HNO₃; siendo el intervalo en el primer caso de 1050 ppm (El Consejo 1.2)-5021 ppm (Araguita), y en el segundo entre 1051(Guayas)-17333 ppm (Boca de Paparo). Esto indica la preferencia del Al a ser extraído por HNO₃ concentrado, por lo que puede indicarse que el Al está asociado a las fases de materia orgánica, oxi-hidróxidos cristalinos, especies fuertemente absorbidas, arcillas y sulfuros.

En la **figura 4a** puede observarse que entre El Consejo y Guayas se presentan los menores valores (1950ppm y 1050 ppm, respectivamente), atribuidos a las actividades agrícolas de las zona. Aunque al ser comparados dichos valores con los valores de Al obtenidos por Hernández, (2011) en muestras de agua (14-53 ppm), se observa una mayor concentración de Al en la fase de

sólidos suspendidos que en los sólidos disueltos. Ello es debido a que el pH del Río Tuy (6-9) no favorece la solubilidad del Al (González, 1982; Baird 2001).

Desde Boca de Cagua a Ocumare la concentración de Al va aumentando producto de la actividad doméstica y agropecuaria, llegando cerca a los 4000 ppm, y en la sección de Lagartijo-Boca de Paparo, es sobrepasada la barrera de los 4000 ppm. Además, es notorio un alto contenido de Al en los afluentes Súcuta, y en menor proporción Quebrada Charallave y Río Guaire. Sin embargo, puede decirse que las concentraciones de Al en esta fase son ligeramente uniformes (4000 ppm en promedio), lo que permite indicar que su fuente es fundamentalmente natural; coincidiendo con Henríquez, (2011).

Con respecto a la distribución de las concentraciones de Al en HNO₃ concentrado, la **figura 4b** indica que la concentración promedio está alrededor de 8000 ppm, superior a la obtenida en HCl 1 M. Asimismo se observa que en el trayecto entre El Consejo-Boca de Cagua, la magnitud de Al responde a actividades agropecuarias y domésticas ejercidas en esta zona y aguas arriba, reflejándose también en la concentración en Quebrada Guayas. Por su parte, Guayas se presenta con un valor bajo de concentración de Al, posiblemente por proceso de dilución en el río, al aumentar el caudal y mantenerse igual el aporte de este elemento a este sistema fluvial. Proceso que logra afectar posteriormente la zona en Boca de Cagua. Luego en Tácata hay un ascenso bien significativo de la concentración (11376 ppm), y después la concentración ronda los 8500 ppm hasta la máxima concentración en Boca de Paparo (17332 ppm); observándose una importante

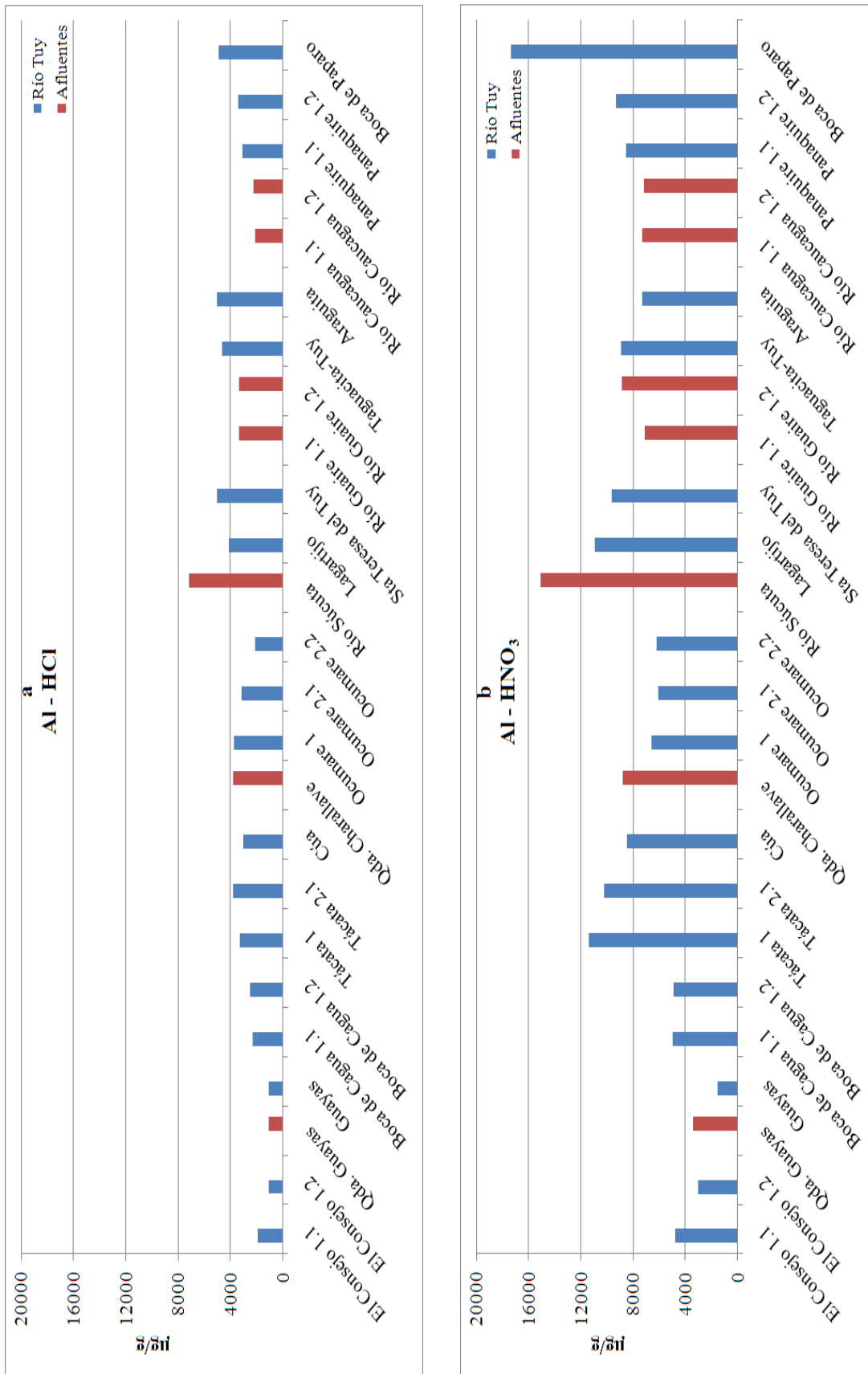


Figura 4. Distribución de la concentración de Al en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO₃ (c)

actividad de agricultura en la localidad de San Juan. Esto es atribuible también al aporte del Río Súcuta, Quebrada Charallave, Río Guaire y Río Cauagua; que expresan el aumento de la actividad doméstica e industrial en sus respectivas localidades.

Zhang y col., (2009) presentan 40803 ppm como la concentración mínima de Al en los sedimentos del Río Yangtze, concentración que está muy por encima del Al total en la cuenca del Río Tuy. Por lo que puede decirse que Al está principalmente controlado por fuentes naturales en el Río Tuy.

La **figura 5a** muestran la distribución de la concentración de Fe, en la fase del HCl 1 M, a lo largo del Río Tuy (y sus afluentes). Las concentraciones en el cauce principal están comprendidas entre 1218 y 10302 ppm, con un promedio de 7000 ppm.

Sin embargo, el promedio cercano a 15000 ppm de las concentraciones de Fe obtenidas en el extracto de HNO₃ concentrado (**figura 5b**), indica la clara tendencia de Fe a ser extraído por el último ácido, por lo que el mismo está asociado a la fase de materia orgánica, oxi-hidróxidos cristalinos, especies fuertemente absorbidas, arcillas y sulfuros.

La distribución del Fe en el Río Tuy presenta una tendencia semejante al Aluminio, si bien con concentraciones de mayores magnitudes. Esto no es incoherente ya que ambos elementos se encuentra controlados por el pH y Eh del sistema (**tabla N° 6 y 8**), y su coeficiente de reparto, en estas condiciones, favorece su acumulación y transporte en la fase sólida (Peng. y col., 2009). En función de lo anterior, se ha observado la relación entre la fase de Fe (oxi-hidróxidos) y Al (aluminosilicatos) regulada por la formación de recubrimientos de oxi-hidróxidos de hierro sobre partículas de arcilla, como indica Yanes (1999) para los sedimentos de los caños Manamo y Macareo del Delta del Río Orinoco. Estos rasgos geoquímicos pueden ser los condicionantes en la movilidad de los elementos relacionados a estas fases.

En general, en las figuras 5a y 5b se observa que las concentraciones de Fe en el Río Tuy son homogéneas. No obstante en Guayas se presentan los mínimos valores de Fe (sobre todo en HNO₃), lo cual es producto de los desechos domésticos los cuales generan condiciones de preservación de la materia orgánica (observándose un Eh relativamente bajo en este punto de muestreo en la tabla N° 8), inhibiendo que el hierro se posicione en los sólidos suspendidos, sino que forme complejos organometálicos (González, 1982). Por su parte, en Río Súcuta se observan

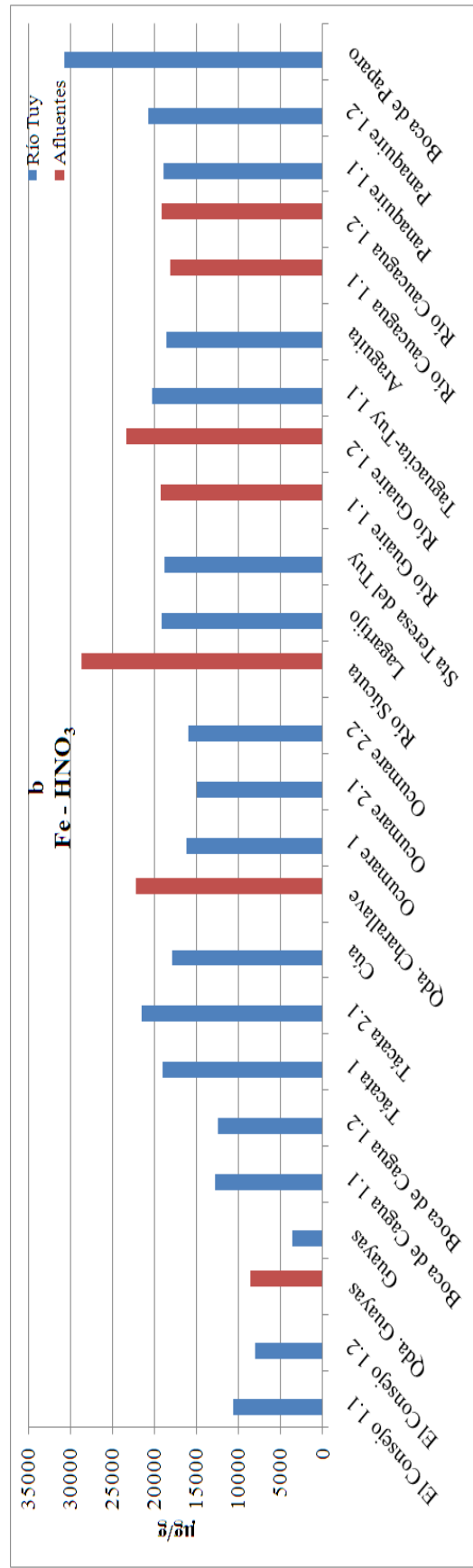
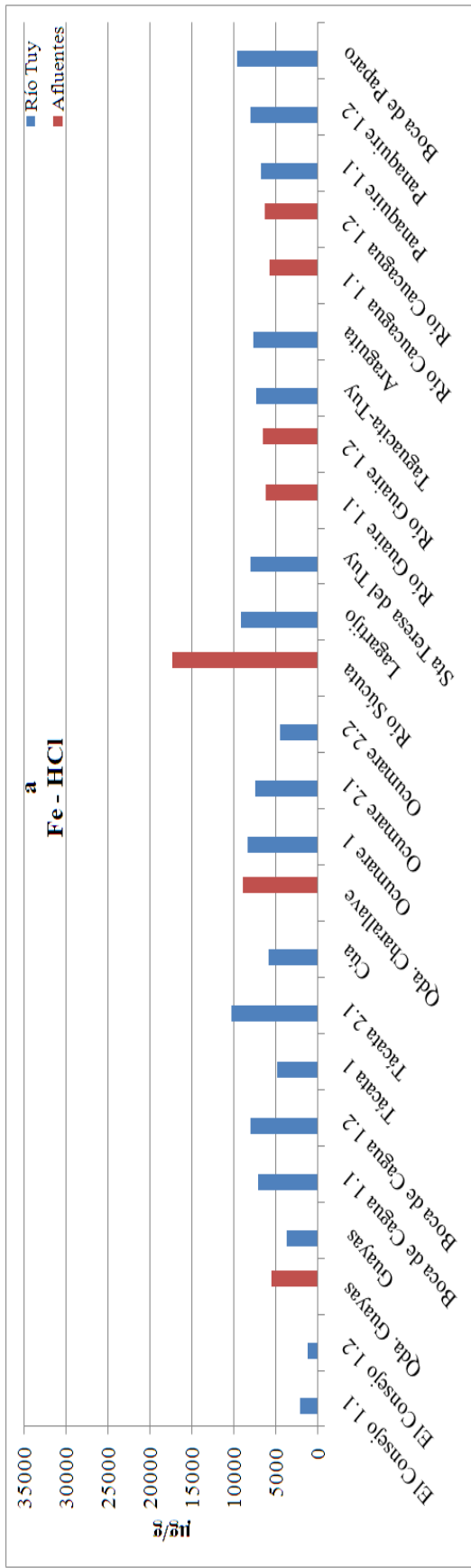


Figura 5. Distribución de la concentración de Fe en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO₃ (c)

las mayores concentraciones de Fe, presentando 17343 ppm en HCl 1 M y 28614 ppm en HNO₃ concentrado.

Las concentraciones del Fe obtenidas hasta Boca de Cagua son atribuidas a afluentes agropecuarios, con un aumento progresivo y su mayor efecto a partir de Tácata, e incrementándose hasta Panaquire. Esto bien dado por las actividades domésticas, agropecuarias e industriales ocurridas en los sectores de Tejerías, Guayas, Cúa, Charallave, Ocumare, Santa Teresa del Tuy, Caracas, Araguaita, Guarenas y Guatire. Luego de Panaquire a Boca de Paparo la concentración de Fe se intensifica con la adición de desechos agrícolas y domésticos de la localidad de San Juan. Además, se observan afluentes que poseen una alta concentración de Fe, como el caso Quebrada Charallave, Río Guaire y Río Caucagua, lo cual está influenciado por las actividades domésticas, industriales y las granjas porcinas de las localidades de Charallave, Caracas, Guarenas y Guatire.

Lugo, (1982) obtuvo concentraciones de Fe entre 33000 y 55000 ppm. Observándose así una disminución en dicha concentración, dado que para este trabajo el Fe total máximo determinado es ligeramente superior a los 30000 ppm; teniéndose como valor mínimo 1208ppm. Por su parte, Helios y col., (2005), obtuvieron en el Río Odra un rango de concentración entre 1523 ppm y 88889 ppm, teniéndose como media 45727 ppm. Dado que el Río Odra esta notablemente contaminado, puede argumentarse que el Río Tuy apunta a una contaminación por Fe, pero visiblemente en menor intensidad que en el primer río.

De acuerdo a la relación anteriormente planteada de Fe y Al se realizó una gráfica de correlación entre las concentraciones de Fe y Al (**figura 6**), obtenidas en la digestión con HNO₃. Con ello se obtuvo un coeficiente de correlación (r^2) igual a 0,8687; lo que sugiere que estos elementos están asociados a la misma fase del sólido suspendido, y muy posiblemente estén gobernados por las características de los suelos que recorre el río, que de acuerdo a Gorddev y col., 2004 se puede tratar de un material silicatado (Herngren y col. 2005).

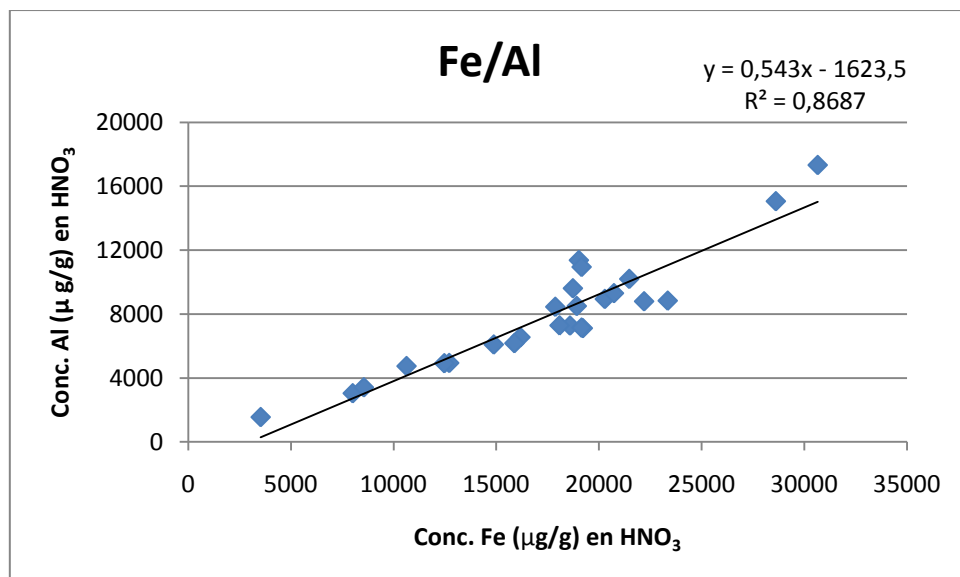


Figura 6. Correlación de Al con Fe en HNO₃

En la **figura 7a** se muestra la distribución de la concentración de Mn en los sólidos suspendidos del Río Tuy, extraídos con HCl; donde se obtuvo un valor mínimo de concentración en Guayas (86ppm) y valor máximo en Ocumare 1 (917 ppm). Este dato de Ocumare 1, corresponde a la muestra tomada en el mes de agosto, donde se observó que las precipitaciones eran mayores que en el mes de octubre cuando se tomaron las otras dos muestras de Ocumare (2.1 y 2.2). Las concentraciones de Mn obtenidas en El Consejo, Boca de Cagua, Tácata, Cúa y Ocumare oscilan alrededor de 400 ppm; y parecen estar influenciadas por los efluentes agropecuarios provenientes principalmente del sector de Cúa, efluentes industriales de Tejerías y Charallave y de efluentes domésticos del sector de Guayas, Cúa y Santa Teresa del Tuy. A partir de Santa Teresa del Tuy aumenta, hasta superar en varias ocasiones los 600 ppm; y finaliza en 770 ppm en Boca de Paparo, debido por el aumento de la actividad industrial y doméstica entre estos dos puntos de muestreo; fundamentalmente por los afluentes Río Guaire y río Caucagua. Además de grandes aportes de Mn como el del Río Súcuta (1314 ppm). Por otro lado, el comportamiento del Mn en Guayas parece responder al mismo criterio para el Fe en este mismo punto.

La figura 7b presenta la distribución de la concentración de Mn (en HNO₃), donde puede observarse que los valores de estas concentraciones son significativamente menores que en HCl; siendo 198ppm el mayor valor, correspondiente a Boca de Paparo, y 22 ppm el menor valor

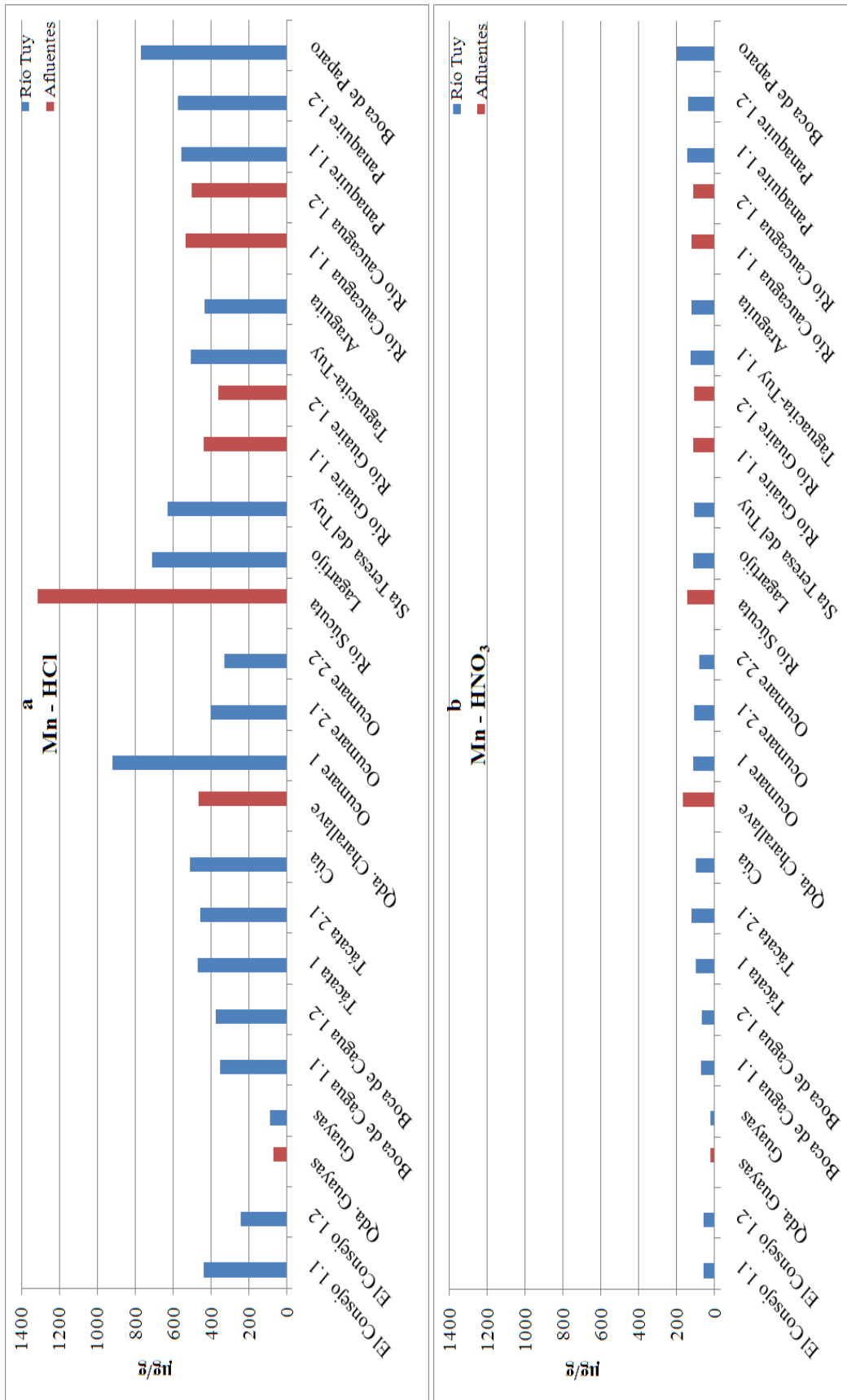


Figura 7. Distribución de la concentración de Mn en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO₃ (c)

(Guayas). Por ello, el Mn puede estar asociado a la fase de carbonatos, oxi-hidróxidos amorfos y especies sorbidas superficialmente.

En la **figura 7b** puede apreciarse que las concentraciones de Mn entre El Consejo y Guayas son menores a 100 ppm, siendo su control principalmente natural. Luego de este punto la concentración oscila entre 100 y 200 ppm, siendo los mayores aportes asociados a Quebrada Charallave y Río Súcuta. Un aspecto rescatable es que el alto valor de Mn obtenido en puntos como Ocumare y Súcuta, tiene correspondencia con bajos valor de Eh (**tabla N° 8**), sugiriendo que el Mn puede estar formando complejos orgánico insolubles, por desechos de esta índole (Rayner-Canham, 2000, Yong y col., 2006).

Por otro lado, debido a la gran similitud que presentan las gráficas de distribución de concentración del Fe y Mn se correlacionaron y se obtuvo un r^2 igual a 0,8255 (**Apéndice 10**); argumento claro que permite hablar de una procedencia muy similar (**figura 8**).

En el trabajo de Lugo se observa una concentración total promedio de Mn de 500 ppm, mientras que en la presente investigación esta concentración está cercana a los 550 ppm, por lo que no se puede hablar de cambios importantes. Es importante mencionar que también se observa correspondencia entre los valores de Mn del Río Súcuta en los trabajos anteriores, lo cual se deba probablemente a la litología sedimentaria de la zona.

Helios y col., (2005) determinaron una concentración promedio de Mn en los sólidos suspendidos del Río Odra de 6323 ppm, dentro de un rango de 856-52430 ppm. Esto sugiere que el Río Tuy no presenta una contaminación significativa por este metal, por lo que su control en esta cuenca, en general, es natural.

Las concentraciones de Zn a lo largo del Río Tuy, extraído con HCl 1 M (**figura 9a**) son similares a las obtenidas en el extracto con HNO₃ concentrado (**figura 9b**). Por lo tanto, se observa un comportamiento dual del Zn, al ser extraído equitativamente por los dos ácidos. Dicho comportamiento es evidenciado en la gráfica de correlación de la concentración en Zn en HCl 1 M versus HNO₃ concentrado (**Apéndice 15**).

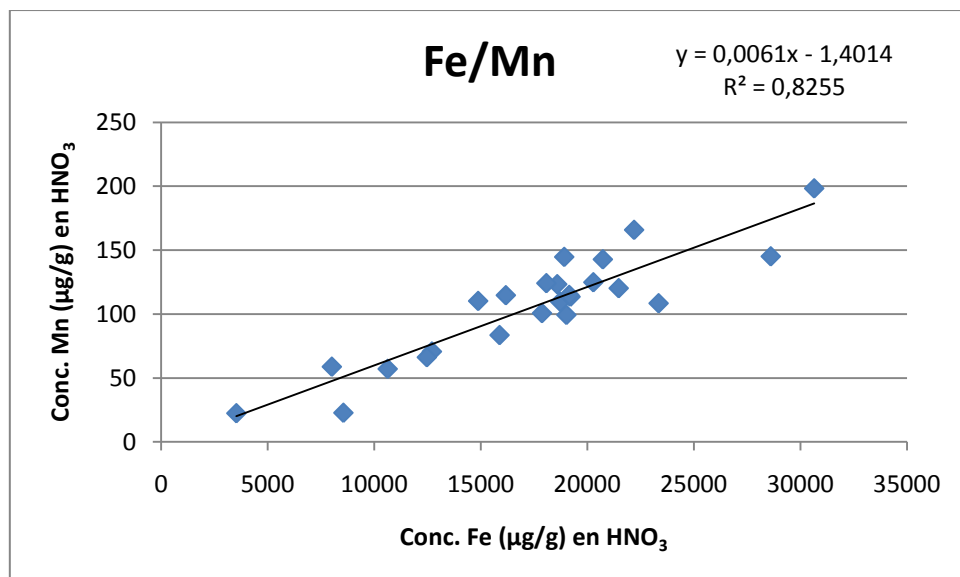


Figura 8. Correlación de Mn con Fe en HNO₃

La concentración promedio de Zn (en HCl 1 M) presente desde El Consejo hasta Boca de Paparo está alrededor a 80 ppm, con un intervalo de concentraciones que está entre 13,0 y 115,9 ppm (figura 9a). Las fuentes de este elemento provienen de la desembocadura de afluentes y de efluentes con alto contenido de Zn en la fase de sólidos suspendidos en el Río Tuy. Por ejemplo, se atribuye a las aguas de origen doméstico una importante concentración de Zn, ya que zonas como Ocumare, Santa Teresa del Tuy y Caracas son principales fuentes de tuberías elaboradas de hierro galvanizado (Murgel, 1984). Sin embargo, el dato en El Consejo da un contraste, indicando que las actividades que sirven de fuentes de Zn son visiblemente menores que las actividades aguas abajo, como la actividad agropecuaria.

Por su parte, las concentraciones de Zn en HNO₃ concentrado obtenidas tienen un rango de 24,8-245,4ppm (Ocumare 2.1), siendo este último un valor anómalo con respecto al resto. Dicha figura muestra que la concentración de Zn (extraído en HNO₃) no sobrepasa los 50 ppm en el tramo El Consejo-Boca de Cagua, pero desde Táchata los valores rondan los 80 ppm, encontrándose el pico en Ocumare 2.1. Todo ello se entiende como el aumento progresivo de las fuentes de Zn, como las señaladas por Bautista, (1999), en el transcurso del Río Tuy. Apreciándose un aporte importante de este metal en la zona media (tributarios Súcuta y Guaire) y final (Panaquire-Boca de Paparo) de esta cuenca hidrográfica. Al igual que efluentes agropecuarios del sector de Cúa;

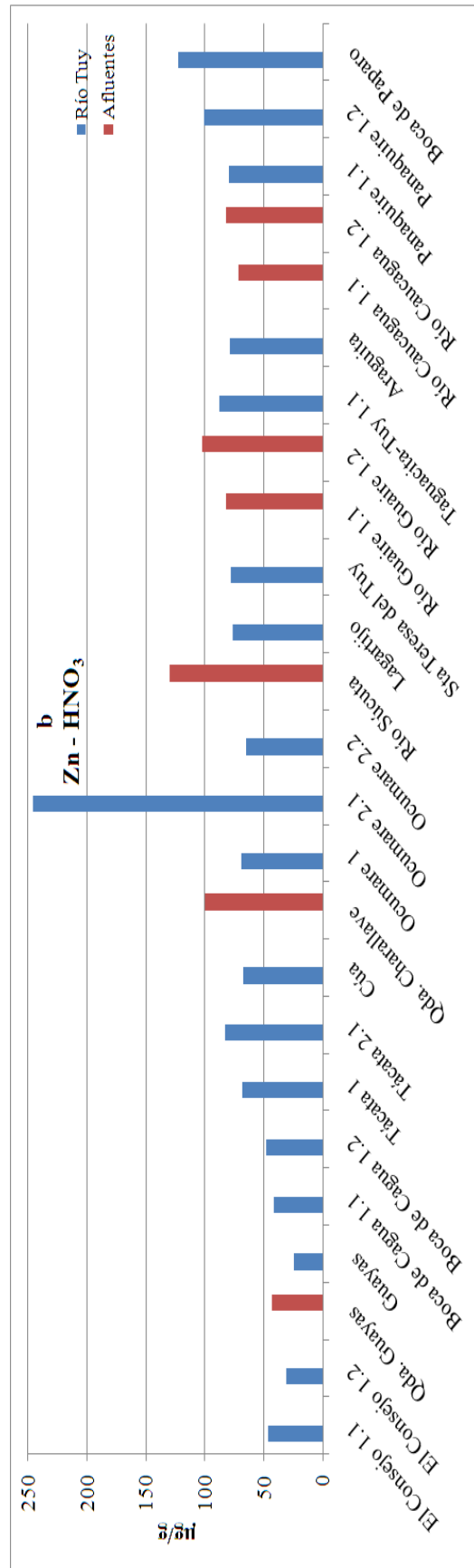
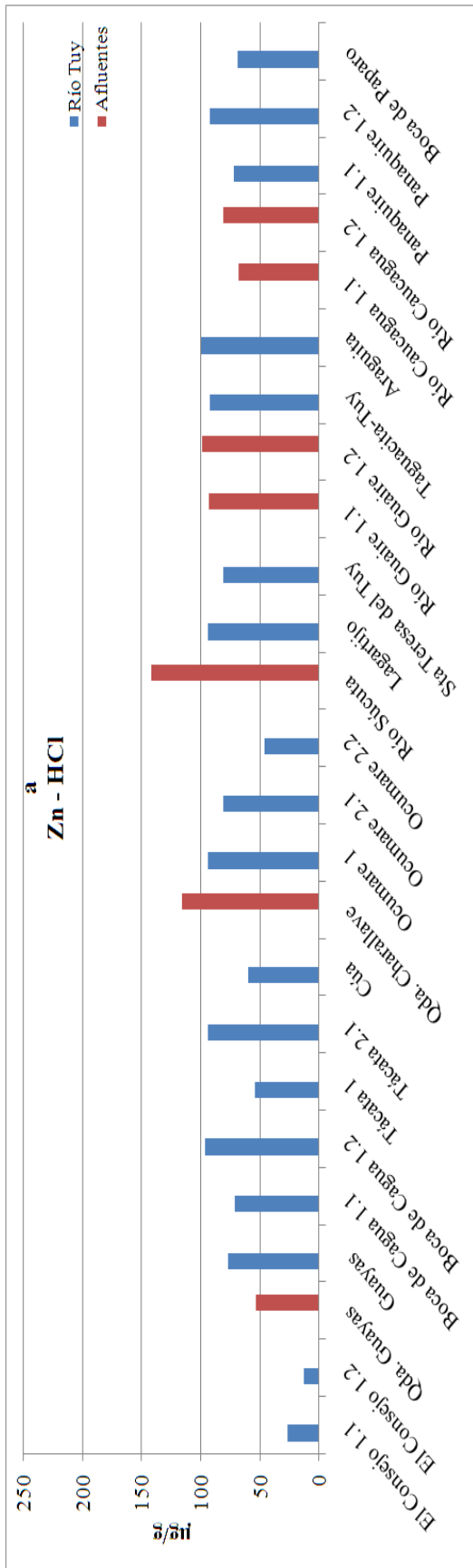


Figura 9. Distribución de la concentración de Zn en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO₃ (c)

efluentes industriales de Tejerías y Charallave y de efluentes domésticos del sector de Guayas, Ocumare, Santa Teresa, Araguaita, Caracas, Guarenas y Guatire, las cuales presentan una importante densidad demográfica, especialmente las tres últimas.

En la fase de HNO_3 concentrado, el Zn presenta una fuerte correspondencia con el Fe, ilustrada en la **figura 10** y presentando una muy buena correlación ($r^2 = 0,9378$), indicando un mismo origen.

Lugo, (1982), determinó una concentración promedio de Zn de 170 ppm, aproximadamente. En la investigación realizada por Medina, (2000), este autor obtuvo un valor promedio para ríos no intervenido de 103 ppm de Zn. Además la concentración máxima permitida de este metal pesado por la EPA, (1993) es de 140 ppm. Por su parte, Long y Morgan, (1990) y Long y col. (1995) indican que 150 ppm de Zn es tóxico para la biota. Debido a que en el presente trabajo los valores de Zn total sobrepasan los 150 ppm se puede hablar de que la alteración ambiental por este elemento continúa en el Río Tuy.

La concentración de Zn total determinada para el Río Odra (Polonia-Alemania-República Checa) está en un intervalo de 111-31369 ppm, donde 2027 ppm corresponde al valor promedio. Esto puede indicar un bajo grado contaminación por Zn en el Río Tuy.

La distribución de la concentración de Cu extraída con HCl 1 M es mostrada en la **figura 11a**. En ella se puede distinguir que el Cu presenta el menor valor en El Consejo (5,4 ppm) y en Araguaita el mayor valor (47,8 ppm); y es en el primero donde la concentración de Cu se atribuye en gran medida a la litología metamórfica de la zona (Picard, 1968).

Por su parte, el intervalo de concentraciones de Cu obtenidas para el extracto de HNO_3 concentrado están ubicadas entre los 8 ppm de El Consejo y 37 ppm correspondiente a Boca de Paparo; concentraciones menores que para la extracción con HCl. Por lo tanto, se observa la preferencia del Cu en ser extraído por HCl, asociado a la fase de carbonatos, oxi-hidroxidos amorfos y especies sorbidas superficialmente.

Luego de Guayas, la concentración de Cu fluctúa alrededor de los 30 ppm (por efecto antrópico) y después disminuye en el tramo final del río. Ello debido probablemente a un proceso de dilución por la introducción al río principal de afluentes como Panaquirito y Yaguapo, los cuales aportan muy poco de este elemento.

Debe destacarse que las condiciones como temperatura, Eh y pH (Tablas N° 6 y 8) en los primeros kilómetros del Río Tuy fueron aptas para la alta solubilidad de las sales de Cu, lo cual

explica también el descenso de la cantidad de Cu en la sección Panaquire-Boca de Paparo, dado que estos parámetros fisicoquímicos van variando aguas abajo, afectando el grado de solubilidad de dichas sales. Por ende, el Cu se enriquece en la fase de los sólidos suspendidos.

Además, las mayores concentraciones de Cu en el Río Tuy están vinculadas con las altas cantidades aportadas por los afluentes de Quebrada Charallave y Río Súcuta, y en menor proporción, pero igualmente relevante, los ríos Guaire y Caucagua. Esto debido a los materiales utilizados en las actividades agrícolas (abono), industriales (tintes) y domésticas (alimentos), que pueden estar siendo transportados al río principal en aguas de escorrentía (Murgel, 1984), a su vez asociados a las ciudades Tejerías, Guayas, Cúa, Charallave, Ocumare, Santa Teresa, Caracas, Araguaita, Guarenas y Guatire.

La **figura 11b** muestra la distribución de la concentración de Cu en HNO₃ (c) donde puede observarse un promedio de 18 ppm, lo cual indica que este elemento tiende asociarse con la fase de carbonatos, oxi-hidróxidos amorfos y especies superficialmente adsorbidas.

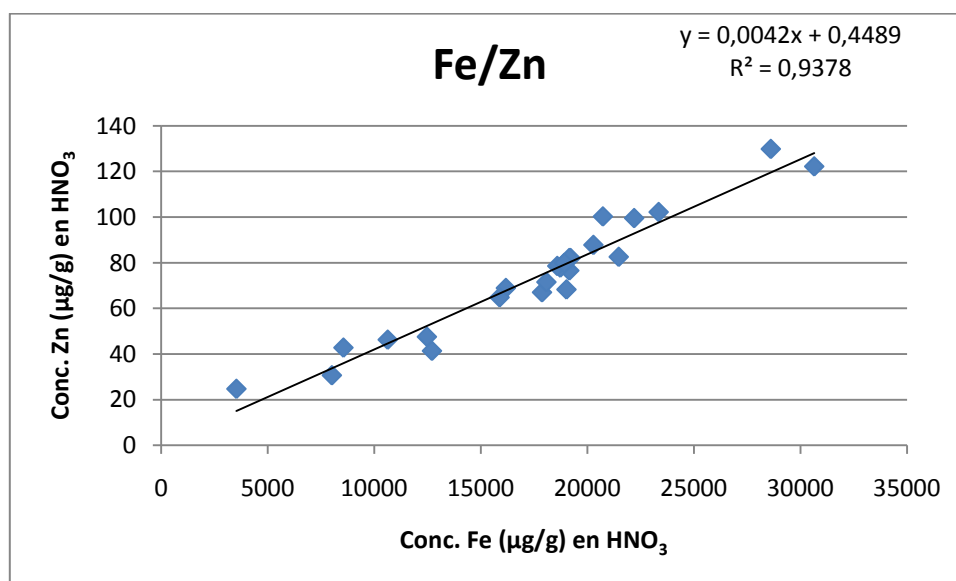


Figura 10. Correlación de Zn con Fe en HNO₃

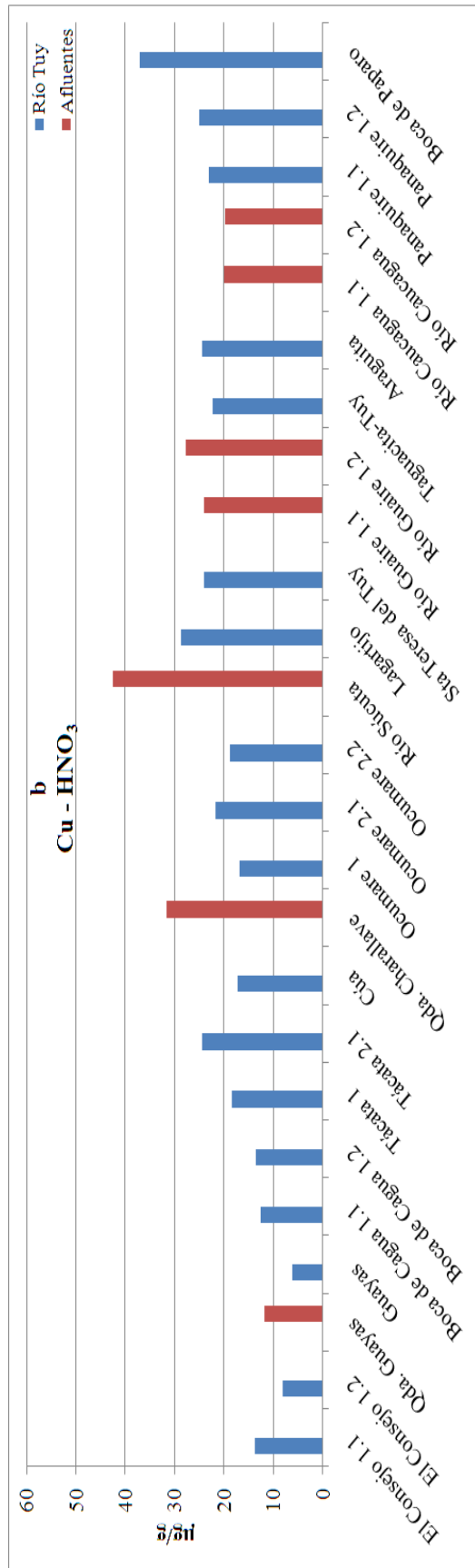
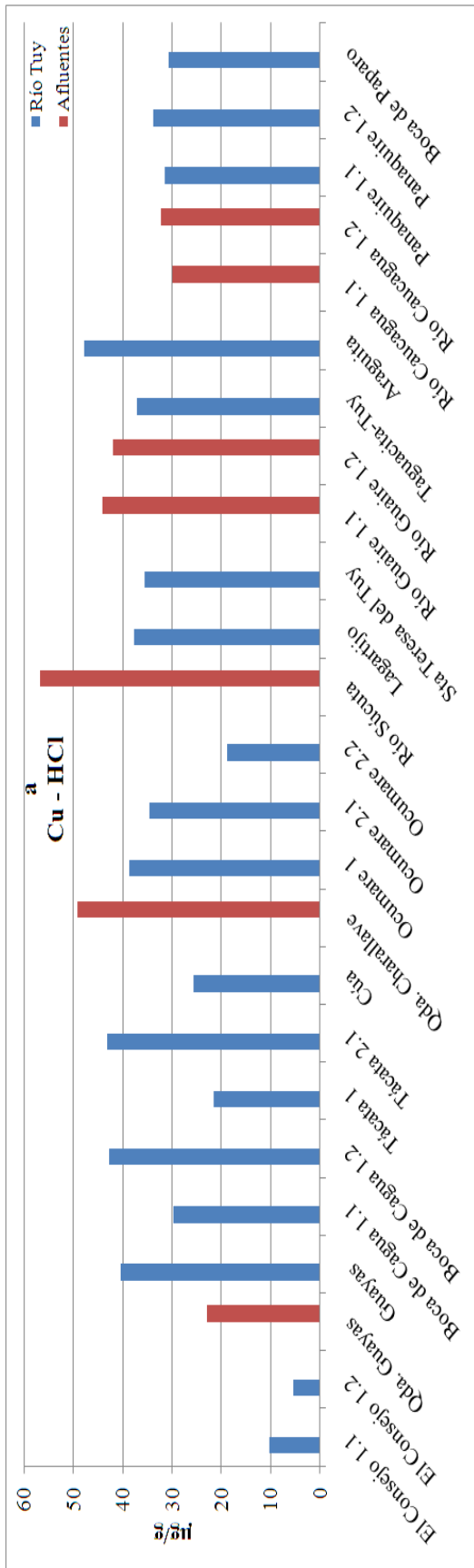


Figura 11. Distribución de la concentración de Cu en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO₃ (c)

En la **figura 11b**, se observa un aumento paulatino desde El Consejo hasta Boca de Paparo; y en el cual se distinguen valores en los afluentes de la zona media a razón de las actividades industriales (como las fábricas textiles y de pigmentos) y domésticas ocurridas en las localidades Tejerías, Charallave, Caracas, entre otras. Del mismo modo, las actividades agropecuarias de la zona de San Juan realiza un importante aporte de Cu, proveniente de Pesticidas y Fungicidas (Bautista, 1999).

La distribución de Cu en HNO₃ concentrado presenta similitud con la de Fe, por lo cual se correlacionaron (**figura 12**). Esto permite proponer que el Cu está siendo atrapado o coprecipitado en la formación del oxi-hidroxido cristalino de Fe, probablemente por sus afinidades geoquímicas calcófilas (Turekian y Wedepohl, 1961).

Del mismo modo, en la **figura 13** se muestra la excelente correlación entre el Cu y Zn en el extracto de HCl; siendo notorio el hecho de que el coeficiente de correlación entre estos elementos también es alta en HNO₃ concentrado ($r^2 = 0,9186$). Esta relación de Zn y Cu también es observada en los sedimentos de fondo del Río Tuy (Henríquez, 2011). Esto según Harngren y col, (2005), indica que este metal tiene alta afinidad al carbón orgánico presente.

En el trabajo de Blanco, (2007) se expresa una concentración promedio de Cu (en HCl 1 M) de 102 ppm, la cual es muy superior a la obtenida en esta misma fase del Río Guaire en el presente trabajo (cerca a los 40 ppm). Sin embargo el Cu total del Río Tuy alcanza una concentración de 60 ppm, lo cual supera el valor promedio de ríos no intervenidos propuesto por Medina, (2000) (42 ppm) y la concentración mínima considerada como tóxica por Long y Morgan, (1990) y Long y col. (1995) (34 ppm). Por lo tanto, a pesar de la disminución del aporte de Zn del Río Guaire, el Río Tuy presenta una notoria contaminación por este elemento.

En el ámbito internacional, el río Odra presenta concentraciones promedio de Cu de 100 ppm, observándose claramente que sobrepasa las concentraciones del Río Tuy y de las normas y estatutos ambientales

Por su parte, las concentraciones de Cd, en el extracto de HCl 1 M, en el Río Tuy se encuentra distribuidas entre 0,08 y 1,13 ppm (**figura 14a**), mostrando un valor anómalo en el Río Súcuta con respecto al resto de las concentraciones. Prácticamente, desde Guayas, la concentración de Cd oscila entre 0,5 y 1 ppm. Dichas concentraciones no apuntan a un origen natural, por lo que es

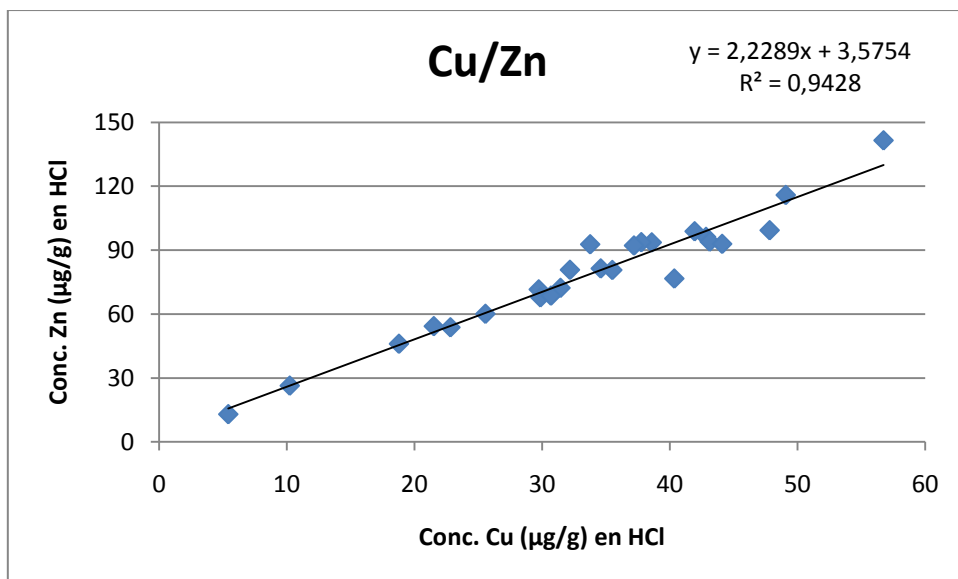


Figura 12. Correlación de Cu con Zn en HNO₃

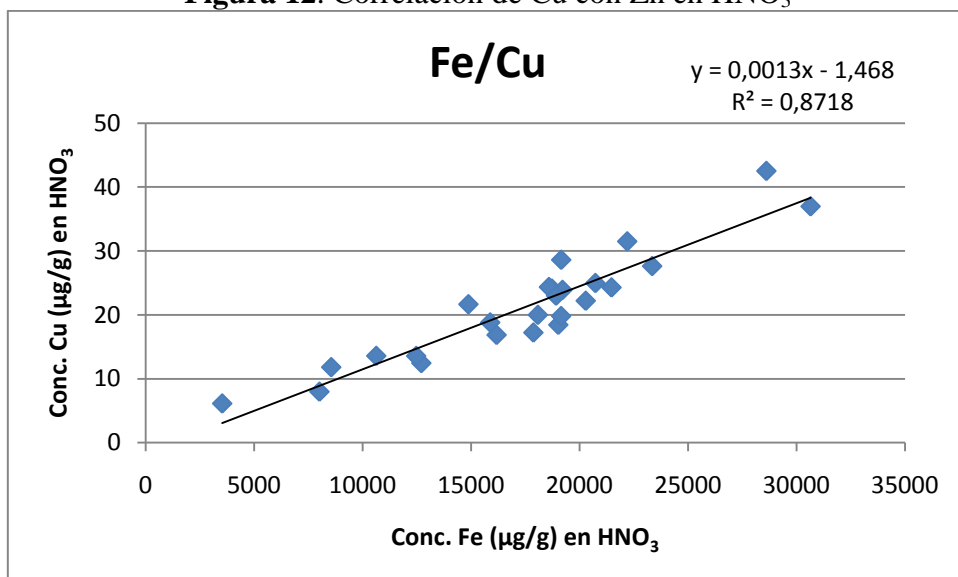


Figura 13. Correlación de Cu con Fe en HNO₃

evidente la influencia antrópica; fundamentalmente de las actividades industriales (fábricas de baterías eléctricas y plástico) y domésticas de Tejerías, Cúa, Santa Teresa, Ocumare, entre otros. En la **figura 14b** se observa la concentración de Cd en HNO₃ concentrado, en la cual el menor valor es 0,40 ppm y el mayor es de 3,84 (Boca de Paparo). Estas concentraciones duplican, y hasta triplican, las concentraciones obtenidas en el extracto de HCl 1 M. Esto se debe

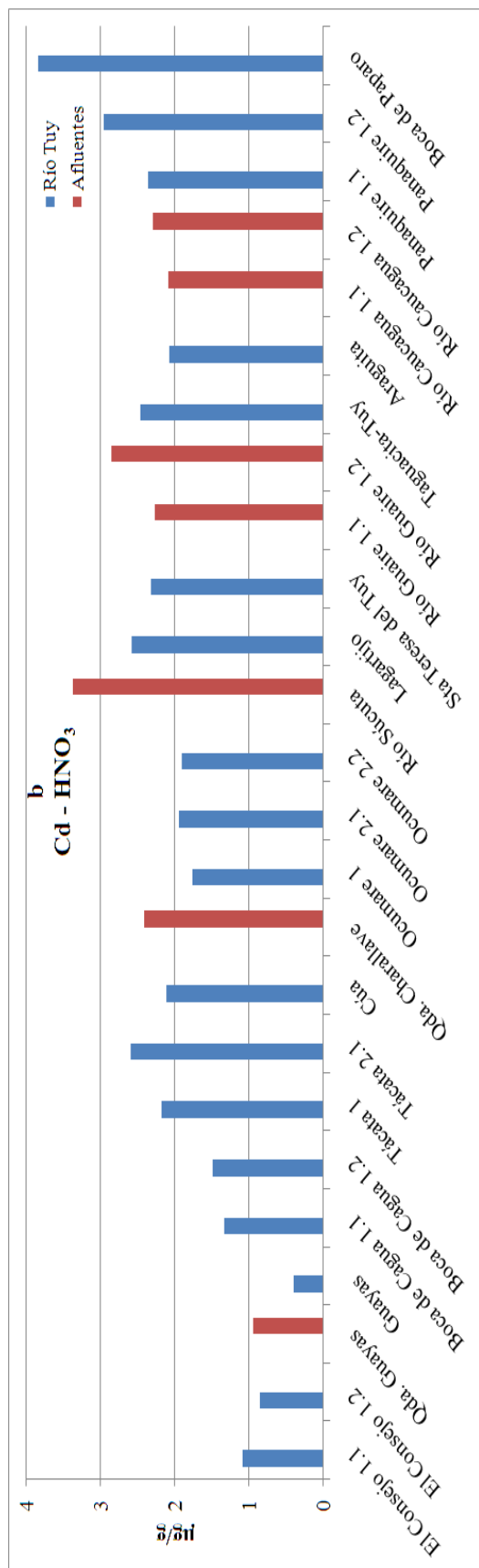
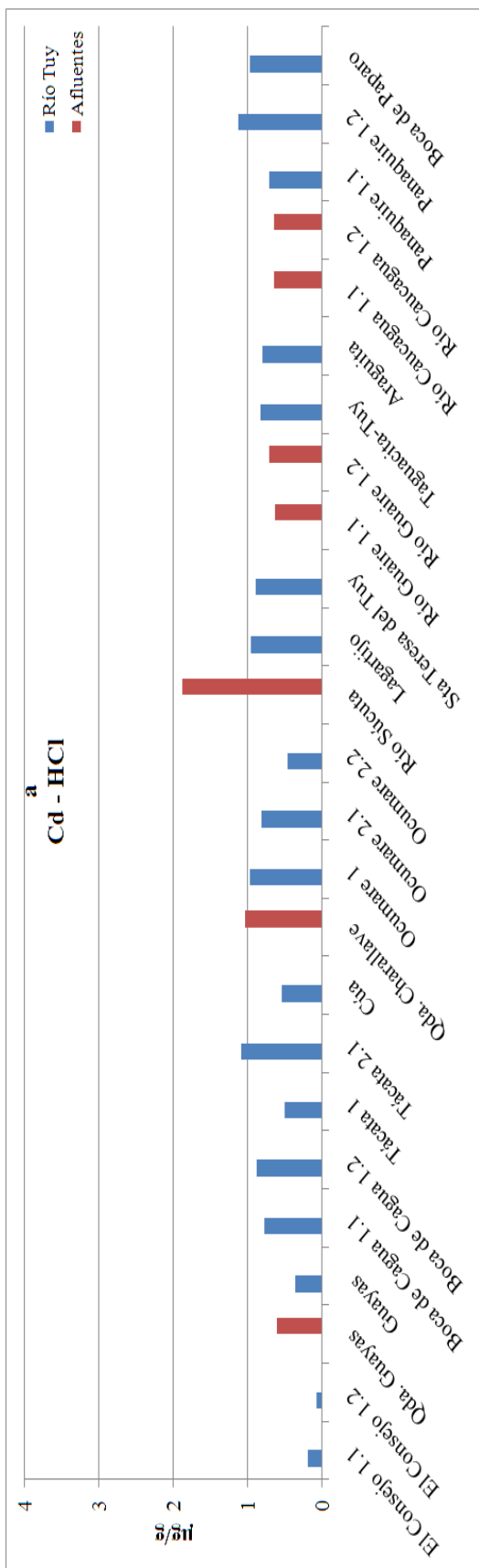


Figura 14. Distribución de la concentración de Cd en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO₃ (c)

probablemente a que las diferentes actividades antrópicas añaden este metal pesado a los cuerpos de agua de esta cuenca en forma asociada a la fase de la materia orgánica, oxi-hidróxidos cristalinos, arcillas, especies fuertemente absorbidas y sulfuros, correspondiente a la extracción con HNO₃ concentrado.

Por lo cual, actividades de diversas índoles; en las que se incluyen las actividades agrícolas (fertilizantes) y actividades industriales (pinturas) (Forstner y Wittman, 1981); inyectan altas cantidades de Cd por medio de los afluentes como el Río Súcuta, Río Guaire, Quebrada Charallave y el Río Caucagua. Estos cuerpos de agua son los receptores de los efluentes de las localidades Cúa, Charallave, Ocumare, Caracas, Guarenas y Guatire.

Asimismo, es observada una excelente correlación del Cd con el Fe en las dos extracciones ácidas, siendo r^2 igual a 0,9652 en HCl 1 M (**figura 15**) y 0,9626 en HNO₃. Por ende, estos elementos presentan muy probablemente un origen y comportamiento común en la fase de los sólidos suspendidos del Río Tuy.

Igualmente, el Cd presenta una buena correlación con el elemento Zn en HNO₃ concentrado (**figura 16**) y con el metal pesado Cu en HNO₃, teniendo coeficientes de correlación con valores de 0,9256 y 0,8539; respectivamente.

En el trabajo de Medina, (2000), presentan una concentración promedio de 1,3 ppm de Cd en el Río Guaire, mientras que en el presente trabajo se obtuvo una concentración de Cd total cercana a 3 ppm en el mismo punto. Por ende, se observa un incremento de más del doble de la concentración de este elemento en el Río Tuy.

Según la Gaceta oficial en el decreto 5.245 la concentración máxima permisible es de 1 ppm de Cd, siendo de 1,2 ppm para Long y Morgan (1990) y Long (1995). Por lo que el grado de alteración en el Río Tuy es bien significativo.

El rango de las concentraciones de Co en HCl 1 M en el Río Tuy oscila entre 5 y 10 ppm, aproximadamente (**figura 17a**). Mientras que en la extracción con HNO₃ concentrado los valores de Co son, en general, menores a 5 ppm (figura 17b). Esto indica que este metal pesado se encuentra asociado a la fase de carbonatos, oxi-hidróxidos amorfos y especies sorbidas superficialmente.

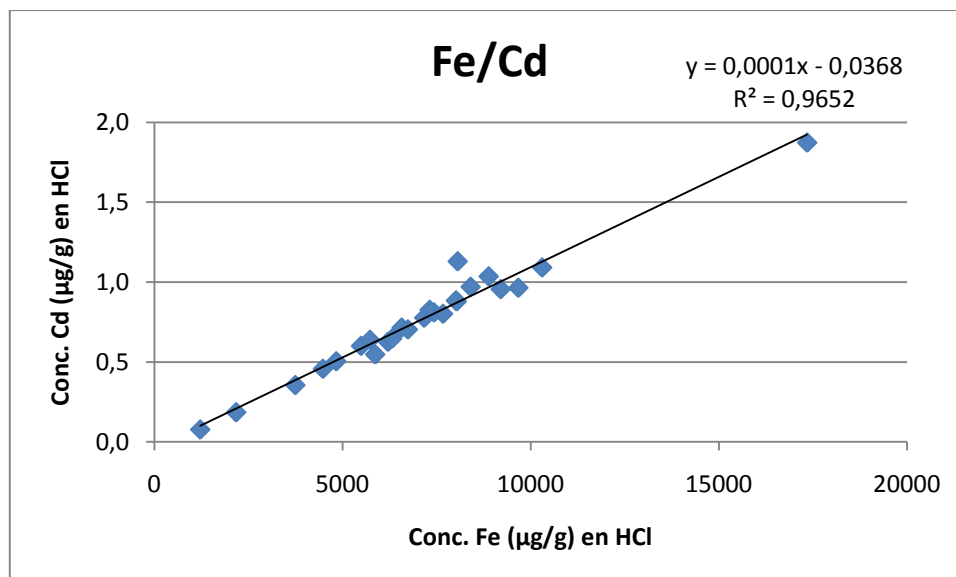


Figura 15. Correlación de Cd con Fe en HCl

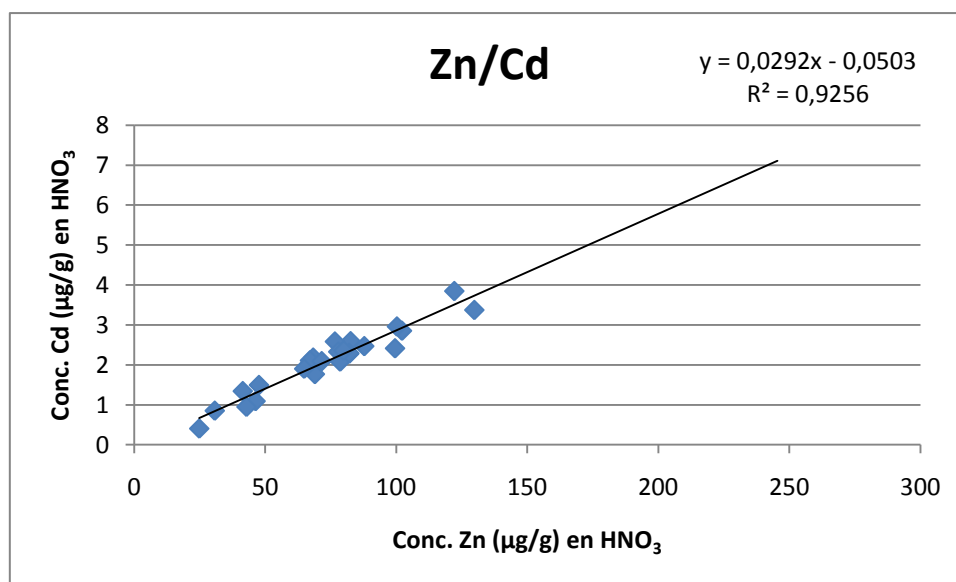


Figura 16. Correlación de Zn con Cd en HNO₃

La distribución del Co en la sección El Consejo-Tácata puede ser respuesta a las actividades agrícolas de la zona, donde el uso de abono y fertilizantes introducen este elemento dentro del Río Tuy por aguas de escorrentía. Luego desde Cúa hasta Boca de Paparo aumenta el aporte de Co al río, proveniente de efluentes domésticos e industriales, por lo cual la concentración se mantiene cercana a los 10 ppm en el extracto de HCl 1 M. Esto es debido, por ejemplo, a que el Co es utilizado como pigmento en cerámicas y pinturas (Cespón, 2008). Cabe señalar que se observa un máximo en Lagartijo, con un valor de 11,6 ppm y un valor de 22,3 ppm para el

afluente Súcuta, puntos que se ven influenciado por actividades agrícolas, domésticas e industriales de las zonas colindantes con el Río Tuy.

En la **figura 17b** se observa que las concentraciones de Co son inferiores a las mostradas en la figura 17a, superando los 5 ppm sólo en los puntos del afluente Quebrada Charallave y Boca de Paparo. Las concentraciones aumentan gradualmente de 1,9 a 7 ppm, indicando que el cobalto no está preferencialmente en la fase geoquímica extraída con HNO₃; y además que las fuentes de este metal se encuentran fundamentalmente en zonas como Caracas, Guarenas y Guatire, en las cuales hay producción, uso o desecho de tintes.

Por otra parte, el Co presenta una buena correlación con Cd en HCl 1 M ($r^2 = 0,8047$). Además el Co presenta también una buena correlación con el Fe en las dos extractos ácidos; con un coeficiente de correlación de 0,8481 para el HCl y un coeficiente de correlación de 0,8647 para el HNO₃. Estas relaciones coincide con lo expresado por Hem, (1985), donde se establece que el Co suele coprecipita con óxidos de Fe y Mn. Aunado a ello, el Co también presenta buena correlación con el Cr en HCl 1 M y con el Mn en HNO₃ concentrado, que puede ser observado en las **figuras 18 y 19**, respectivamente.

Lugo, (1982), determinó en los sólidos suspendidos del Río Tuy una concentración promedio de Co de 23 ppm, aproximadamente. Por su parte, Audry y col., (2006), determinaron un intervalo concentración de Co entre 15 y 25 ppm en sólidos suspendidos del contaminado sistema fluvial Lot-Garonne. Por lo tanto, en el Río Tuy la concentración de Co total (13ppm) ha disminuido en el tiempo y su origen es principalmente natural.

En las **figuras 20a y 20b** se presentan las distribuciones de las concentraciones de Cr en el cauce principal de la cuenca del Río Tuy. Las concentraciones entre cada gráfico presentan un marcado contraste, siendo en todos los casos mayores en HNO₃ concentrado que en HCl 1 M; existiendo casos donde las concentraciones son 4 veces mayor (Boca de Paparo). Por ello, se asocia el Cr a la fase de materia orgánica, oxi-hidróxidos cristalinos, arcillas, especies fuertemente absorbidas y sulfuros.

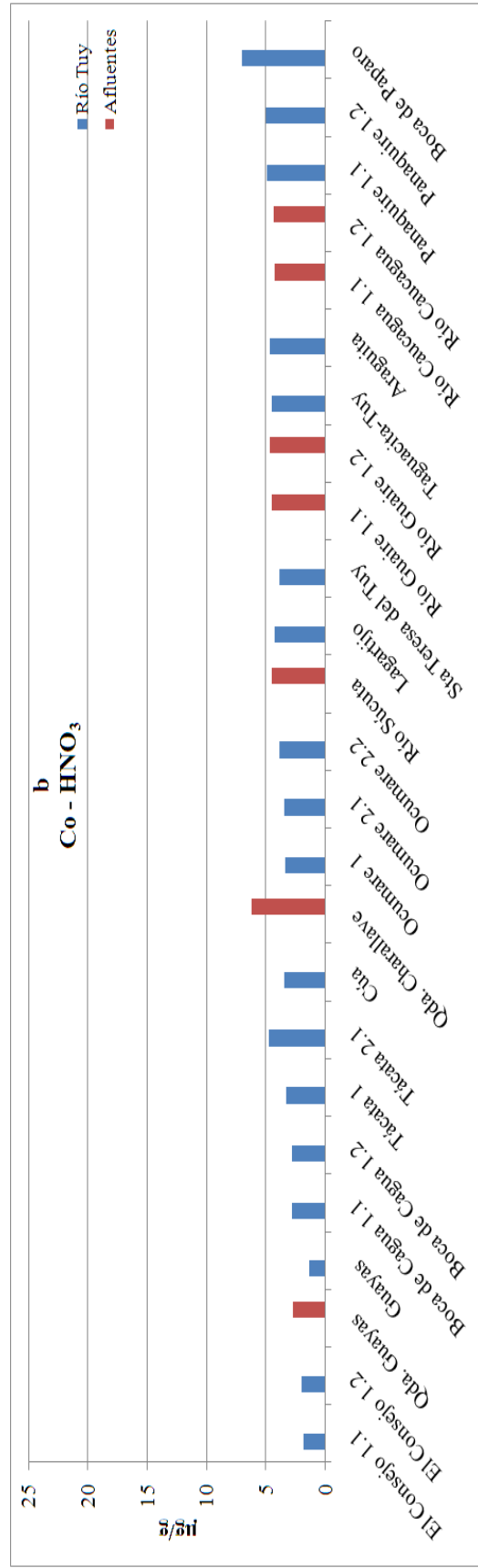
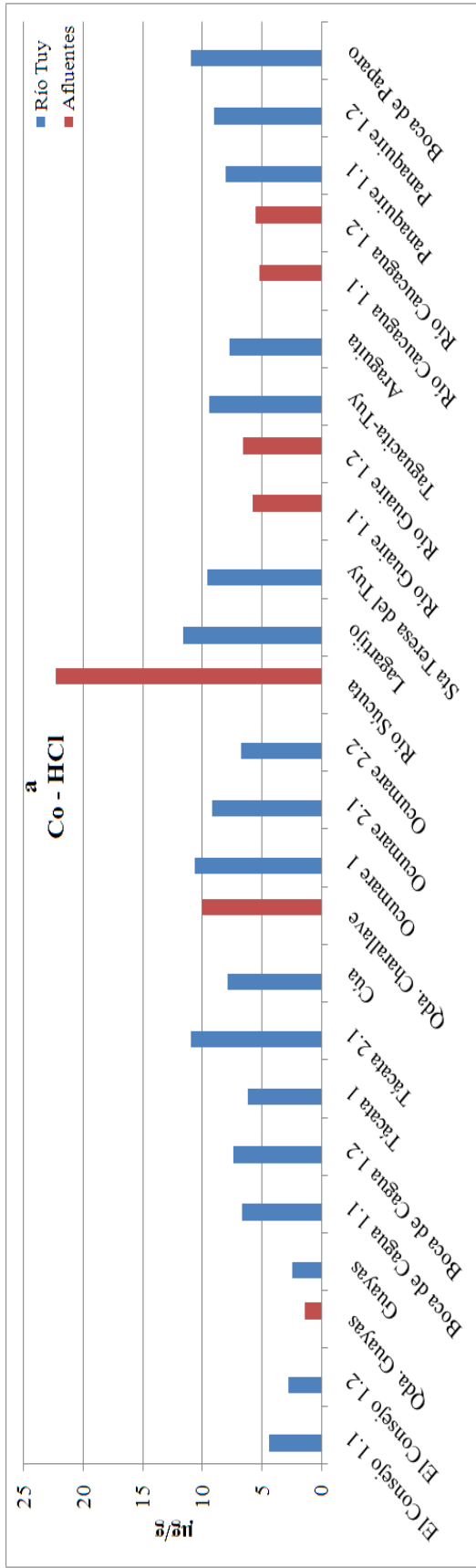


Figura 17. Distribución de la concentración de Co en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO₃ (c)

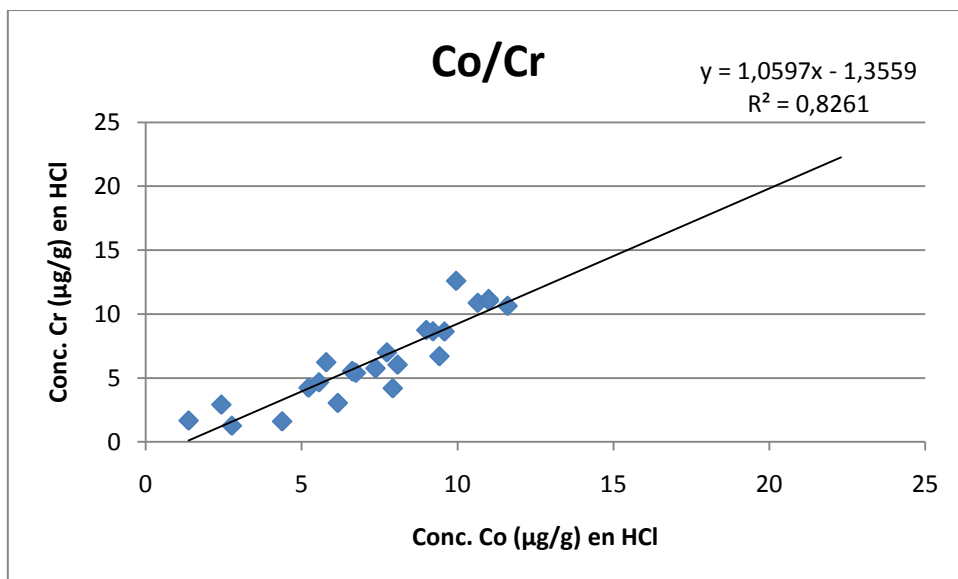


Figura 18. Correlación de Cr con Co en HCl

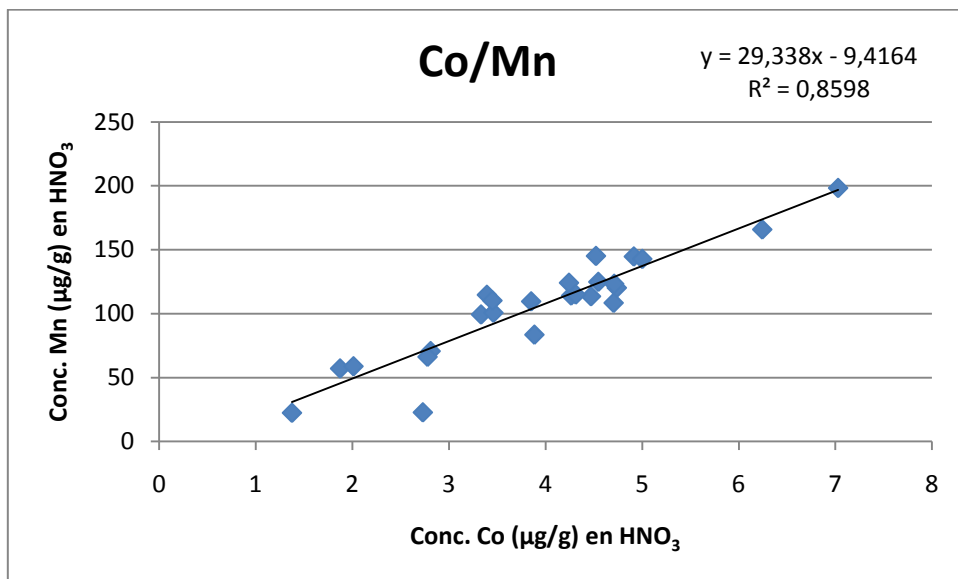


Figura 19. Correlación de Mn con Co en HNO₃

Las cantidades de Cr obtenidas con la extracción del HCl 1 M (**figura 20a**) están en un intervalo de 1,3-11,2 ppm. Desde El Consejo hasta Boca de Cagua, la concentración de Cr (cerca a 6 ppm) parece estar dominada por actividades agropecuarias de la zona. Luego en las localidades de Cúa y Charallave se focaliza un aumento de actividades domésticas e industriales, lo que conlleva a que las concentraciones se establezcan entre 5 y 10 ppm. Concentraciones que son superadas en lugares como Ocumare, Lagartijo y Boca de Paparo por la intensificación de la actividad doméstica (desechos de papeles y alimentos), relacionado por el aumento de la

densidad poblacional, y la actividad industrial entre las localidades de Ocumare y Guatire. Además del aporte de la actividad agropecuaria de San Juan, viene dado por el uso de pesticidas y abono que contiene Cr, y que por aguas de escorrentías es introducido al Río Tuy.

La **figura 20b** indica una concentración mínima de 4,8ppm (Guayas) y una concentración máxima de 47,2 ppm (Boca de Paparo), permitiendo inferir la gran influencia de fuentes de Cr (cemento) en la concentración de este elemento en los sólidos suspendidos del Río Tuy (Klein y col., 1974). La existencia de una alta variabilidad de los datos insinúa que las actividades que aportan Cr al sistema río varían a lo largo del mismo.

De acuerdo con correlaciones realizadas, el Cr se encuentra altamente relacionado con el Fe y Mn en la extracción de ácido nítrico. En los cálculos de los coeficientes de correlación se obtuvo una magnitud de 0,8647 para la relación Fe-Cr, y 0,8598 Mn-Cr (**Apéndice 10**). Ello alude muy probablemente a una alta participación del Cr en los procesos de formación de los oxi-hidróxidos de Fe y Mn; bien sea sustituyéndolos, siendo absorbido o coprecipitado.

Según Medina, (2000), el valor promedio de Cr para ríos no intervenidos es de 64 ppm, y su valor obtenido en el Guaire (~35 ppm) es inferior. Asimismo Blanco, (2007) obtiene una concentración promedio de Cr (en agua regia) de 50 ppm, mientras que en la presente investigación el Cr total es superior a los 30 ppm. Por lo tanto, se puede decir el Río Tuy no presenta una notable contaminación por Cr. Más aún comparándolo con el dato de la USEPA, 1993 (140 ppm) y los de Long y col., (1995) (81 ppm). Por ello, ríos como el Odra (Helios, 2005) se califican como contaminados, por presentar valores que superan los 300ppm.

En la **figura 21a** se observan concentraciones de Ni en el Río Tuy menores que las presentadas en la **figura 21b**. Por ello, se puede decir que el Ni tiene preferencia a ser extraído con HNO₃ concentrado, por lo que es asociado a la fase de materia orgánica, oxi-hidróxidos cristalinos, arcillas, especies fuertemente absorbidas y sulfuros.

Las concentraciones de Ni obtenidas en los extractos ácidos son mayores que las de Cr, no obstante, proporcionalmente, presentan un comportamiento similar en cuanto a su distribuciones.

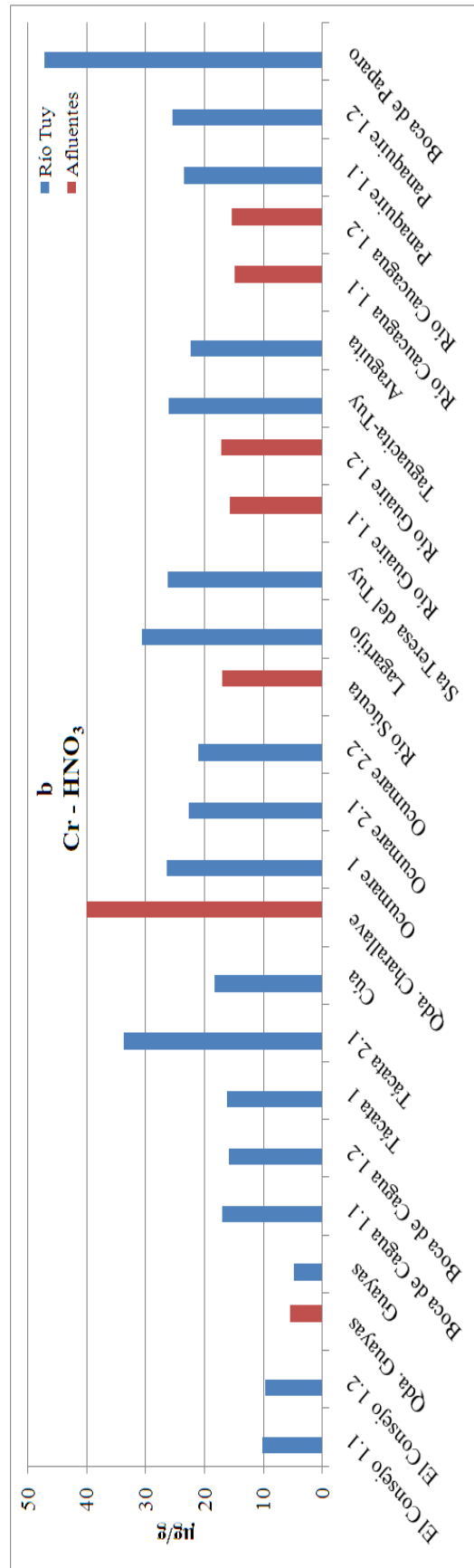
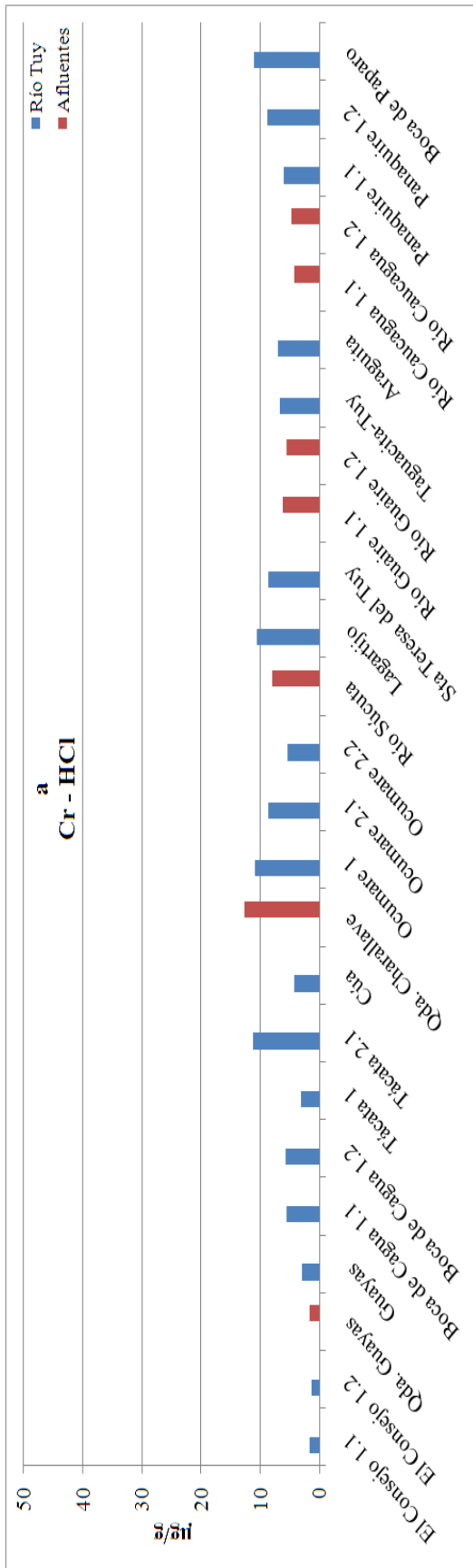


Figura 20. Distribución de la concentración de Cr en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO₃ (c)

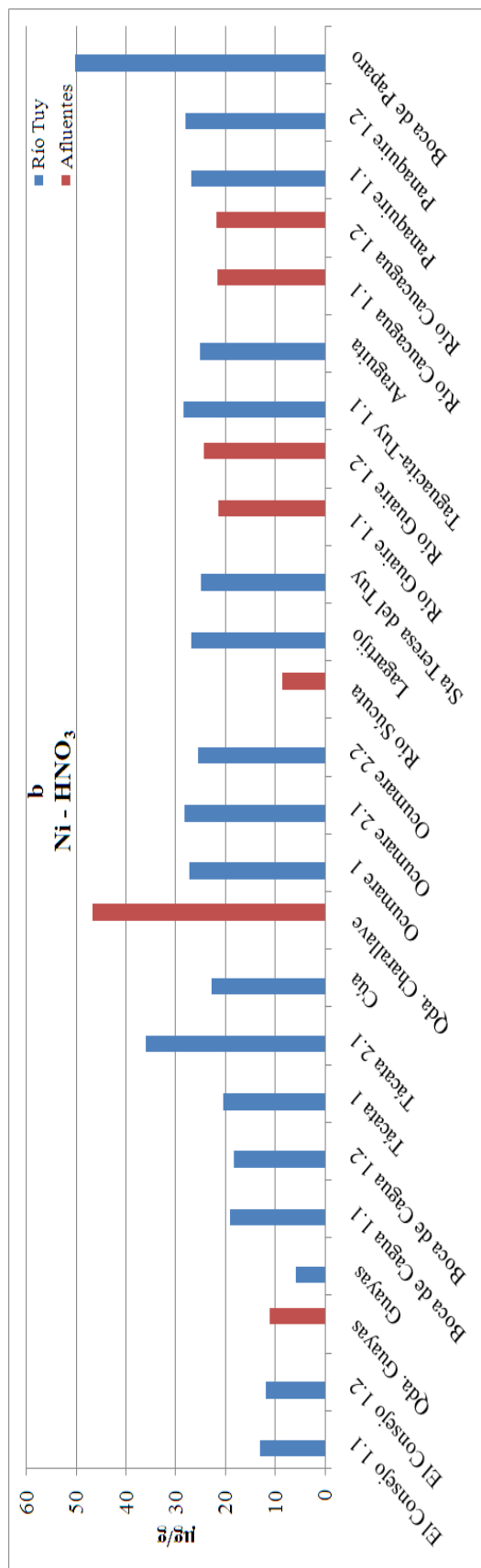
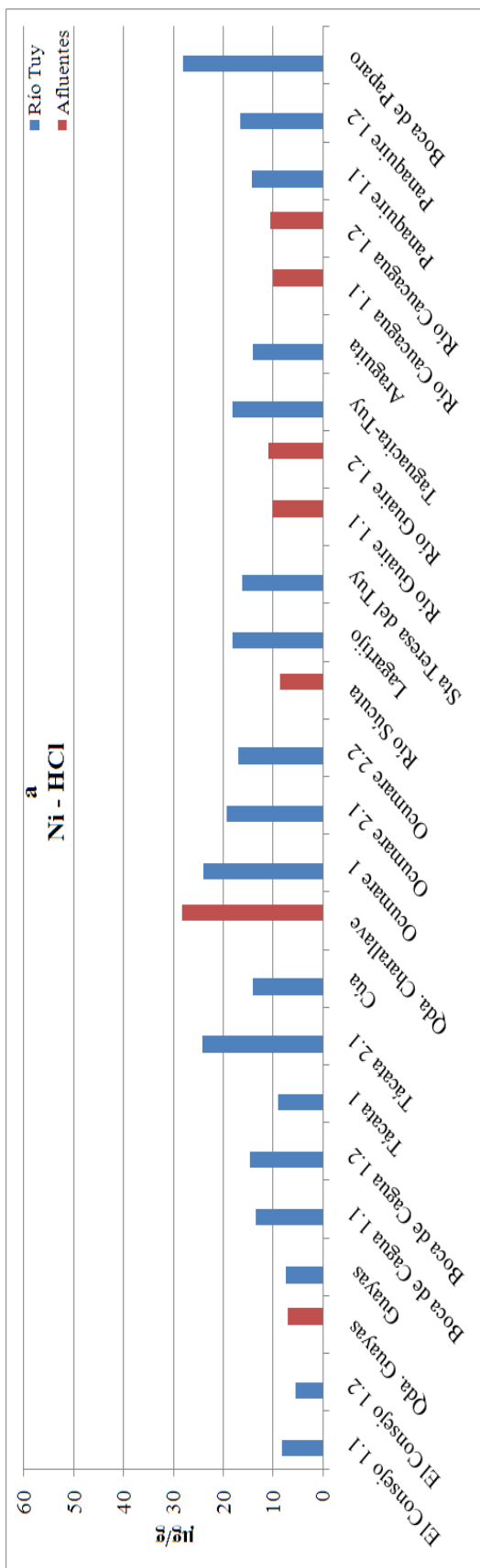


Figura 21. Distribución de la concentración de Ni en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO₃ (c)

Por lo tanto, por estar ambos elementos asociados, las explicaciones dadas para el Cr valen para el Ni.

En las **figuras 21a y 21b** se observan los mayores valores de Ni en el tributario Quebrada Charallave (28,3 ppm en HCl y 46,6 ppm en HNO₃) y Boca de Paparo (28,1 en HCl y 50,3ppm en HNO₃), y los menores valores en El Consejo (5,5 ppm en HCl y 11,9 ppm en HNO₃) y en el Río Guaire (10,2 ppm en HCl y 21,4 ppm en HNO₃). Las fuentes son principalmente domésticas (alta densidad poblacional) e industrias como por ejemplo desechos de alimentos; provientes de Ciudades como Charallave y Caracas.

El comportamiento afín del Ni referente al Cr en los sólidos suspendidos del Río Tuy fue valorada con una alta correlación positiva ($r^2 = 0,8867$) en el HNO₃ concentrado (**figura 22**).

En el trabajo de Lugo, (1982) se observa una concentración promedio de Ni total de 70 ppm, la cual es proveniente principalmente de fuentes naturales. El presente trabajo determinó una concentración inferior de Ni total (55 ppm). Por lo tanto, la disminución de Ni en el Río Tuy permite decir que no hay contaminación por elemento en este sistema fluvial.

El comportamiento de la distribución de Pb en las **figuras 23a y 23b** presenta similitud, distinguiendo claramente mayores concentraciones en el extracto de HCl 1 M. Debido a dicha tendencia se asocia el Pb a la fase de carbonatos, oxi-hidróxidos amorfos y especies sorbidas superficialmente. Dicho comportamiento es similar a lo ocurrido con Ni, por lo que fuentes de Pb como las asociadas al riego y uso de pesticidas, pueden predominar de El Consejo a Táchata. En los Valles del Tuy (Cúa, Charallave, Ocumare) el crecimiento poblacional e industrial ejerce su fuerza como principal fuente contaminante de Pb, aumentando así la concentración de este metal en el Río Tuy entre Guayas y Boca de Cagua.

En las figuras nombradas anteriormente, los afluentes Río Guaire (30 ppm en HCl y 10 ppm en HNO₃) y Río Caucagua (20 ppm en HCl y 5 ppm en HNO₃) presentan valores altos de Pb, sobrepasando al resto; siendo los principales indicadores de la actividad poblacional donde por acción de los automóviles se produce una gran concentración de este metal pesado.

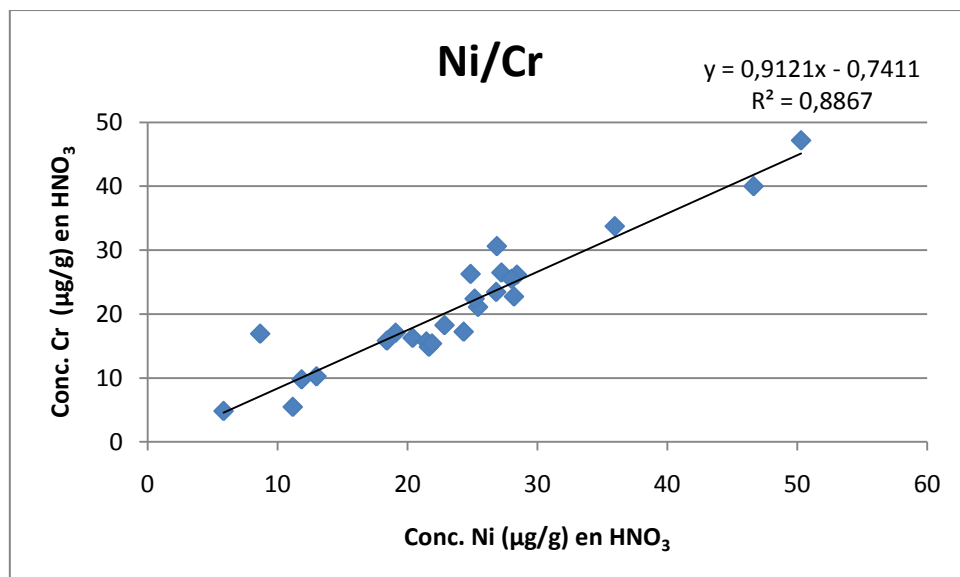


Figura 22. Correlación de Cr con Ni en HNO₃

Además de las actividades agropecuarias como la granjas porcinas, otra fuente de contaminación, es la inyección de los sólidos suspendidos de los Ríos Cauagua y Guaire que conllevan una cantidad alta de contaminantes (metales pesados como el Pb), provenientes de las grandes ciudades de Guarenas, Guatire y Caracas como es aseverado por Blanco (2007) y Medina (2000). Estos autores expresan que estas ciudades son las más determinantes en el deterioro del Río Guaire y por ende del Río Tuy. Así también, las actividades de agricultura en el tramo Panaquire-Boca de Paparo aportan una alta cantidad de Pb al río principal.

En el presente trabajo la concentración promedio de Pb total es 30 ppm, aproximadamente, mientras que en el trabajo de Lugo, (1982) dicha concentración está alrededor de 70 ppm. Por su parte, la Gaceta oficial No 5.245 establece como 5 ppm la concentración de Pb permitida en sedimentos. Por lo tanto, aunque se observa una disminución del Pb en el tiempo en el Río Tuy, aún sus intervalos de concentración se encuentran dentro de los niveles tóxicos.

En el Río Odra altamente alterado se han determinado concentraciones promedio de Pb igual 138ppm, alcanzando valores de 1614 ppm (Helios y col., 2005).

Por otro lado, la concentración de Hg total en el Río Tuy se plantea en dos partes. La primera ilustrada en la **figura 24a**, donde se aprecia un predominio absoluto del punto Quebrada Cúa con una concentración de 1493 ppb. Al observar los puntos cercanos, es notorio que en la zona de

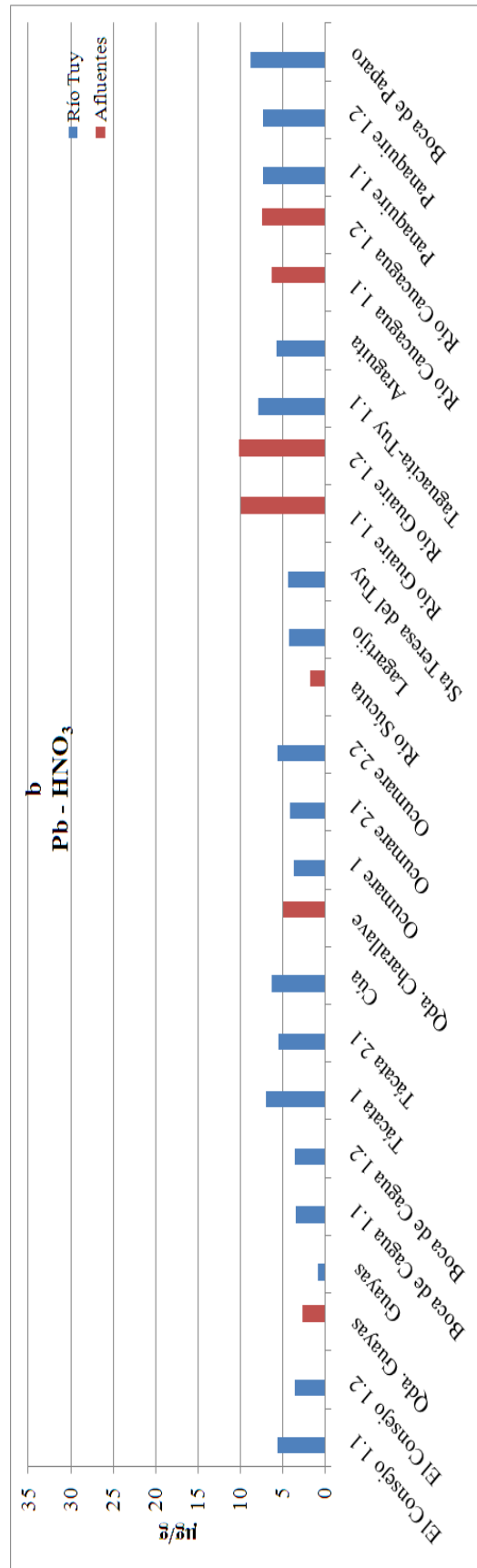
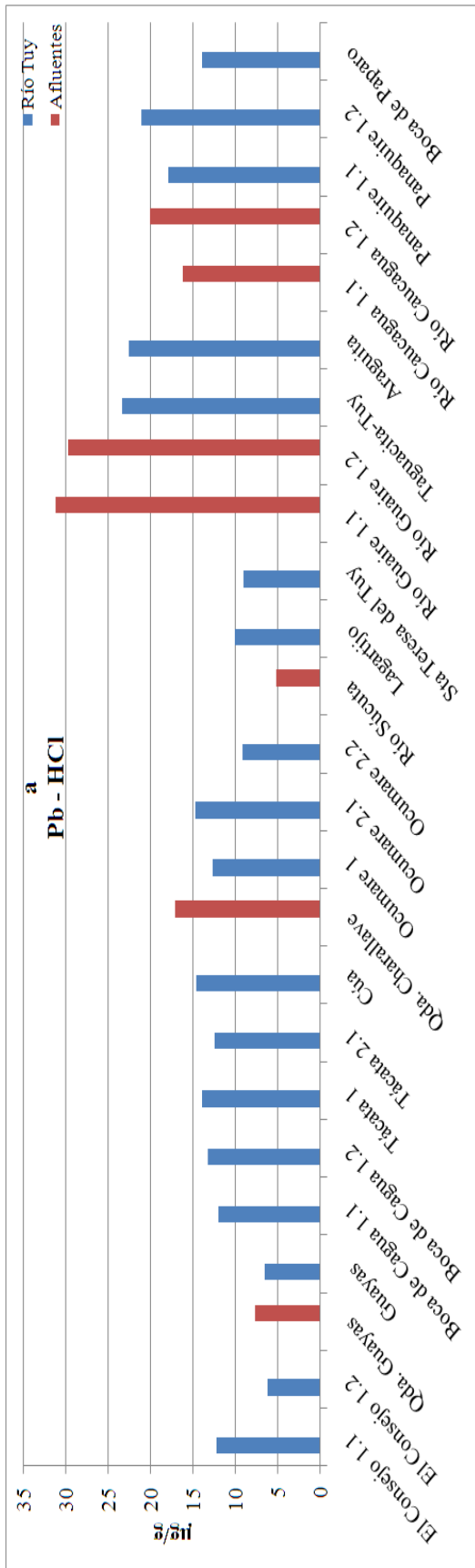


Figura 23. Distribución de la concentración de Pb en los sólidos suspendidos del Río Tuy. Digestión en HCl 1 M y en HNO₃ (c)

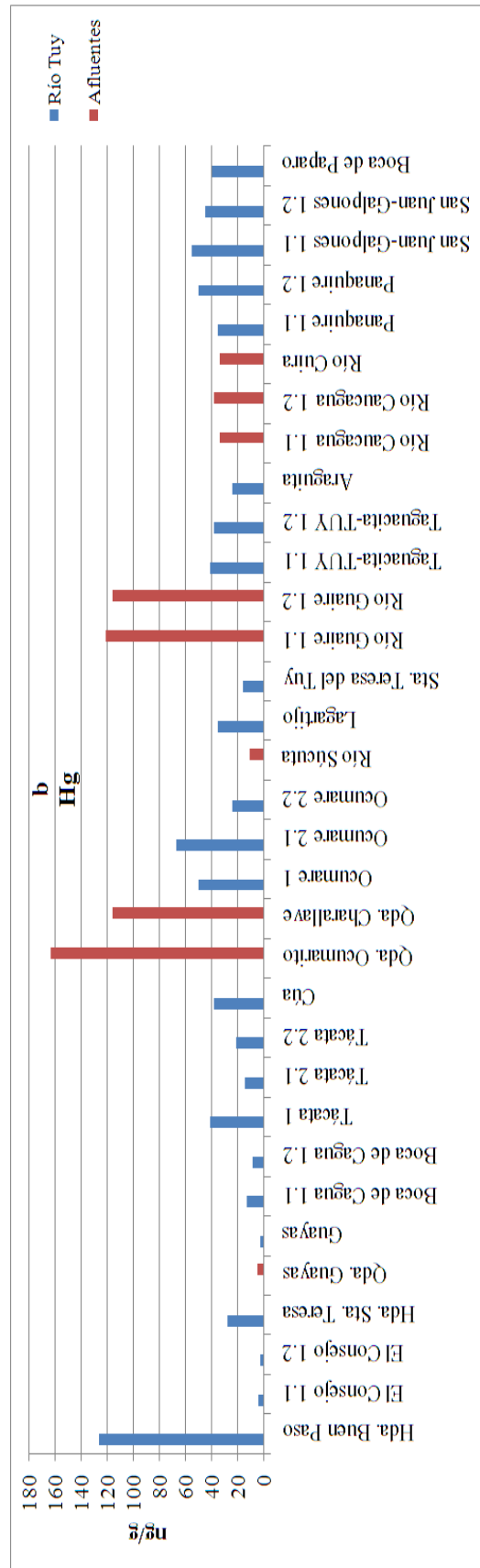
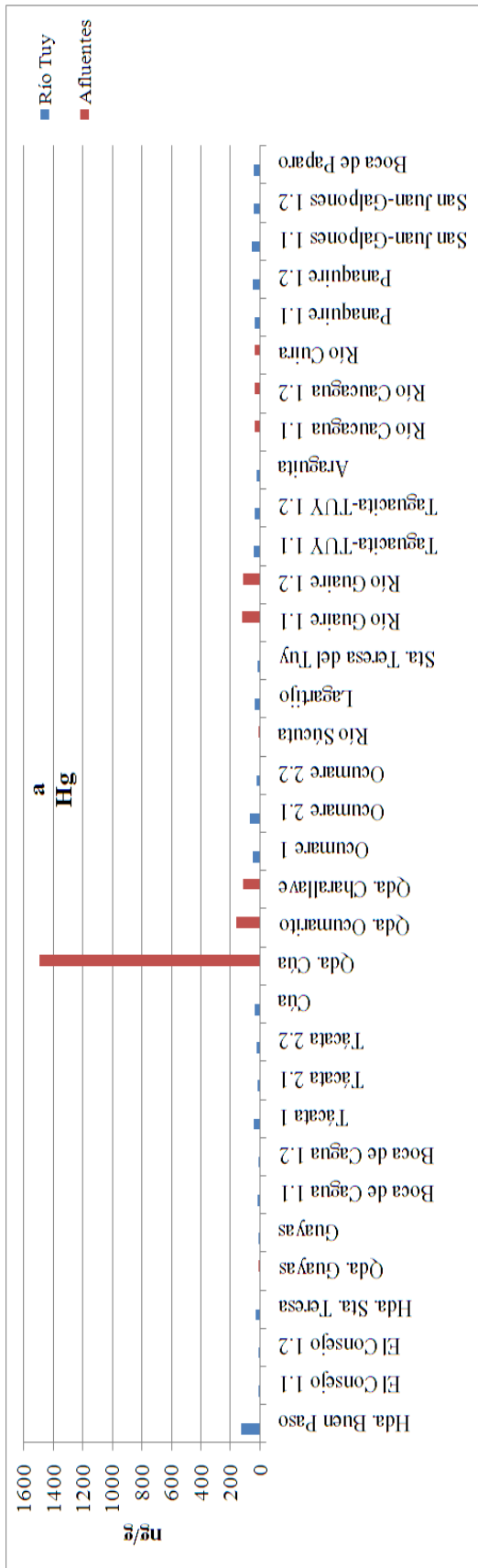


Figura 24. Distribución de la concentración de Hg en los sólidos suspendidos del Río Tuy.

Cúa-Charallave-Ocumare existen fuentes muy importantes de Hg, del tipo industrial, doméstico y agrícola, como pueden ser las fábricas de papel, fundidoras, fertilizantes y pesticidas.

En la **figura 24b** se excluye el punto de muestreo de Quebrada Cúa para distinguir mejor el comportamiento del Hg en los otros puntos. En esta figura resaltan los afluentes Quebrada Ocumarito, Quebrada Charallave y Río Guaire, además de Ocumare. Las concentraciones de este grupo son un reflejo de la intensidad de la actividad doméstica e industrial de estas zonas. Por su parte, el punto de Hacienda Buen Paso también presenta un alto valor de concentración de Hg (126 ppb). Esta anomalía se le adjudica al uso de fertilizantes y pesticidas a gran escala dado que en esta zona se practica la agricultura.

En líneas generales, el resto de los puntos de muestreo presentaron concentraciones de Hg entre 5 y 60 ppb.

Con respecto a las correlaciones interelementales, el Hg total no tuvo una buena correlación con los metales obtenidos por las extracciones ácidas. Sólo presentó coeficientes de correlación pobres con Mn en HCl 1 M y en HNO₃ concentrado, y correlaciones similares con Cd, Ni, Pb y Zn, en HNO₃ concentrado (**Apéndice 10**). Ello sugiere débilmente que el mercurio está asociado al óxido de Mn amorfo y cristalino; al igual que sorbido como el Cd, Ni, Pb y Zn. Esto último observado también por Medina, (2000).

En el trabajo de Lugo, (1982) las concentraciones de Hg en el Río Tuy y sus afluentes están entre 0,2 y 0,7 ppb; mientras que en la presente investigación el intervalo está entre 3 y 150ppb, con un promedio cercano a los 80 ppb. Esto aunado a que la Gaceta oficial N° 5245 establece como máxima concentración permitida para este metal pesado de 20 ppb (en sedimentos) y que Medina, (2000) determina que el valor promedio de Hg para ríos no intervenidos es de 40 ppb (en sólidos suspendidos); indica el alto grado de contaminación que presenta el Río Tuy.

Es conocido que el mercurio es altamente tóxico a bajas concentraciones, pudiendo estar en el sistema acuático de forma elemental, inorgánica y orgánica. Pero principalmente se presenta acompañado por materia orgánica (sustancias húmicas) y formando compuestos como el dimetil mercurio (Gill y Bruland, 1990). En el particular de estudios toxicólogos, como el de Harada, 1995, proveen el conocimiento de que el mercurio es muy tóxico para el hombre, sobre todo para los embriones y fetos humanos.

En síntesis, los elementos Co, Cu, Mn, Pb y Zn son extraídos preferencialmente por HCl 1 M, mientras que el Al, Cd, Cr, Fe, Ni, Zn tienen tendencia a ser extraído por el HNO₃ concentrado.

Es importante señalar que la fracción asociada al HCl se encuentra relacionada con las fases geoquímicas de carbonatos, oxi-hidróxidos amorfos y especies sorbidas superficialmente (e intercambiables). Por su parte, la fracción ligada con HNO₃ se asocia con la materia orgánica, oxihidróxidos cristalinos, especies fuertemente absorbidas, las arcillas y sulfuros. Un aspecto a destacar, es el comportamiento dual del Zn, ya que se encuentra en las dos fases geoquímicas.

En otro sentido, las concentraciones totales de los metales pesados obtenidas fueron comparadas en los puntos de muestreo comunes con las concentraciones del trabajo de Lugo, (1982) en función del Factor de Enriquecimiento. Este índice de contaminación fue calculado de acuerdo a la ecuación propuesta por Ergin y col. (1991) señalada en el Marco Teórico. Los resultados obtenidos para cada caso se observa en la **tabla N° 15**. De allí se desprende que los metales pesados Co, Cr, Cu, Ni y Pb en los sólidos suspendidos provienen principalmente de fuentes naturales, ya que los valores de FE son menores a 2; haciendo la salvedad en Guayas donde el FE para Cu es igual a 3,7. Sin embargo, según Zhang y Liu, 2002, se puede decir que el Cu en los puntos Lagartijo y Araguaita proviene de desechos antropogénicos. Del mismo modo, según Sutherland, 2000, el Zn presenta enriquecimiento moderado en los puntos de Guayas, Río Súcuta, Lagartijo y Panaquire. Con respecto al Mn, en líneas generales presentan valores mayores a 1,5 (excepto en Quebrada Guayas), lo cual corresponde a un enriquecimiento significativo. El Cd posee un FE superior a 2 en todos los casos, señalando que su fuente es fundamentalmente antrópica, siendo un aspecto negativo dado que éste es un elemento muy tóxico a bajas concentraciones. Por último el Hg presenta los mayores valores que hablan de un grado de contaminación muy alto, denominado enriquecimiento extremadamente alto, indicando así una clara una intervención del hombre (Sutherland, 2000).

Por otro lado, en la **tabla N° 16** se observa los coeficientes de reparto obtenidos a partir de la ecuación expresada en Lu y Allen (2001), en la cual se divide la concentración de un metal pesado en la fase sólida con respecto a su concentración en la fase disuelta. Donde en el empleo más sencillo de herramienta es observar la tendencia del metal hacia una de las fases.

Tabla N° 15. Factor de enriquecimiento de los metales pesados en el Río Tuy

Lugar	Cd	Co	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
Qda. Guayas	3,8	0,5	0,4	0,7	1,1	0,9	0,5	1,3	35
Guayas	2,7	1,0	0,4	3,7	1,6	0,9	0,5	3,1	32
Tácata	2,4	1,1	0,5	1,3	1,9	0,9	0,5	1,4	51
Río Súcuta	3,9	1,1	0,4	1,3	1,7	0,6	0,1	2,5	-
Lagartijo	3,4	1,1	0,7	1,7	3,1	0,8	0,4	1,8	153
Río Guaire	2,8	0,9	0,5	1,4	2,3	0,7	0,3	1,2	313
Araguita	3,1	1,0	0,7	1,8	2,2	0,9	0,4	1,4	62
Río Caucagua	2,4	0,6	0,7	1,2	1,6	0,7	0,7	1,2	104
Panaquire	4,2	1,1	0,7	1,4	2,4	1,0	0,8	1,7	194
Boca de Paparo	3,2	1,0	1,1	1,2	2,0	1,2	0,5	1,3	116

(elemento de referencia: Fe)

Tabla N° 16. Coeficientes de reparto de metales pesados determinados en el Río Tuy

Lugar	Al	Co	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn
El Consejo	101	14	12	371	67	11	6	45
Qda. Guayas	316	7	31	44	0	7	6	48
Guayas	102	10	22	301	1	5	25	48
Boca de Cagua	341	24	25	1079	19	9	7	71
Tácata	350	52	22	926	36	23	36	88
Cúa	452	57	14	1465	133	12	19	58
Qda. Charallave	786	23	31	1473	21	8	44	108
Ocumare	216	52	13	550	72	5	20	35
Río Súcuta	701	268	40	1229	912	25	7	170
Lagartijo	1055	79	18	1818	306	6	11	66
Sta. Teresa del Tuy	443	34	9	1393	17	7	34	30
Río Guaire	277	13	11	862	21	4	14	35
Taguacita-Tuy	790	35	85	955	-	13	39	900
Araguita	289	21	25	1022	12	5	19	94
Río Caucagua	574	16	14	997	62	5	10	56
Panaquire	425	19	13	1347	2	6	22	58
Boca de Paparo	909	36	21	477	8	11	10	53

En la **tabla N° 16** se observa que la tendencia general de estos metales pesados es asociarse a la fase de sólidos suspendidos, mostrando así coeficientes de repartos mucho mayor a la unidad; enriquecimientos en dos órdenes de magnitud. Lo que también se ve reflejado también en las concentraciones elementales determinadas para las dos fases.

Por lo tanto, debido a la gran carga de metales pesados que se encuentran asociados a los sólidos suspendidos, hay que considerar el alto valor de esta investigación puesto que evalúa el desarrollo de los últimos años del Río Tuy, actualizando datos de más de dos décadas. Proveyendo de esta manera información actual, y adicional, a la que en su momento dió Lugo en 1982, sobre los metales pesados en sólidos suspendidos. Por ende, al conocer la situación actual del estado de contaminación de esta importante cuenca hidrográfica de Venezuela y su potencial en contaminantes resalta aún más lo importancia del presente trabajo

CONCLUSIONES

- Las máximas concentraciones de sólidos suspendidos en el Río Tuy se encontraron principalmente en los puntos de muestreo Tuy antes del Guare, Tácata (A), Cúa y en Santa Teresa del Tuy asociados a areneras, desechos domésticos e industriales.
- En segunda instancia, se presentaron altas concentraciones en Ocumare, Lagartijo, Panaquire y Boca de Paparo asociados a las actividades domésticas e industriales. Con respecto a los afluentes Quebrada Guayas, Río Caucagua y Río Guaire presentaron altos valores de sólidos suspendidos asociados a desechos de origen doméstico, industrial y agropecuario.
- Las mínimas concentraciones de sólidos suspendidos se encontraron en los afluentes Río Tarma, Río Taguaza, Río Cuirá, Quebrada Cúa y Río Guare.
- En el río principal, los puntos de muestreo que presentaron baja concentración de sólidos suspendidos fueron la Hacienda Buen Paso, Hacienda Torrecasa, Hacienda Santa Teresa, Tácata (B) y Taguacita-Tuy.
- Los elementos Co, Cu, Mn, Pb y Zn están asociados a las fases de carbonatos, oxi-hidróxidos amorfos y especies sorbidas superficialmente (e intercambiables). Por su lado, el Al, Cd, Cr, Fe, Ni, Zn tienen tendencia a ser extraído por el HNO₃ concentrado; están asociados con la materia orgánica, oxihidróxidos cristalinos, especies fuertemente absorbidas, las arcillas y sulfuros.
- Los metales pesados Al, Co, Cr, Fe, Mn y Ni proceden principalmente de fuentes naturales, fundamentalmente regulado por factores litológicos. Mientras que las fuentes de los metales pesados Cd, Cu, Hg, Pb y Zn son principalmente antrópicas, asociadas a las actividades domésticas, agropecuarias e industriales.
- Según los coeficientes de reparto calculados, se observó que en el Río Tuy los metales pesados están asociados principalmente a los sólidos suspendidos.
- Las mayores concentraciones para los elementos Cd, Cu, Pb y Zn se presentan en la zona de Tácata, Lagartijo, Araguaita, Panaquire y Boca de Paparo. Presentando importantes aportes de estos elementos los afluentes Quebrada Charallave, Río Súcuta, Río Guaire y Río Caucagua. Lo cual indica que en estas zonas ocurre la mayor inyección de estos metales pesados de origen antrópico, asociado con actividades industriales, agrícolas y domésticas.

- En Ocumare, Panaquire y San Juan.Galpones se presentaron los mayores valores de concentración para Hg en el Río Tuy; existiendo muy importantes aportes de este elemento por parte de los afluentes Quebrada Cúa, Quebrada Ocumarito, Quebrada Charallave y el Río Guaire. Esto pudiera estar relacionado con las actividades agrícolas, industriales y doméstica de estas zonas.
- Los menores niveles de concentración para los elementos Cd, Cu, Hg, Pb y Zn ocurren en El Consejo, aguas arribas de este punto y en Guayas.
- En general, las concentraciones de metales pesados determinadas fueron mayores que la obtenida por Lugo, (1982), a pesar de que el presente trabajo presentó una concentración promedio menor de sólidos suspendidos.
- Las concentraciones elementales determinadas en el afluente Río Súcuta sugieren que este cuerpo de agua está siendo alterado por las actividades humanas de la zona. Lo cual difiere con lo obtenido por Lugo, (1982), dado que este autor presentaba este afluente como no contaminado.

RECOMENDACIONES

- Determinar la concentración de carbono orgánico para corroborar cuales metales pasados están asociados a esta fase.
- Caracterizar y determinar la composición mineralógica de los sólidos suspendidos por las técnicas de Microscopía Electrónica y Difracción de Rayos X.
- Realizar un estudio de sólidos suspendidos en la época de sequía del Río Tuy para determinar variaciones en cuanto a la concentración de los mismos y la concentración de metales pesados asociados a ellos.
- Establecer un estudio geoquímico anual de los sólidos disueltos, sólidos suspendidos y sedimentos de fondo del Río Tuy para monitorear el desarrollo del río, y de esta manera tomar medidas en pro de la restauración del equilibrio ambiental.
- Realizar la extracción secuencial propuesta por Tessier y col., (1979) para determinar con más detalle a cual fase está asociado cada metal pesado.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta, V.; Lodeiros, C.; Senior, W. y Martínez, G., (2002). *Niveles de metales pesados en sedimentos superficiales en tres zonas litorales de Venezuela*. *Interciencias* 27, 686-690p.

Adam, P. (1990): *Saltmarsh ecology*. Cambridge University Press. Cambridge. Gran Bretaña. 461p.

Akcay, H.; Oguz, A.; Karapire C. (2003). *Study of heavy metal pollution and speciation in Buyak Menderes and Gediz river sediments*. *Water Research* 37. 813-822p.

Alagarsamy, R. (2006). *Distribution and seasonal variation of trace metals in surface sediments of the Mandovi estuary, west coast of India*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 67, 333–339p.

Allen, H. (1993). *The significance of trace metal speciation for water, sediment and soil quality standards*. *Sci Total Environ; Suppl* 134:23-45p.

Andara, A. (1993). *Transporte de nutrientes por los ríos Mitare, Tocuyo, Yaracuy, Unare, Neverí y Manzanares*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ingeniería; Facultad de Ciencias, Postgrado en Geoquímica. Caracas.

Audry S, Blanc G, Schäfer J. (2006). *Solid state partitioning of trace metals in suspended particulate matter from a river system affected by smelting-waste drainage*. *Sci Total Environ; 363:216–36p*.

Beeftink, W.; Nieuwenhuize, J.; Stoepler, M.; Mohl, C. (1982). *Heavy-metal accumulation in salt marshes from the western and eastern Scheldt*. *The Science of the Environment*, 25. 199-223p.

Billota, G. y Brazier, R. (2008). *Understanding the influence of suspended solids on water quality and aquatic biota*. *Water Research* 42. 2849 – 2861p

Baird, C. (2001) *Química Ambiental*. Editorial Reverté. Barcelona, 622p

Birkett, C., Tollner, E.W., Gattie, D.K. (2007). *Total suspended solids and flow regime effects on periphyton development in a laboratory channel*. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs. 50 (3), 1095–1104p.

Blanco, J. (2007). *Concentración y Distribución de Metales Pesados en Sólidos Suspendidos del Río Guaire*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de ciencias, Escuela de Química, Departamento de Geoquímica. Caracas

Bloom, A. (1998). *Geomorphology: A Systematic Analysis of Late Cenozoic Landforms*. Prentice Hall. New Jersey, USA. 482p.

Calmano, W., Hong, J., Förstner, U. (1993) *Binding and mobilization of heavy metals in contaminated sediments affected by pH and redox potential*. Water Science Technology 28 (8-9), 223-235p.

Carpenter S., Caraco N., Correll D., Howarth R., Sharpley A., Smith V. (1998). *Nonpoint pollution of surface waters*. Ecol. Appl. 8. 559-568p.

Carvalho, C, M.S.M.B. Salomao, M.M. Molisania, C.E. Rezende, L.D. Lacerda. (2002). *Contribution of a medium-sized tropical river to the particulate heavy-metal load for the South Atlantic Ocean*. The Science of the Total Environment 284. 85-93p.

Castellan, G., (1998). *Fisicoquímica*. Segunda edición. Addison Wesley Longman. México. 452p.

Cespón, R. (2008). *Desarrollo de métodos analíticos automáticos para la determinación de metales en el medio ambiente laboral*. Tesis Doctoral, Facultad de Química, Universidad de Santiago de Compostela. España 589p.

Colin Baird (2001). *Química Ambiental*. Editorial Reverté, S.A. Barcelona – España. 662p.

Davis, A.P., Shokouhian, M., Ni, S. (2001). *Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources*. Chemosphere 44, 997–1009p.

Davis, T.; Volesky, B.; Mucci, A. (2003). *A review of the biochemistry of heavy metal biosorption by brown algae*. Water Research 37 (2003) 4311–4330p.

Dawson, E.J., Macklin, M.G. (1998). *Speciation of heavy metals in floodplain and flood sediments: a reconnaissance survey of the Aire Valley, West Yorkshire, Great Britain*. Environ.Geochem. Health 20, 67–76p.

Dekov, V. M., Araujo, F., Van Grieken, R., Subramanian, V. (1998). *Chemical composition of sediments and suspended matter from the Cauvey and Brahmaputra rivers (India)*. The Science of the Total Environment 212, 89-105p.

Dokmeci A. H., A. Ongen, S. Dagdeviren, (2009). *Environmental toxicity of cadmium and health effect*, J. Environ. Prot. Ecol. 10. 84-93p.

Droppo, I.G. (2001). *Rethinking what constitutes suspended sediment*. Hydrol. Process. 15, 1551–1564p.

Du Laing, G.; Rinklebe, J.; Vandecasteele, B. Meers, E. y Tack F.M.G. (2008). *Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review*. Science of the Total Environment 407, 3972 –3985p.

Dyer, K.R., Manning, A.J. (1998). *Observation of the size, settling velocity and effective density of flocs, and their fractal dimensions*. Journal of Sea Research 41, 87–95p.

Emile, M.; Jonathan, R. (1998). *The effect of salinity on binding of Cd, Cr, Cu and Zn to dissolved organic matter*. Chemosphere 37. 861-874p.

E.P.A (1993). *Normativa de contenido máximo de metales pesados permitido en suelos*. U.S.A, 174-186p.

Ergin, M.; Saydam, C.; Basturk, O.; Erdem, E. y Yoruk, R. (1991). *Heavy metal concentrations in surface sediments from the two coastal inlets of the northeastern Sea of Marmara*, Chemical Geology, 91 269-285p.

Filgueiras A., Lavilla I, Bendicho C. (2002). *Chemical sequential extraction for metal partitioning in environmental solid samples*. J Environ Monit; 4:823 –857p.

Förstner,U., Ahlf, W., Calmano, W., Kersten, M. (1990). *Sediment criteria development–contributions from environmental geochemistry to water quality management*. In D. Helling,P. Rothe, U. Förstner, & P. Stoffers (Eds.), *Sediments and environmental geochemistry, selected aspects and case histories* (pp. 31–338). Berlin: Springer.

Forstner U. y Wittmann G. (1981). *Heavy metal pollution in the aquatic environment (2nd Ed)*. Spring-verlag. Berlin. Heidelberg New York. pp 3-70.

Fukue, M., Mulligan, C.N., Sato, Y., Fujikawa, T. (2007). *Effects of organic suspended solids and their sedimentation on the surrounding sea area*. Environ. Pollut. 149,70–78p.

FUNDAMBIENTE. (2006). *Recursos Hídricos de Venezuela*. Sky Visión Publicidad. Caracas-Venezuela.

Gaceta oficial (1999). *Contenido máximo permisibles de lixiviados en suelo, decreto 5.245*. Caracas, Venezuela.

Gaillardet, J., Dupre, B., Allegre, C.J. (1999). *Geochemistry of large river suspended sediments: Silicate weathering or crustal recycling?* Geochimica et Cosmochimica Acta 63 (23/24), 4037–4051p.

García, I. y Dorronsoro, C. (2000). *Contaminación por metales pesados*. Departamento de edafología y química agrícola. Universidad de Granada. España.

Garnier, J.; Ciffroy, P.; Lakhdar, Bh. (2006). *Implications of short and long term (30 days) sorption on the desorption kinetic of trace metals (Cd, Zn, Co, Mn, Fe, Ag, Cs) associated with river suspended matter*. Sci. Total Environ. 366. 350–360p.

Gibbs, R. (1967). *The Geochemistry of the Amazon River System, The factor that control the salinity and the composition and concentration of the suspended solids*. Geological Society of America Bulletin, 78 (10), 1203-1232p.

Gibbs, R. (1970). *Mechanisms controlling world water chemistry*. Science 170, 1088–1090p.

Gill, G. y Bruland, K. (1990). *Mercury speciation in surface freshwater systems in California and other areas*. Environmental Science and Technology 24, 1392-1400p.

González de Juana, C.; Iturralde de Arozena J. y Picard Cadillat, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*. Ediciones FONVIVES. Caracas. 1031p.

González, F. (1982). *Introducción a la geoquímica*. Segunda edición. Eva V. Chesneau. Washington D.C. 144p.

Gordeev, V.; Rachold V.; Vlasova I. (2004). *Geochemical behaviour of major and trace elements in the suspended particulate material of the Irtysh river, the main tributary of the Ob river, Siberia*. Appl Geochem 2004;19:593– 610p.

Gotoh, S.; Patrick, W. (1974). *Transformation of iron in a waterlogged soil as influenced by redox potencial and pH*. Soil Sci. Soc. Amer. Proc, Vol. 38. 66-71p.

Green, G., Williamson, B., Bull, D., Oldman, J., MacDonald, I., Mills, G. (2001). *Prediction of Contaminant Accumulation in Auckland Estuaries*. NIWA Client Report: ARC01252. NIWA, Hamilton, New Zealand. 78p.

Guillén, R. (1982). *Análisis químico de los elementos: Cu, Pb, Zn, Cd, Cr, Ni, Mn, Fe, Co, As, Hg y C_(orgánico) en los sedimentos del Río Tuy*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas.

Gundersen, P.; Steinnes E. (2003). *Influence of pH and TOC concentration on Cu, Zn, Cd, and Al speciation in rivers*, *Water. Res.* 37. 307–318p.

Hakanson L., Mikrenska M., Petrov K. y Foster I. (2003). *Suspended particulate matter (SPM) in rivers: Empirical data and models*. *Ecological Modelling*, 183 (2-3), 251-267p.

Haygarth, P.M., Bilotta, G.S., Bol, R., Brazier, R., Butler, P.J., Freer, J., Gimbert, L.J., Granger, S.J., Krueger, T., Naden, P., Old, G., Quinton, J.N., Smith, B., Worsfold, P.J. (2006). *Processes affecting transfer of sediment and colloids, with associated phosphorus, from intensively farmed grasslands: an overview of key issues*. *Hydrol. Process.* 20, 4407–4413p.

Harada, M. (1995). *Minamata diseased methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution*. *Critical Reviews in Toxicology* 25, 1-24p.

Helios E.; Adamiec E. y Aleksander-Kwaterczak U. (2005). *Distribution of trace metals in the Odra River system: Water–suspended matter–sediments*. *Limnologica* 35, 185–198p.

Hem, J. (1985). *Study and Interpretation of the chemical characteristics of Natural Water*. U.S. Geological Survey. Tercera Edición. USA, 210 p.

Hernández, N. (2011). *Estudio geoquímico de los sólidos disueltos de la cuenca del Río Tuy*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de ciencias, Escuela de Química, Departamento de Geoquímica. Caracas

Herngren, L.; Goonetilleke A.; Ayoko G. (2005). *Understanding heavy metal and suspended solids relationships in urban stormwater using simulated rainfall*. Journal of Environmental Management 76. 149–158p.

Henríquez, R. (2011). *Caracterización geoquímica de metales pesados en los sedimentos de fondo de la cuenca del Río Tuy, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de ciencias, Escuela de Química, Departamento de Geoquímica. Caracas

Hesse, P. (1971). *A Textbook of Soil Chemical Analysis*. Murray. London. 247p.

Hynes H. B. N. (1970). *The Ecology of Running Water*. University of Toronto Press, Toronto.

Hynes H. B. N. (1974). *The Biology of Polluted Water*. Liverpool University Press, Liverpool. 202p.

Jonas, P.J.C., Millward, G.E. (2010). *Metals and nutrients in the Severn Estuary and Bristol Channel: contemporary inputs and distribution*. Marine Pollution Bulletin 61, 52–67p.

Kelderman, P.; Osman, A. (2007). *Effect of redox potential on heavy metal binding forms in polluted canal sediments in Delft (The Netherlands)*. Water Res. 41. 4251–4261p.

Kennedy, V. y Zellweger G. (1974). *Filter pore-size effects on the Analysis of Al, Fe, Mn and Ti in water*. Water Resources Research, 10 (4), 785-790p.

Klein L.A., Lang M., Nash M. y Kirschner S.L., (1974). *Sources of metals in New York City wastewater*. Journal water Pollution Control Fed. 46, 2653-2663p.

Kronvang, B., Laubel, A., Larsen, S.E., Friberg, N. (2003). *Pesticides and heavy metals in Danish streambed sediment*. Hydrobiologia 494 (1–3), 93–101p.

Li S., S. Gu, X. Tan, Q. Zhang. (2009). *Water quality in the upper Han River basin, China: 10 The impacts of land use/land cover in riparian buffer zone*, J. Hazard. Mater. 165. 317-324p.

Lloyd, D. (1987). *Turbidity as a water quality standard for Salmonid habitats in Alaska, North Am. J. Fish, Manage* 7. 34-45p.

Long, E., Morgan, L. (1990). *The potential for biological effects of sediment-sorbed contaminants tested in the National Status and Trends Program*. NOAA Technical Memorandum NOS OMA 52. National Oceanic and Atmospheric Administration. Seattle, Washington, 175p.

Long, E., Macdonald, D., Smith, S., Calder, F. (1995). *Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments*. Environmental Management 19, 81–97p.

Lu, Y., Allen, H. (2001). *Partitioning of copper onto suspended particulate matter in river waters*. Sci. Total Environ. 277, 119–132p.

Lugo, I. (1982). *Estudio geoquímico de los sólidos suspendidos transportados por el Río Tuy*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química. Facultad de Ciencias. Caracas.

Luoma S. (1983). *Bioavailability of trace metals to aquatic organisms. A review*. Sci Total Environ; 28:1-22p.

Medina, J. (2000). *Estudio químico de los sólidos suspendidos del Río Guaire*. Trabajo Especial de Grado. Facultad de Ciencias. Universidad Central de Venezuela. Caracas. 97p.

Meybeck, M. (1977). *Dissolved and suspended matter carried by rivers: composition time and space variations and world balance*. In: *Golterman HL (ed) Interaction between sediments and fresh waters*. Amnsterdam, Junk an Pudoc, 25-32p.

Mogollón, J. (1985). *Estudio geoquímico de la contaminación de sedimentos de la cuenca del Río Tuy*. Trabajo de Ascenso de la categoría de Instructor a Profesor Asistente, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas.

Mogollón, J. (1989). *Estudio de los factores que afectan el comportamiento en función de distancia y tiempo de los parámetros físico-químicos de las aguas, Corgánico y metales pesados en los sedimentos de la cuenca del Río Tuy*. Trabajo de Ascenso de la categoría Profesos Asistente a Profesor Agregado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas.

MOPU. (1982). *Los residuos tóxicos y peligrosos*. Dirección General del Medio Ambiente, Madrid. 398p.

Moreno, R. (2009). *Caracterización geoquímica de los sedimentos de fondo de la zona este del Golfete de Cuare y su zona próxima costera, estado Falcón*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela, Facultad de ciencias, Escuela de Química, Departamento de Geoquímica. Caracas

Muller, G. (1981). *Die Schwermetallbelastung der Sedimente des Neckars und Seiner Nebenflüsse*. Chemiker-Zeitung, 6. 157-164p.

Muller B., M. Berg, Z.P. Yao, X.F. Zhang, D. Wang, A. Pfluger. (2008). *How polluted is the Yangtze River? Water quality downstream from the Three Gorges Dam*, Sci. Total Environ. 402. 232-247p.

Murgel, S. (1984) *Limnología sanitaria. Estudio de la polucion de aguas continentales*. Secretaria general de la OEA. Programa regional de desarrollo científico y tecnológico. Monografía n° 28. Washington. 79p.

Olivares, S.; De La Rosa, D.; Lima, L.; Graham, D.; Do Alessandro, K.; Borroto, J.; Martínez, F. (2005). *Assessment of heavy metal levels in Almendares River sediments-Havana City, Cuba*. Water Research 39. 3945-3953p.

Orozco, A. (2009). *Determinación de Au, Al, Mg, Cu, Pb, Zn, As y Sb, en sedimentos de la cuenca del Río Cuira*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas.

Ouyang Y., Higman J. Thompson J. O'toole T. y Campbell D. (2001). *Characterization and spatial distribution of heavy metals in sediment from Cedar and Ortega Rivers Subbasin*. Journal of Contaminant Hydrology 54. 19-35p.

Peng, J.; Song, Y.; Peng Y.; Cui, X.; Qiu G. (2009). *The remediation of heavy metals contaminated sediment*. Journal of Hazardous Materials 161. 633–640p.

Perhac, R.; Whelan, J. (1972). *A comparison of water, suspended solid and bottom sediment analyses for geochemical prospecting in a northeast Tennessee Zinc District*. Journal of Geochemical Exploration, 1 (1). 47-53p.

Phillips, J.M., Walling, D.E. (1995). *An assessment of the effects of sample collection, storage and resuspension on the representativeness of measurements on the effective particle size distribution of fluvial suspended sediment*. Water Res. 29, 2498–2508p.

Picard, X. (1968). *Geología de la Cuenca de Santa Lucía, Ocumare del Tuy*. Boletín de Geología N° 19. Caracas, 296 p.

Pizarro J., P.M. Vergara, P.A. Sanhueza, J. A. Rodríguez, S. A. Castro. (2010). *Nutrients dynamics in the main river basins of the centre-southern region of Chile*, J. Hazard. Mater. 175. 608–613p.

Rainbow, P.S. (1985): *The biology of heavy metals in the sea*. Intern. J. Environmental Studies, 25: 195- 211p.

Ramirez, A. (1990). *Chemical weathering on the Tuy River basin, Venezuela*. Chem. Geol., 84: 122-123p.

Ramirez A. y Andara A. (1993). *Water chemistry and chemical weathering in northern Venezuelan drainages*. *Chemical Geology*, 107 (1993) 317-318p.

Rayner-Canham, G. (2000). *Química inorgánica descriptiva*. Segunda edición. Prentice Hall. México. 595p.

Restrepo, J., Kjerfe, B., Hermelin, M. (2006). *Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia*. *J. Hydrol.* 316, 213–232p.

Rivera, A. (1982). *Determinación de Cu, Co, Cr, Mn, Ni, Fe, Pb y Zn en muestras de agua de la Cuenca del Río Tuy*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas.

Rodríguez M., J. M. y Marín G., R. (1999). *Fisicoquímica de Aguas*. Ediciones Díaz de Santos. Madrid-España. 466p.

Rozema, J.; Otte, M.; Broekman, R.; Kamber, G.; Punte, H. (1990). *The response of Spartina anglica to heavy metal pollution. Spartina anglica- a research review*. ITE research publication nº2. A.J. Gray & P.E.M. Benham. 63-68p.

Ryan, P.A. (1991). *Environmental effects of sediment on New Zealand streams: a review*. *New Zealand J. Mar. Freshwater Res.* 25, 207–221p.

Salomão M., Ovale A., Rezende C., Molisani M., Lacerda L., Carvalho C. (2001). *Particulate heavy metals mass balance in the Lower Paraíba do Sul River watershed*. *Hydrol Proc*; 154:587-593p.

Salomons W, Stigliani W. (1995). *Biogeochemistry of pollutants in soils and sediments*. Heidelberg: Springer-Verlag, 352p.

Sansalone, J.J., Buchberger, S.G. (1997). *Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater*. Water Science and Technology 36, 155–160p.

Siegel, F. (2002). *Environmental geochemistry of potentially toxic metals*. Springer. Alemania. 218p.

Smolyakov, B.S., Ryzhikh, A.P., Bortnikova, B., Saeva, O.P., Chernova, N.Yu. (2010). *Behavior of metals (Cu, Zn and Cd) in the initial stage of water system contamination: effect of pH and suspended particles*, Applied Geochemistry, doi: 10.1016/j.apgeochem.2010.05.001

Stober, Q.J., Ross, B.D., Melby, C.L., Dinnel, P.A., Jagielo, T.H., Salo, E.O. (1981). *Effects of suspended volcanic sediment on Coho and Chinook Salmon in the Toule and Cowlitz rivers In Seattle*.

Stumm, W. y Morgan, J.J. (1996). *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. Wiley, New York.

Sutherland, R. (2000). *Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii*, Environ Geol, 39. 611-627p.

Tambo, N., Watanabe, Y. (1979). *Physical characteristics of flocs-I. The floc density function and aluminium floc*. Water Research 13, 409–419p.

Tessier A, Campbell PGC, Bisson M. (1979). *Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals*. Anal Chem; 51:844–851p.

Theofanis, Z.; Astrid,S.; Lidia, G.; Calmano, W. (2001). *Contaminants in sediments: remobilisation and demobilization*, Sci. Total Environ. 266. 195–202p.

Thorner, M. (1992). *The chemical mobility and transport of elements in the weathering environment (chapt. 1.5.)*, en Butt, C. y Zeegers, H. (Eds.). *Geochemistry in tropical and subtropical terrains*. Elsevier, 79-96p.

Tramblay Y., Ouarda T. B.M.J., St-Hilaire A., Poulin J. (2010). *Regional estimation of extreme suspended sediment concentrations using watershed characteristics*. *Journal of Hydrology* 380 (2010) 305–317p.

Turekian, K.K. y Wedepohl, K.H. (1961). *Distribution of the Elements in some major units of the Earth's crust*. *Geological Society of America, Boletín* 72, 175-192p.

Underwood, G.J.C. (2010). *Microphytobenthos and phytoplankton in the Severn Estuary, UK: present situation and possible consequences of a tidal energy barrage*. *Marine Pollution Bulletin* 61, 83–91p.

Underwood, G.J.C., Paterson, D.M. (2003). *The importance of extracellular carbohydrate production by marine epipelagic diatoms*. *Advances in Botanical Research* 40, 183–240p.

Verstraeten, G., Poesen, J. (2000). *Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield*. *Prog. Phys. Geogr.* 24 (2), 219–251p.

Wang X., Lu Y., Han J., He G., Wang T. (2007). *Identification of anthropogenic influences on water quality of rivers in Taihu watershed*, *J. Environ. Sci.* 19. 475-481p.

Waters, T.F. (1995). *Sediments in Streams: Sources, Biological Effects and Control*. American Fisheries Society Monograph 7.

Windom, H.L., Byrd, T., Smith, R.G., Huan, F. (1991). *Inadequacy of NASQUAN data for assessing metal trends in the nation's rivers*. *Environ. Sci. Technol.* 25, 1137–1142p.

WMO. (1981). *Measurement of river sediment*. WMO Operational Hydrology Report 16. World Meteorological Organization, Geneva.

Woitke P.; Wellmitz J.; Helm D.; Kube P.; Lepom P.; Litheraty P. (2003). *Analysis and assessment of heavy metal pollution in suspended solids and sediments of the river Danube*. Chemosphere 51. 633–642p.

Yanes, C. (1980). *Estudio Geoquímico de la Cuenca del Río Tuy-II (Al, Si, Cu, Zn, P y Mo)*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas.

Yanes, C. (1999). Estudio geoambiental del delta del río Orinoco: Aspectos geoquímicos. Informe técnico. Caracas PDVSA, VENEZUELA. 168p.

Yariv, S.; Cross, H. (1979). *Geochemistry of colloid systems*. Springer-Verlag. Berlin. 450p.

Yong, R.N., Mulligan, C.N., Fukue, M. (2006). *Geoenviron. Sustain*. CRC Press/Taylor and Francis, Boca Raton, FL.

Yu K., Tsai L., Chen S., Ho s. (2001). *Chemical binding of heavy metals in anoxic river sediments*. Water Res. 17, 4086–4094p.

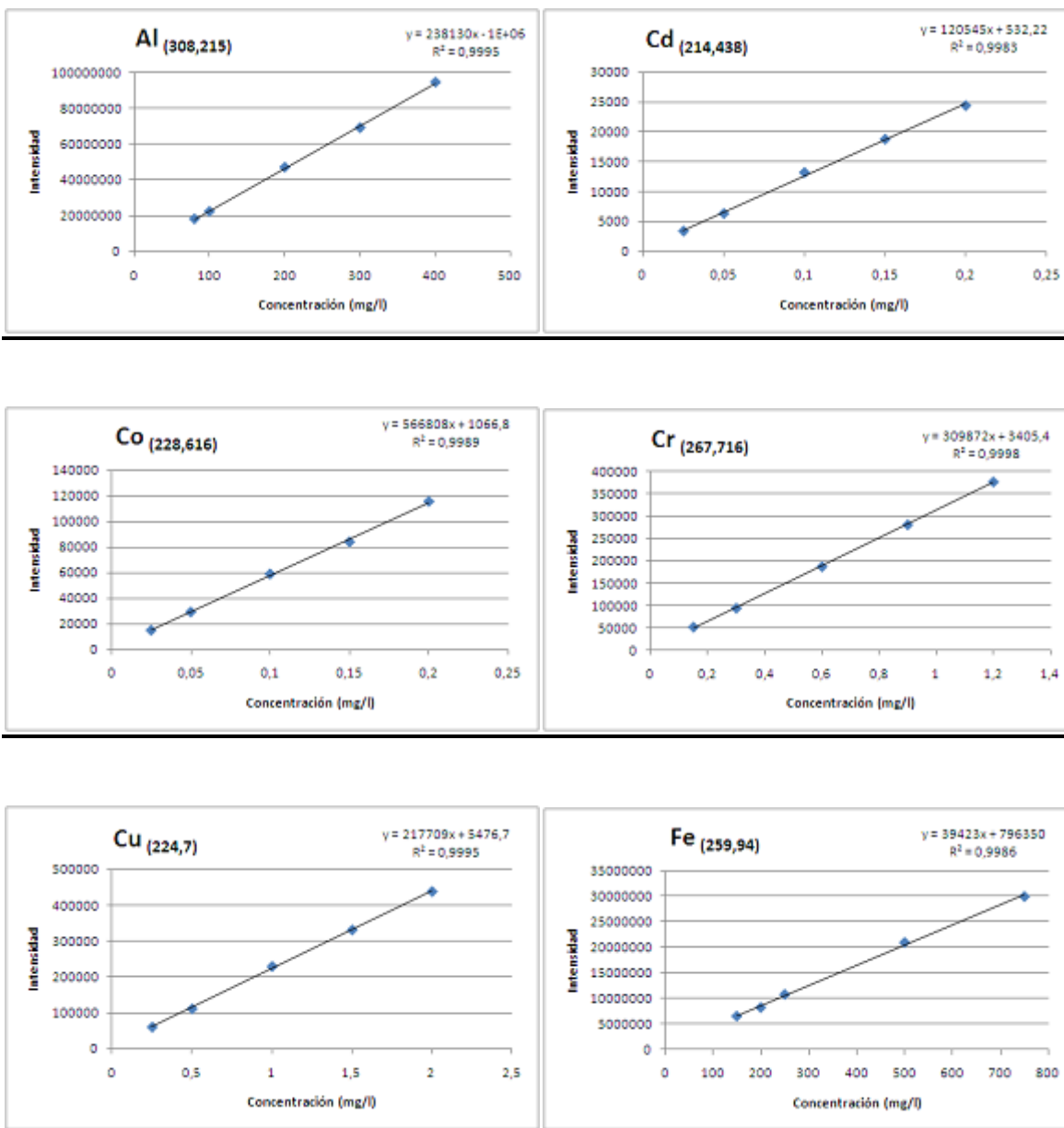
Zambrano, S. (1970) *Estudio Fisiográfico Regional de la Cuenca del Río Tuy*. Boletín de Geología. N° 21. Caracas, 206 p.

Zhang, W.; Feng, H.; Chang, J.; Qu, J.; Xie, H.; Yu, L. (2009). *Heavy metal contamination in surface sediments of Yangtze River intertidal zone: An assessment from different indexes*. Environmental Pollution, 1533-1543p.

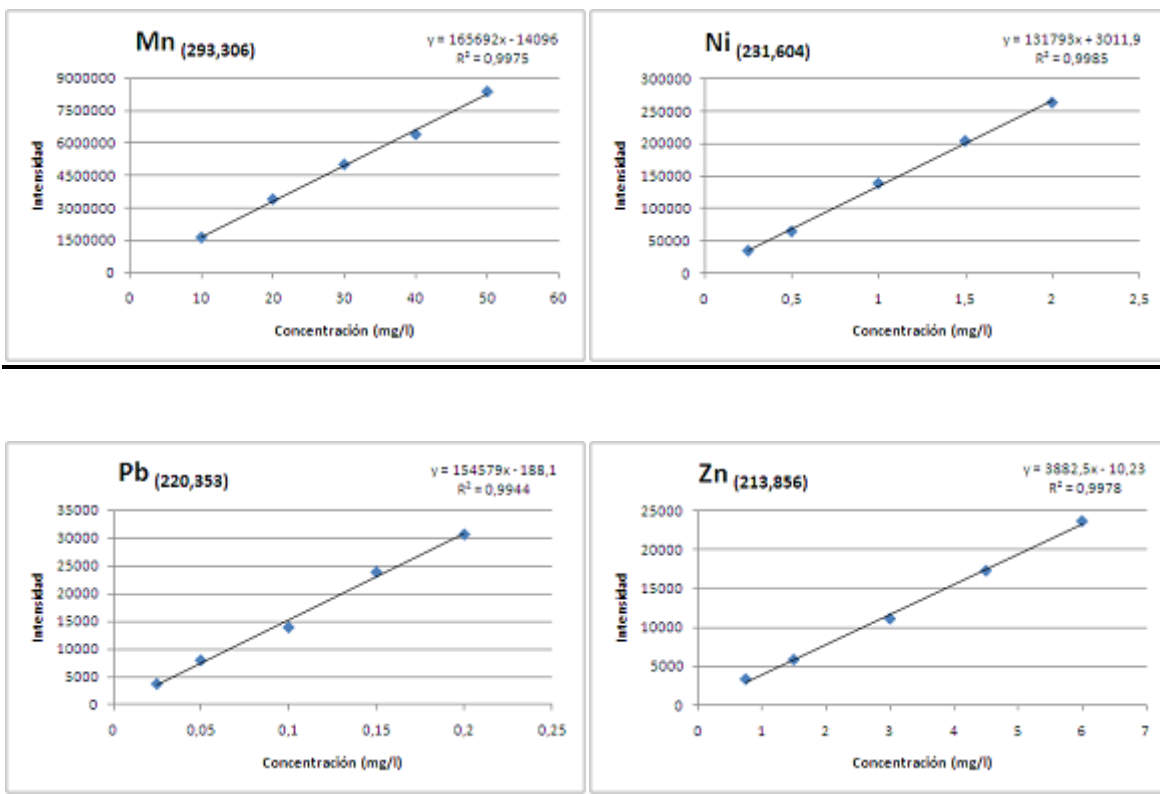
Zhang, J., Liu, C.L. (2002). *Riverine composition and estuarine geochemistry of particulate metals in China-weathering features, anthropogenic impact and chemical fluxes*. Estuarine, Coastal and Shelf Science 54, 1051–1070p.

Zinck, A. (1982). *Ríos de Venezuela*. Cuaderno Lagoven. Caracas. 63p.

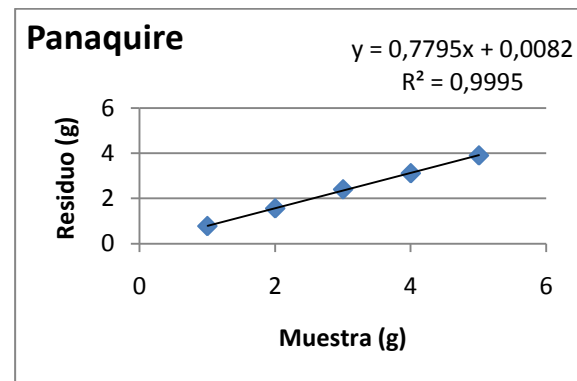
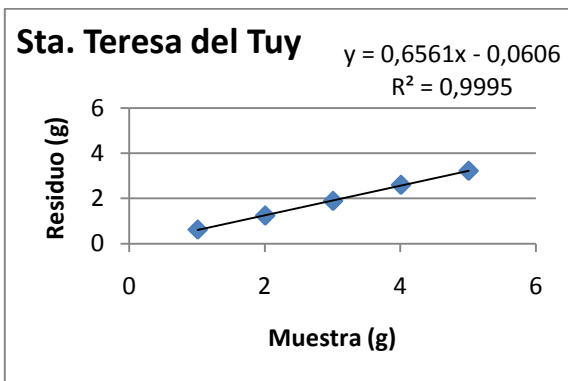
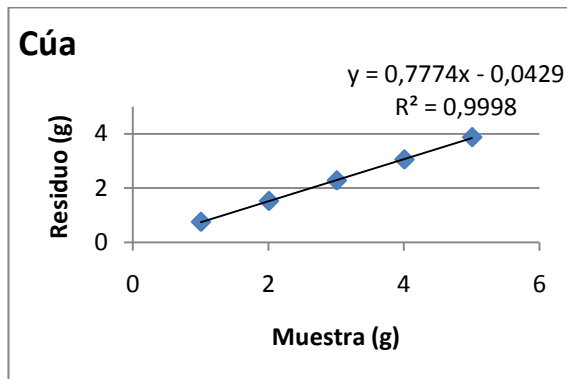
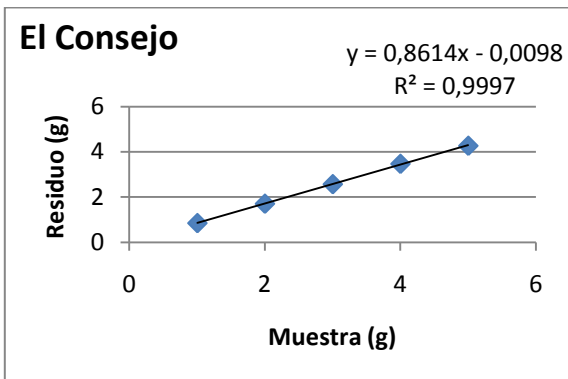
APÉNDICE 1: Curvas de calibración para los metales pesados Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe.



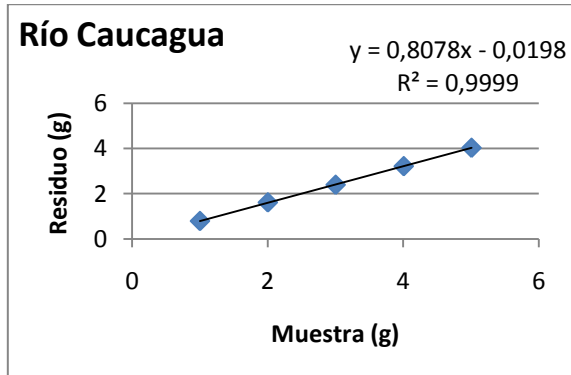
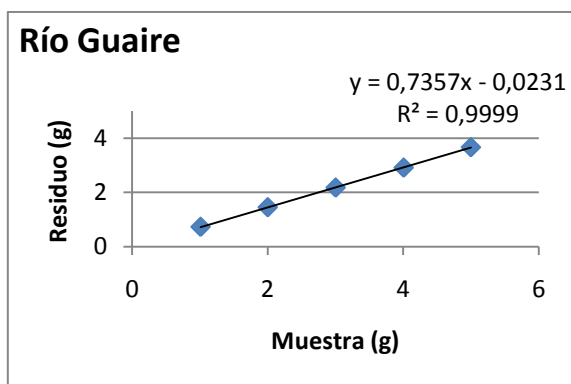
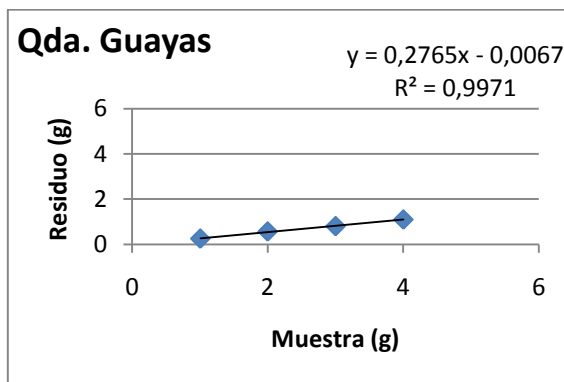
APÉNDICE 2: Curvas de calibración para los metales pesados Mn, Ni, Pb, Zn.



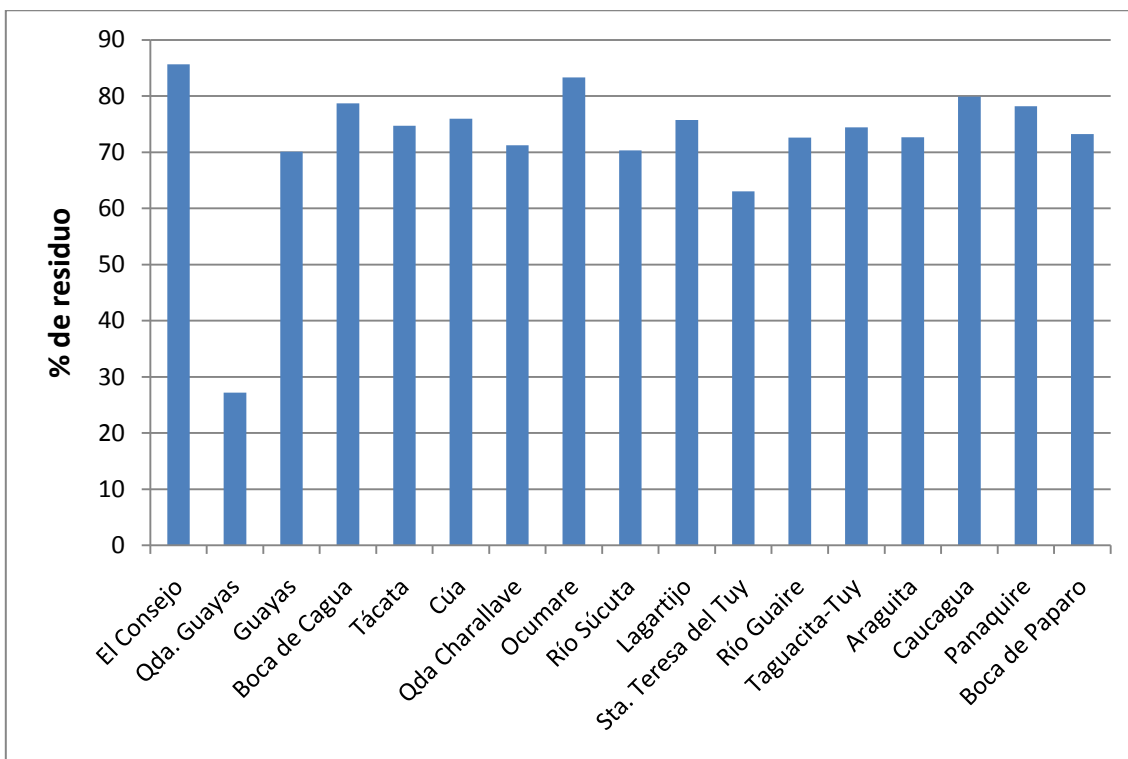
APÉNDICE 3: Correlaciones entre la masa de la muestra versus la masa del residuo.



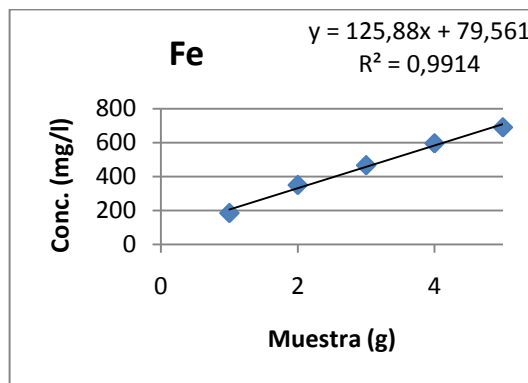
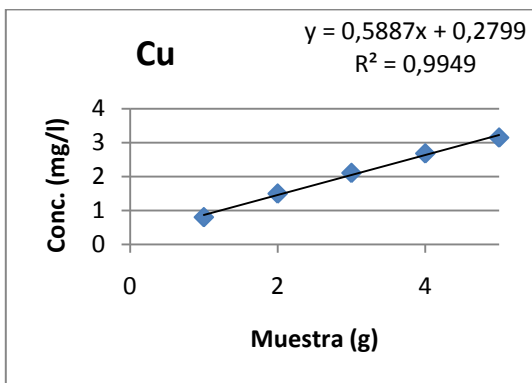
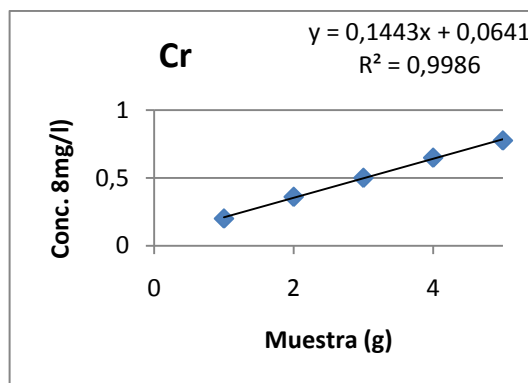
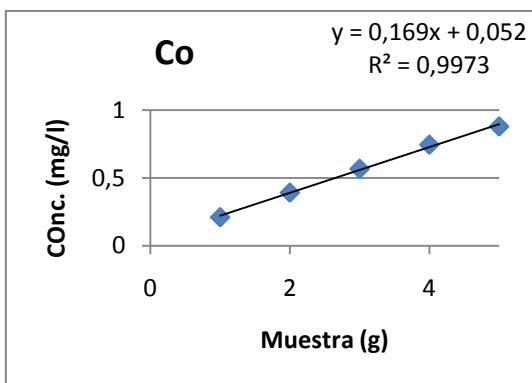
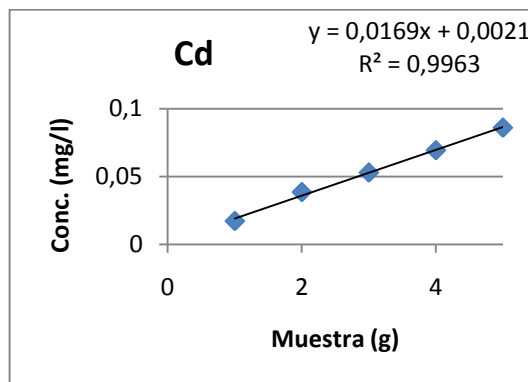
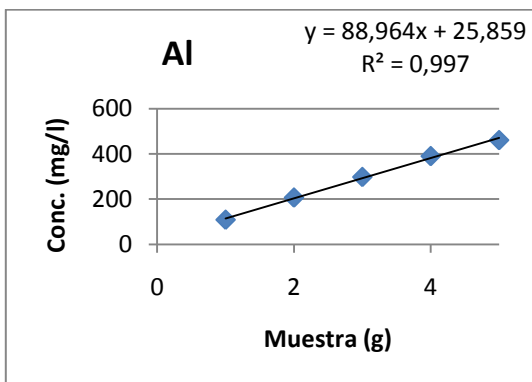
Continuación de APÉNDICE 3: Correlaciones entre la masa de la muestra versus la masa del residuo.



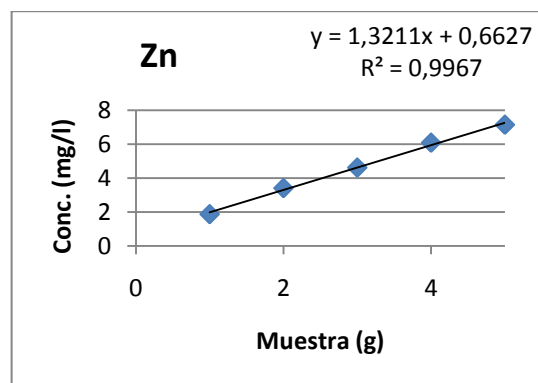
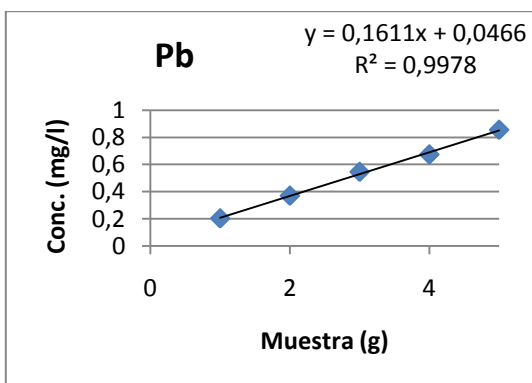
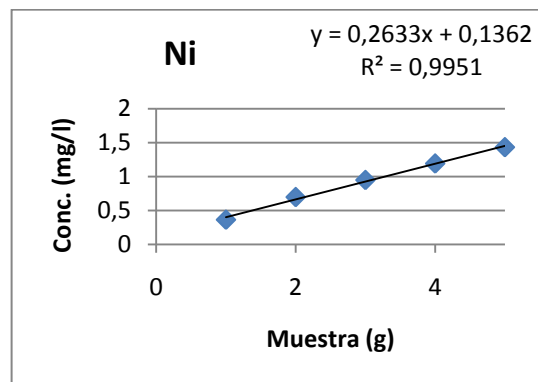
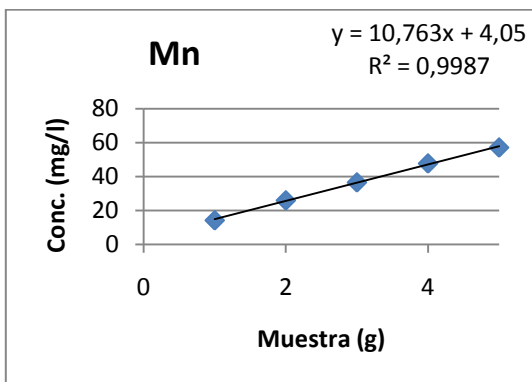
APÉNDICE 4: Porcentajes residuos de las muestras luego del tratamiento químico.



APÉNDICE 5: Concentración de Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe en función de la masa de la muestra en el punto de muestreo de Santa Teresa del Tuy.



APÉNDICE 6: Concentración de Mn, Ni, Pb, Zn en función de la masa de la muestra en el punto de muestreo de Santa Teresa del Tuy.



APÉNDICE 7: Resultado del cálculo de parámetros estadísticos.
(Punto de muestreo: Santa Teresa del Tuy)

Parámetro	Media*	Desv. Estándar*	Coef. Variación*	Media**	Desv. Estándar**	Coef. Variación**
Al	5004	300	6	9615	2320	24
Cd	0,89	0,04	4,96	2,33	0,42	18,04
Co	9,58	0,65	6,76	3,8	0,5	14,1
Cr	8,63	0,87	10,08	26,3	5,1	19,3
Cu	35,48	3,29	9,28	24,1	4,7	19,3
Fe	8012	942	12	18729	4533	24
Mn	628	55	9	110	7	6
Ni	16,1	1,6	10,1	24,8	4,6	18,5
Pb	9,1	0,7	7,4	4,3	0,9	21,4
Zn	80,7	8,8	10,9	77,8	16,1	20,6

*Digestión en HCl 1M

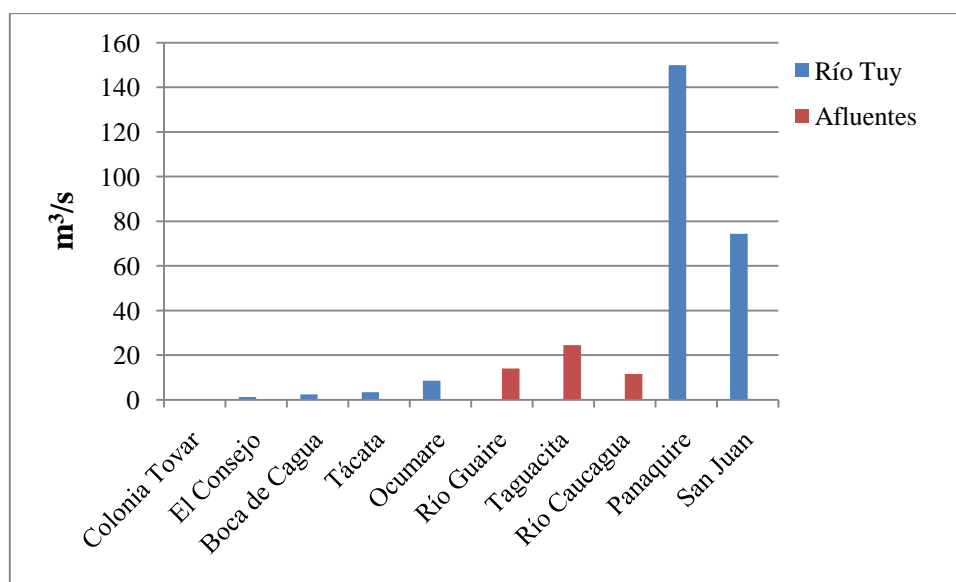
**Digestión en HNO₃ concentrado

APÉNDICE 8: Concentración de sólidos suspendidos en el Río Tuy.

Lugar	Conc. (mg/l)	Lugar	Conc. (mg/l)
Colonia Tovar	0	Río Súcuta (A)	21
Hda. Buen Paso (A)	50	Lagartijo (A)	737
Hda. Torrecasa (A)	42	Sta. Teresa del Tuy (A)	2572
El Consejo (B)	97	Río Guaire (B)	477
El Consejo (B)	303	Río Guaire (B)	451
Hda. Sta. Teresa (A)	56	Taguacita-Tuy (B)	53
Qda. Guayas (A)	694	Taguacita-Tuy (B)	52
Guayas (A)	408	Río Taguacita	0
Boca de Cagua (B)	229	Araguita (A)	425
Boca de Cagua (B)	213	Río Taguaza (A)	14
Tuy antes del Guare (A)	4016	Río Caucagua (B)	613
Río Guare (A)	36	Río Caucagua (B)	538
Tácata (B)	86	Río Cuirá (B)	19
Tácata (B)	49	Panaquire (B)	611
Tácata (A)	2834	Panaquire (B)	589
Cúa (A)	4039	Río Panaquirito	0
Qda. Cúa (A)	32	Qda. Yaguapo	0
Río Tarma (A)	11	Qda. Urba	0
Qda. Ocumarito (A)	29	Río Sapo	0
Qda. Charallave (A)	102	El Samán	0
Ocumare (A)	290	San Juan-Galpones (B)	8
Ocumare (B)	827	San Juan-Galpones (B)	16
Ocumare (B)	991	Boca de Paparo (B)	551
Río Marare (A)	201		

APÉNDICE 9: Caudal en algunos puntos de muestreo en el Río Tuy y afluentes.

Punto de muestreo	Área (m²)	Velocidad (m/s)	Ancho de la sección transversal (m)	Caudal (m³/s)
Colonia Tovar	0,56	0,25	3,10	0,12
El Consejo	2,19	0,57	10,30	1,25
Boca de Cagua	3,04	0,79	13,10	2,40
Tácata	4,40	0,77	20,55	3,40
Ocumare	9,0	0,954	14,73	8,58±0,37
Río Guaire	28,4	0,496	34,29	14,07±0,60
Taguacita	24,5	1,001	23,44	24,48±0,48
Río Caucagua	13,5	0,860	15,57	11,62±0,34
Panaquire	103,8	1,443	49,65	149,85±2,25
San Juan	80,9	0,921	42,05	74,42±0,89



APÉNDICE 10: Coeficientes de correlación entre las concentraciones de los metales pesados medidos en la cuenca del Río Tuy (Digestión con HCl)

	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
Al	1,000	0,653	0,785	0,558	0,420	0,695	0,653	0,181	0,022	0,501	0,233
Cd		1,000	0,805	0,767	0,587	0,965	0,568	0,598	0,000	0,738	0,232
Co			1,000	0,826	0,368	0,848	0,792	0,765	0,011	0,500	0,350
Cr				1,000	0,395	0,786	0,298	0,786	0,016	0,513	0,268
Cu					1,000	0,550	0,177	0,120	0,092	0,943	0,064
Fe						1,000	0,600	0,640	0,002	0,708	0,193
Mn							1,000	0,098	0,005	0,288	0,567
Ni								1,000	0,009	0,138	0,263
Pb									1,000	0,087	0,325
Zn										1,000	0,162
Hg											1,000

APÉNDICE 11: Coeficientes de correlación entre las concentraciones de los metales pesados medidos en la cuenca del Río Tuy (Digestión con HNO₃)

	Al	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Ni	Pb	Zn	Hg
Al	1,000	0,866	0,594	0,657	0,786	0,869	0,678	0,640	0,140	0,770	0,297
Cd		1,000	0,322	0,632	0,854	0,963	0,473	0,685	0,552	0,926	0,569
Co			1,000	0,673	0,714	0,865	0,860	0,685	0,326	0,779	0,332
Cr				1,000	0,721	0,651	0,200	0,887	0,095	0,182	0,252
Cu					1,000	0,872	0,538	0,774	0,106	0,919	0,325
Fe						1,000	0,826	0,738	0,574	0,938	0,393
Mn							1,000	0,810	0,000	0,503	0,527
Ni								1,000	0,227	0,722	0,643
Pb									1,000	0,569	0,669
Zn										1,000	0,607
Hg											1,000

APÉNDICE 12: Concentraciones elementales para las muestras extraídas con HCl 1 M. Para cada elemento se indica un error relativo, con un nivel de confianza de 95 %.

	Al ($\mu\text{g/g}$)	Cd ($\mu\text{g/g}$)	Co ($\mu\text{g/g}$)	Cr ($\mu\text{g/g}$)	Cu ($\mu\text{g/g}$)	Fe ($\mu\text{g/g}$)
	± 373	$\pm 0,05$	$\pm 0,8$	$\pm 1,0$	$\pm 4,0$	± 1171
Hda. Buen Paso	ND	ND	ND	ND	ND	ND
El Consejo 1.1	1949	0,19	4,4	1,6	10,2	2172
El Consejo 1.2	1050	0,08	2,8	1,3	5,4	1218
Hda. Sta. Teresa	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Qda. Guayas	1048	0,60	1,4	1,7	22,8	5490
Guayas	1106	0,36	2,4	2,9	40,3	3744
Boca de Cagua 1.1	2294	0,78	6,6	5,5	29,7	7169
Boca de Cagua 1.2	2502	0,88	7,4	5,8	42,8	8031
Tácata 1	3278	0,50	6,2	3,1	21,5	4832
Tácata 2.1	3798	1,09	11,0	11,2	43,1	10302
Tácata 2.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cúa	3036	0,55	7,9	4,2	25,5	5866
Qda. Cúa	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Qda. Ocumarito	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Qda. Charallave	3780	1,04	10,0	12,6	49,1	8882
Ocumare 1	3725	0,97	10,6	10,9	38,6	8402
Ocumare 2.1	3145	0,81	9,2	8,6	34,6	7429
Ocumare 2.2	2092	0,46	6,7	5,4	18,8	4478
Río Súcata	7164	1,87	22,3	7,9	56,7	17343
Lagartijo	4132	0,96	11,6	10,6	37,8	9202
Sta Teresa del Tuy	5004	0,89	9,6	8,6	35,5	8012
Río Guaire 1.1	3354	0,63	5,8	6,2	44,1	6206
Río Guaire 1.2	3369	0,72	6,6	5,5	41,9	6571
Taguacita-Tuy 1.1	4643	0,83	9,4	6,7	37,2	7314
Taguacita-Tuy 1.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Araguita	5021	0,80	7,7	7,0	47,8	7669
Río Caucagua 1.1	2121	0,64	5,2	4,2	29,9	5727
Río Caucagua 1.2	2260	0,65	5,6	4,7	32,2	6317
Río Cuirá	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Panaquire 1.1	3077	0,70	8,1	6,0	31,4	6734
Panaquire 1.2	3437	1,13	9,0	8,8	33,8	8058
San Juan 1.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Juan 1.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Boca de Paparo	4934	0,96	11,0	11,0	30,7	9670

Continuación del APÉNDICE 12: Concentraciones elementales para las muestras extraídas con HCl 1 M. Para cada elemento se indica un error relativo, con un nivel de confianza de 95 %.

	Mn (µg/g)	Ni (µg/g)	Pb (µg/g)	Zn (µg/g)	Hg (ng/g)
	± 67	± 2,0	± 0,8	± 10,9	ND
Hda. Buen Paso	ND	ND	ND	ND	126
El Consejo 1.1	438	8,2	12,3	26,4	4
El Consejo 1.2	241	5,5	6,2	13,0	3
Hda. Sta. Teresa	ND	ND	ND	ND	28
Qda. Guayas	69	7,0	7,7	53,8	5
Guayas	86	7,5	6,5	76,7	3
Boca de Cagua 1.1	352	13,5	12,0	71,6	13
Boca de Cagua 1.2	375	14,6	13,3	96,2	9
Tácata 1	472	9,0	13,9	54,3	41
Tácata 2.1	455	24,1	12,4	94,0	15
Tácata 2.2	ND	ND	ND	ND	21
Cúa	509	14,0	14,7	60,1	38
Qda. Cúa	ND	ND	ND	ND	1493
Qda. Ocumarito	ND	ND	ND	ND	163
Qda. Charallave	467	28,3	17,2	115,9	116
Ocumare 1	917	23,9	12,7	93,6	50
Ocumare 2.1	400	19,3	14,8	81,4	67
Ocumare 2.2	331	17,0	9,1	46,0	24
Río Súcuta	1314	8,7	5,2	141,5	11
Lagartijo	711	18,1	10,1	93,7	35
Sta Teresa del Tuy	628	16,1	9,1	80,7	16
Río Guaire 1.1	438	10,2	31,2	92,9	121
Río Guaire 1.2	360	10,9	29,8	98,8	116
Taguacita-Tuy 1.1	508	18,2	23,4	92,2	41
Taguacita-Tuy 1.2	ND	ND	ND	ND	38
Araguita	434	14,1	22,6	99,3	24
Río Caucagua 1.1	534	9,9	16,2	67,8	34
Río Caucagua 1.2	500	10,6	20,1	80,8	38
Río Cuira	ND	ND	ND	ND	34
Panaquire 1.1	558	14,3	17,9	72,3	35
Panaquire 1.2	576	16,6	21,1	92,8	50
San Juan 1.1	ND	ND	ND	ND	55
San Juan 1.2	ND	ND	ND	ND	45
Boca de Paparo	770	28,1	14,0	68,6	40

APÉNDICE 13: Concentraciones elementales para las muestras extraídas con HNO₃ concentrado. Para cada elemento se indica un error relativo, con un nivel de confianza de 95 %.

	Al (µg/g)	Cd (µg/g)	Co (µg/g)	Cr (µg/g)	Cu (µg/g)	Fe (µg/g)
	± 2884	± 0,52	± 0,6	± 6,2	± 5,7	± 5635
Hda. Buen Paso	ND	ND	ND	ND	ND	ND
El Consejo 1.1	4744	1,09	1,9	10,2	13,6	10626
El Consejo 1.2	3042	0,85	2,0	9,8	8,0	8004
Hda. Sta. Teresa	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Qda. Guayas	3414	0,95	2,7	5,5	11,8	8548
Guayas	1551	0,40	1,4	4,8	6,2	3521
Boca de Cagua 1.1	4940	1,34	2,8	17,1	12,5	12703
Boca de Cagua 1.2	4922	1,49	2,8	15,8	13,6	12465
Tácata 1	11376	2,18	3,3	16,3	18,5	19019
Tácata 2.1	10202	2,59	4,7	33,7	24,3	21472
Tácata 2.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Cúa	8455	2,11	3,5	18,3	17,3	17871
Qda. Cúa	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Qda. Ocumarito	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Qda. Charallave	8799	2,41	6,2	40,0	31,5	22197
Ocumare 1	6554	1,77	3,4	26,5	16,9	16174
Ocumare 2.1	6094	1,95	3,4	22,7	21,7	14874
Ocumare 2.2	6176	1,90	3,9	21,1	18,8	15879

Continuación del APÉNDICE 13: Concentraciones elementales para las muestras extraídas con HNO₃ (c). Para cada elemento se indica un error relativo, con un nivel de confianza de 95 %.

	Al (µg/g)	Cd (µg/g)	Co (µg/g)	Cr (µg/g)	Cu (µg/g)	Fe (µg/g)
	± 2884	± 0,52	± 0,6	± 6,2	± 5,7	± 5635
Río Súcuta	15066	3,37	4,5	16,9	42,5	28614
Lagartijo	10951	2,58	4,3	30,6	28,6	19153
Sta Teresa del Tuy	9615	2,33	3,8	26,3	24,1	18729
Río Guaire 1.1	7117	2,28	4,5	15,7	23,9	19212
Río Guaire 1.2	8840	2,85	4,7	17,2	27,6	23347
Taguacita-Tuy 1.1	8946	2,47	4,5	26,1	22,2	20284
Taguacita-Tuy 1.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Araguita	7279	2,08	4,7	22,4	24,4	18587
Río Caucagua 1.1	7290	2,09	4,2	14,9	20,0	18077
Río Caucagua 1.2	7152	2,29	4,3	15,4	19,8	19149
Río Cuira	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Panaquire 1.1	8503	2,36	4,9	23,5	23,0	18916
Panaquire 1.2	9309	2,96	5,0	25,5	25,0	20729
San Juan 1.1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
San Juan 1.2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Boca de Paparo	17333	3,84	7,0	47,2	37,0	30652

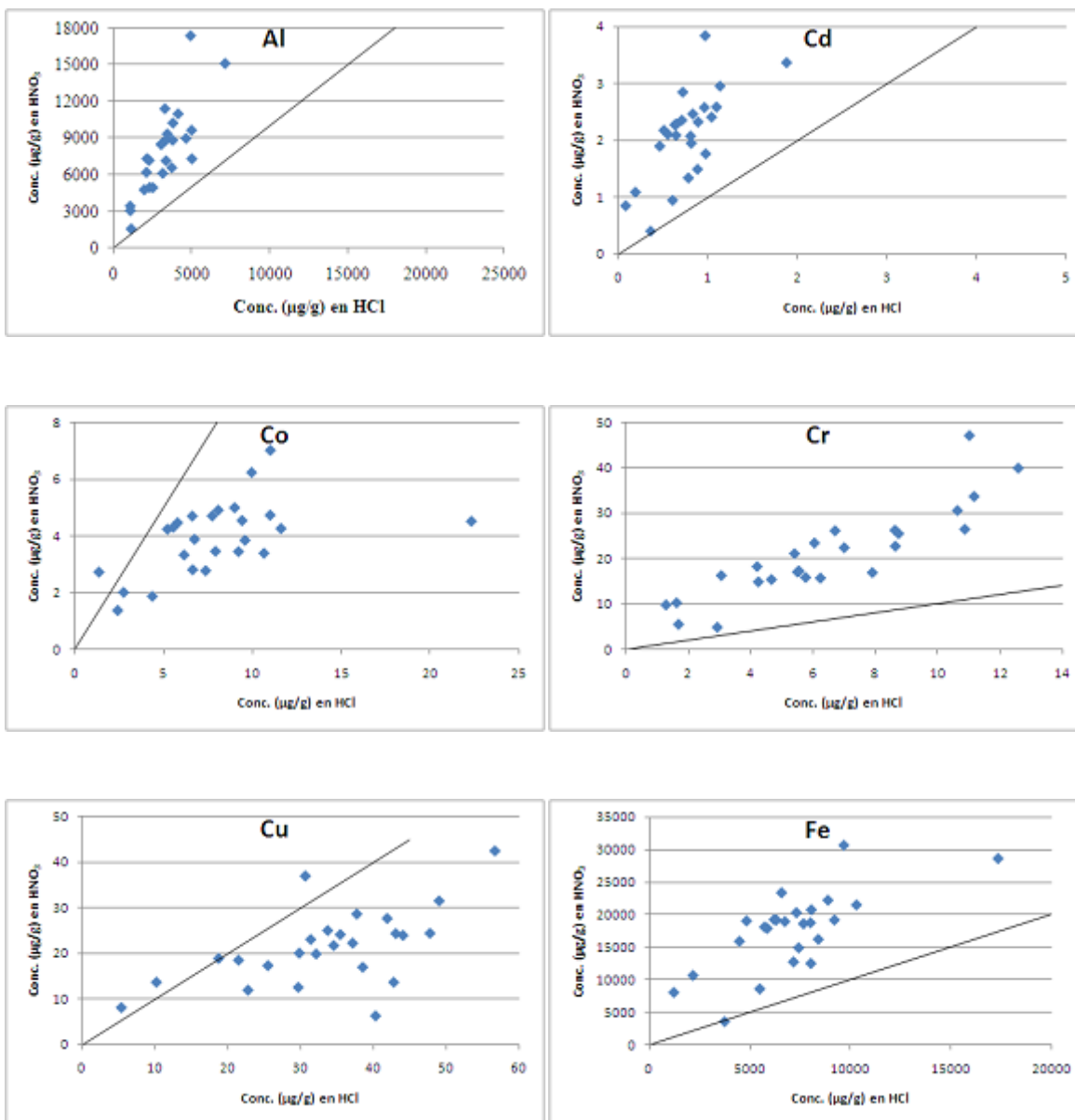
Continuación del APÉNDICE 13: Concentraciones elementales para las muestras extraídas con HNO₃ (c). Para cada elemento se indica un error relativo, con un nivel de confianza de 95 %.

	Mn (µg/g)	Ni (µg/g)	Pb (µg/g)	Zn (µg/g)	Hg (ng/g)
	± 8	± 5,7	± 1,1	± 19,9	ND
Hda. Buen Paso	ND	ND	ND	ND	126
El Consejo 1.1	57	13,0	5,6	46,3	4
El Consejo 1.2	59	11,8	3,6	30,7	3
Hda. Sta. Teresa	ND	ND	ND	ND	28
Qda. Guayas	23	11,2	2,7	42,8	5
Guayas	22	5,8	0,8	24,8	3
Boca de Cagua 1.1	71	19,1	3,5	41,4	13
Boca de Cagua 1.2	66	18,4	3,5	47,6	9
Tácata 1	99	20,4	7,0	68,3	41
Tácata 2.1	120	35,9	5,5	82,6	15
Tácata 2.2	ND	ND	ND	ND	21
Cúa	101	22,8	6,3	67,0	38
Qda. Cúa	ND	ND	ND	ND	1493
Qda. Ocumarito	ND	ND	ND	ND	163
Qda. Charallave	166	46,6	4,9	99,5	116
Ocumare 1	115	27,2	3,7	68,9	50
Ocumare 2.1	110	28,2	4,1	245,4	67
Ocumare 2.2	84	25,4	5,6	64,8	24

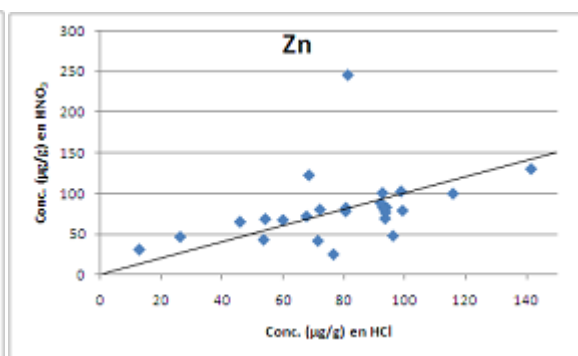
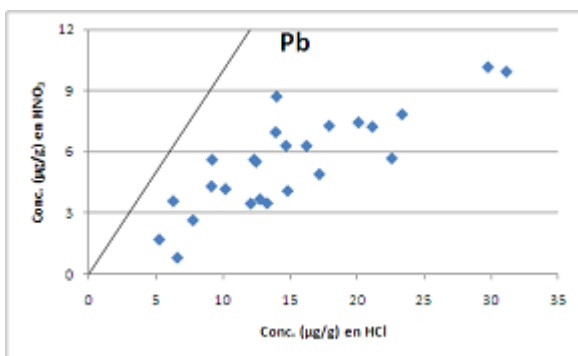
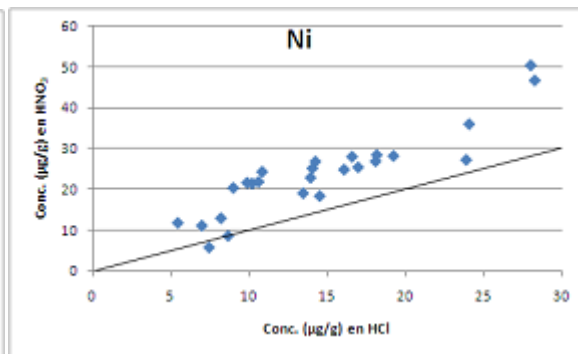
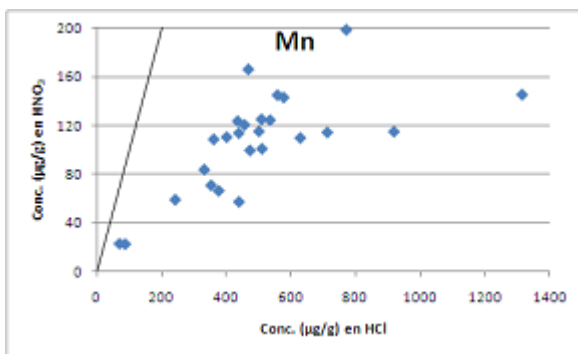
Continuación del APÉNDICE 13: Concentraciones elementales para las muestras extraídas con HNO₃ (c). Para cada elemento se indica un error relativo, con un nivel de confianza de 95 %.

	Mn (µg/g)	Ni (µg/g)	Pb (µg/g)	Zn (µg/g)	Hg (ng/g)
	± 8	± 5,7	± 1,1	± 19,9	ND
Río Súcuta	145	8,6	1,7	129,8	11
Lagartijo	114	26,9	4,2	76,6	35
Sta. Teresa del Tuy	110	24,8	4,3	77,8	16
Río Guaire 1.1	114	21,4	10,0	82,0	121
Río Guaire 1.2	108	24,3	10,2	102,2	116
Taguacita-Tuy 1.1	125	28,4	7,9	87,8	41
Taguacita-Tuy 1.2	ND	ND	ND	ND	38
Araguita	123	25,2	5,7	78,6	24
Río Caucagua 1.1	124	21,6	6,3	71,5	34
Río Caucagua 1.2	115	21,9	7,5	82,0	38
Río Cuira	ND	ND	ND	ND	34
Panaquire 1.1	145	26,8	7,3	79,9	35
Panaquire 1.2	143	28,0	7,3	100,3	50
San Juan 1.1	ND	ND	ND	ND	55
San Juan 1.2	ND	ND	ND	ND	45
Boca de Paparo	198	50,3	8,7	122,2	40

APÉNDICE 14: Distribución de Al, Cd, Co, Cr, Cu, Fe en HCl 1 M y HNO₃ concentrado.



APÉNDICE 15: Distribución de Mn, Ni, Pb, Zn en HCl 1 M y HNO₃ concentrado.



APÉNDICE 16: Concentraciones de metales pesados determinadas (en extracción ácida) en algunos puntos de muestreo en el Río Tuy (Modificado de Lugo, 1982)

Lugar	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
Qda. Guayas	1,1	22	52	140	3,8	0,39	220	54	54	200
Guayas	1,6	22	100	73	4,2	0,54	390	86	80	190
Tácata	2	19	110	68	4,2	0,39	410	88	44	170
Río Súcuta	1,6	28	68	91	5,5	-	1000	34	60	130
Lagartijo	1,7	23	94	64	4,6	0,37	430	90	55	150
Río Guaire	1,8	18	72	75	4,3	0,59	350	74	180	250
Araguita	1,5	21	65	66	4,3	0,63	410	71	110	210
Río Caucagua	1,9	26	43	70	4,0	0,56	650	72	63	200
Panaquire	1,5	21	77	72	4,8	0,39	530	72	59	180
Boca de Paparo	1,8	21	62	68	4,8	0,41	570	76	59	170

APÉNDICE 17: Concentraciones de metales pesados determinadas en algunos puntos de muestreo en el Río Tuy (Modificado de Hernández, 2011)

Lugar	Al (ppm)	Co (ppm)	Cu (ppm)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Ni (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
El Consejo	53	0,4	1,6	30	6	1,8	2,3	1,3
Qda. Guayas	14	0,6	1,1	319	211	2,6	1,6	2,0
Guayas	26	0,4	2,1	24	89	2,5	0,3	2,1
Boca de Cagua	22	0,4	2,0	19	23	3,6	2,2	1,8
Tácata	40	0,3	3,1	34	16	2,6	0,5	2,0
Cúa	25	0,2	3,1	16	5	3,0	1,1	2,2
Qda. Charallave	16	0,7	2,6	21	31	9,6	0,5	2,0
Ocumare	16	0,2	2,9	14	9	4,4	0,7	2,5
Río Súcuta	32	0,1	2,5	37	2	0,7	1,0	1,6
Lagartijo	14	0,2	3,6	16	3	7,6	1,3	2,6
Sta Teresa del Tuy	33	0,4	6,5	19	43	5,7	0,4	5,3
Río Guaire	41	0,8	6,3	32	24	8,5	2,9	5,4
Taguacita-Tuy	17	0,4	0,7	29	-	3,5	0,8	0,2
Araguita	43	0,6	2,9	26	47	7,3	1,5	1,9
Río Caucagua	16	0,6	3,7	25	10	6,8	2,6	2,7
Panaquire	29	0,7	4,4	20	437	6,9	1,2	3,0
Boca de Paparo	25	0,5	3,3	85	123	7,2	2,3	3,6

Cuenca del Río Tuy

67°0'0"W

66°0'0"W

MAR CARIBE

10°0'0"N



Signos Convencionales

- División Estatal
- Cuencas Hidrográficas
- Mar Caribe
- Areneras
- menos de 50 mil habitantes
- Actividad Agropecuaria
- Zona Industrial
- Granjas Porcinas
- menos 1 millón de habitantes
- más de 1 millón de habitantes

Escala Gráfica



PUNTOS DE MUESTREO

Nº	Localidad
1	Colonia Tovar
2	H. Buen Paso
3	H. Torre Casa
4	El Consejo
5	H. Santa Teresa
6	Guayas
7	Boca de Cagua
8	Tuy antes de Guare
9	Tacuta
10	Cúa
11	Occumare
12	Lagartijo
13	Santa Teresa del Tuy
14	Taguacita Tuy
15	Araguata
16	Panaquire
17	El Samán
18	San Juan-Galpones
19	Boca de Pájaros
EN EL RÍO TUY	
EN AFLUENTES	
Nº	Localidad
1	Qda. Guayas
2	Río Guare
3	Qda. Cúa
4	Río Tarma
5	Qda. Occumarito
6	Qda. Charallave
7	Río Marare
8	Río Sábata
9	Río Guare
10	Río Taguacita
11	Río Taguaza
12	Río Caucaigua
13	Río Cúbra
14	Río Panaquireño
15	Qda. Yaguajay
16	Qda. Urba
17	Río Sapo

(Mapa base tomado de IGVS, ubicación de actividades principales tomado de LNH)
 PROYECTO RÍO TUY 2011 UCV GEOQUÍMICA